

PENGARUH VARIASI KEDALAMAN PIN *FRICITION STIR WELDING* TERHADAP KEKUATAN TARIK *DISSIMILAR* MATERIAL AA6061-T6 DAN AA7075-T6

**Firman Baktiar¹, Viktor Naubnome^{1*}, Iwan Nugraha Gusniar¹, Desi Natalia Ratu²,
Stefanus Neno³, Jemssy Ronald Rohi⁴**

¹ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jawa Barat, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Kupang

³Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Albert Foenay

⁴Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Sains & Teknik, Universitas Nusa Cendana

*Email: viktornaubnome@ft.unsika.ac.id

Abstrak

Friction Stir Welding (FSW) adalah metode pengelasan dalam keadaan padat yang memanfaatkan panas yang dihasilkan dari gesekan antara pin yang berputar dan bahan dasar, sehingga mampu menghasilkan sambungan yang baik tanpa melibatkan proses peleburan logam. Metode cocok untuk diterapkan pada pengelasan bahan aluminium, termasuk pengelasan bahan berbeda antara dua jenis paduan yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kedalaman pin terhadap sifat mekanik pengelasan FSW bahan berbeda AA7075-T6 dan AA6061-T6 menggunakan pin tirus berulir dengan sudut bahu 0°. Variasi kedalaman pin yang digunakan adalah 3,5 mm, 4,5 mm, dan 5,5 mm, dengan pelaksanaan uji tarik mengacu pada standar ASTM E8, menggunakan mesin uji tarik universal. Hasil uji menunjukkan bahwa kedalaman pin 4,5 mm menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 156.197 N/mm² dan kekuatan leleh sebesar 152.010 N/mm², variasi kedalaman 4,5 mm menghasilkan sifat mekanik terbaik dari variasi lainnya dan layak dijadikan rujukan untuk pengerjaan FSW kedepannya.

Kata Kunci: *Dissimilar, Friction Stir Welding, Kedalaman Pin, Kekuatan Tarik, Sifat Mekanik.*

PENDAHULUAN

Penggunaan aluminium di industri otomotif dan penerbangan terus meningkat karena sifatnya yang ringan dan tahan lama. Menurut The Aluminium Association, penggunaan aluminium marak digunakan diberbagai sektor industri, mulai dari kontainer pengemasan 27,4%, transportasi 21,1%, konstruksi gedung 17,8%, ekspor 10,6%, kelistrikan 9,1%, barang tahan lama 8%, peralatan permesinan 5,9%, dan industri lainnya <1% (Nunes dkk., 1990). Penelitian ini memakai paduan aluminium AA7075-T6 dan AA6061-T6 termasuk ke dalam kategori duralium yang sudah eksis dipakai pada konstruksi pesawat terbang. Keduanya dipilih karena punya kekuatan tinggi namun tetap fleksibel untuk berbagai penerapan. AA7075-T6 terkenal sangat kuat, sementara AA6061-T6 lebih mudah dibentuk dan dilas. Kombinasi kedua material ini sangat cocok digunakan di sektor otomotif dan dirgantara, di mana kebutuhan akan material ringan tapi kokoh menjadi prioritas utama dalam pengembangan kendaraan modern dan pesawat terbang (Callister & Retwisch, 2018) (Nunes dkk., 1990).

Pengelasan adalah proses penyambungan permanen dua material melalui fusi atau difusi, dipengaruhi panas, tekanan, dan karakter metalurgi. Umumnya terbagi menjadi solid-state welding (SSW) dan liquid-state welding (LSW). Friction Stir Welding (FSW) termasuk SSW, memanfaatkan fase difusi atau sebelum logam mencair, sehingga tidak memerlukan peleburan ulang seperti pada pengelasan cair (Gusniar dkk., 2022). FSW lebih unggul dibandingkan fusion welding dalam efisiensi energi, dampak lingkungan, dan fleksibilitas penggunaannya (Rahmat & Naubnome, 2024). Metode ini paling banyak diterapkan pada penyambungan aluminium dan paduannya, karena logam tersebut mampu mengalir dan berpadu dengan baik pada laju regangan tinggi tanpa perlu mencair. FSW menjadi pilihan menarik karena bebas asap, peralatan relatif sederhana, kemampuan menyambung logam dengan weldability rendah, serta dapat menyatukan dua material berbeda jenis. FSW menerapkan beberapa gaya utama pada prosesnya, seperti downward force, traverse force, lateral force, dan torsi (FSW-TECH ERASMUS, 2017).

Dissimilar material adalah dua material yang berbeda, seperti yang diterapkan pada penelitian ini (Rajan dkk., 2011) (Callister & Retwisch, 2018). paduan aluminium seri 6xxx memiliki ketahanan korosi unggul dan weldability baik, sedangkan seri 7xxx menawarkan kekuatan tarik hampir dua kali

lipat berkat kandungan seng, namun rentan korosi dan sulit dilas secara fusi. Dengan sambungan dissimilar, struktur mengintegrasikan ketahanan korosi seri 6xxx di area terpapar lingkungan agresif dan kekuatan seri 7xxx di area pembebanan utama. Pendekatan ini merupakan kompromi desain optimal yang tidak dapat dicapai jika hanya menggunakan satu material tunggal (Callister & Retwisch, 2018) (Nunes dkk., 1990). Keberhasilan penyambungan material tak serupa dengan FSW sangat bergantung pada ketepatan parameter, terutama kedalaman pin (FSW-TECH ERASMUS, 2017). Pin berperan membangkitkan panas dan menopang presipitasi saat difusi berlangsung, sehingga menentukan kualitas sambungan (FSW-TECH ERASMUS, 2017) (Callister & Retwisch, 2018).

Berbagai penelitian sebelumnya, Penelitian Diana Puspita Sumarno dan Mochammad Noer Ilman berjudul "Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Dissimilar AA2024-O & AA6061-T6 Welded Joints at Varying Tool Rotational Speeds" bertujuan menganalisis pengaruh variasi kecepatan rotasi tool terhadap struktur mikro dan sifat mekanik sambungan FSW dissimilar antara AA2024-O dan AA6061-T6. Material yang digunakan berupa pelat berdimensi 300×100×3 mm, dengan tool berbahan baja AISI H13 berbentuk silinder, diameter pin 5 mm, panjang pin 2,8 mm dan 3,8 mm, serta sudut kemiringan 2°. Variasi kecepatan rotasi yang diterapkan adalah 910, 1500, dan 2280 rpm dengan traverse speed konstan 30 mm/menit. Pengujian yang dilakukan meliputi pengamatan struktur mikro, kekerasan mikro Vickers, dan uji tarik mengacu pada standar ASTM E8. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimal dicapai pada kecepatan 1500 rpm dengan kedalaman pin 2,8 mm, menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 170,38 MPa, struktur mikro yang homogen, serta kekerasan maksimum pada zona nugget. Pada kecepatan 910 rpm, pencampuran material berlangsung kurang sempurna akibat panas gesek yang tidak memadai, sedangkan pada 2280 rpm terjadi pertumbuhan butiran yang signifikan akibat masukan panas berlebih (Sumarno & Ilman, 2025).

Penelitian V. Saravanan dkk. berjudul "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints of Dissimilar AA6061-T6 and AA7075-T6 Aluminium Alloys" bertujuan menganalisis pengaruh variasi kecepatan rotasi tool dan kecepatan pengelasan terhadap struktur mikro serta sifat mekanik sambungan FSW dissimilar. Material yang digunakan adalah lembaran AA6061-T6 pada Advancing Side dan AA7075-T6 pada Retreating Side berdimensi 150×75×5 mm, dengan beban aksial tetap sebesar 6 kN. Variasi kecepatan rotasi yang diterapkan meliputi 800, 900, 1000, dan 1100 rpm, dengan dua variasi kecepatan pengelasan yaitu 25 dan 30 mm/menit. Pengujian dilakukan melalui uji tarik mengacu standar ASTM E8M-09 dan uji kekerasan mikro Vickers. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimal diperoleh pada kecepatan rotasi 1000 rpm dengan kecepatan pengelasan 25 mm/menit, menghasilkan kekuatan tarik dan kekerasan tertinggi yang didukung oleh struktur butiran halus pada stir zone serta homogenitas pencampuran material yang baik. Kecepatan rotasi 800 rpm menghasilkan performa terendah akibat pencampuran material yang tidak sempurna, sedangkan kecepatan di atas 1000 rpm menyebabkan penurunan kekuatan tarik dan kekerasan akibat masukan panas berlebih yang memicu pertumbuhan butiran (Saravanan dkk., 2015).

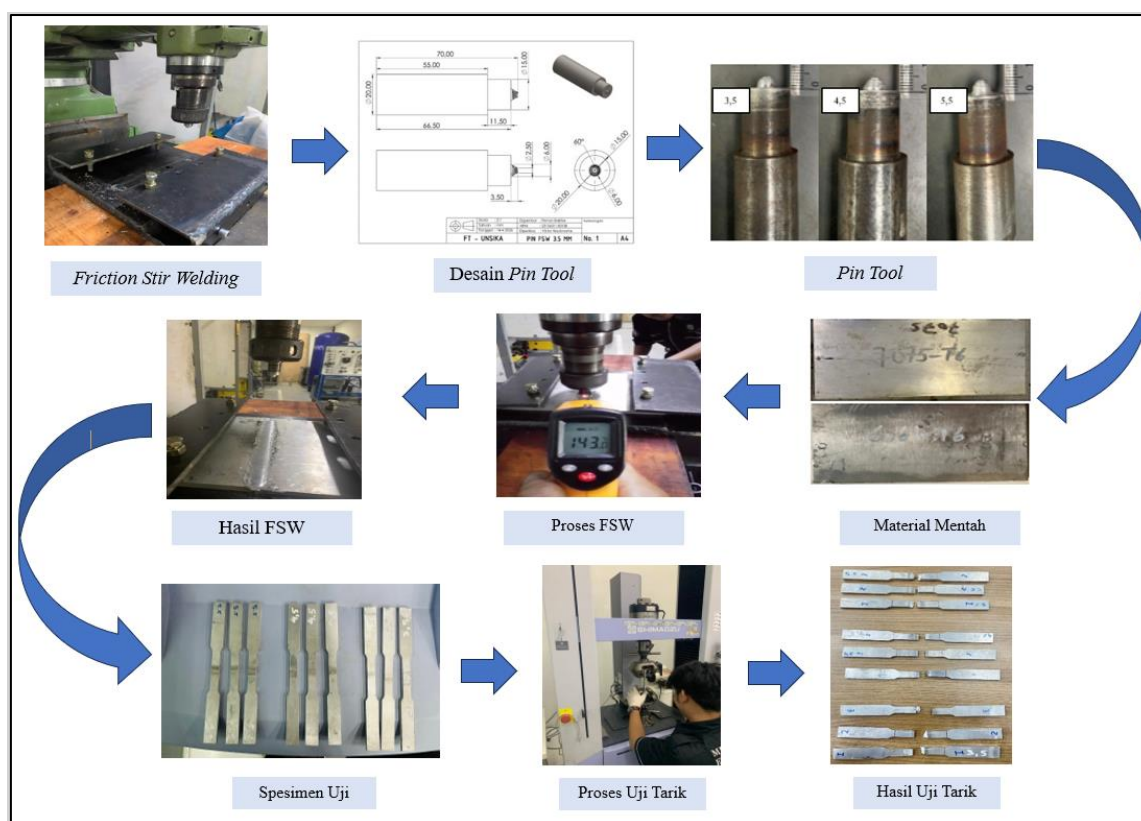
Penelitian Rio Wahyu Prabowo dkk. berjudul "Pengaruh Kedalaman Pin (*Depth Plunge*) Terhadap Kekuatan Tarik Dan Impak Pada Sambungan Las Aluminium 6061 Hasil Pengelasan Double Sided Friction Stir Welding" bertujuan mengetahui pengaruh variasi kedalaman pin terhadap kekuatan tarik dan nilai impak. Parameter yang digunakan meliputi material aluminium 6061 berdimensi 150×100×10 mm, pin silinder berdiameter 8 mm, kecepatan spindel 1640 rpm, dan traverse speed 10 mm/menit, dengan variasi kedalaman pin 3 mm, 5 mm, 7 mm, dan 9 mm. Hasil penelitian menunjukkan kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada kedalaman 5 mm sebesar 59,54 MPa dengan regangan 0,0872%, sedangkan kekuatan impak tertinggi dicapai pada kedalaman 7 mm sebesar 0,18 J. Kedalaman 9 mm menghasilkan performa paling rendah akibat penekanan tool yang berlebihan pada material (Rio wahyu Prabowo, Sarjito Jokosisworo, 2019).

Berdasarkan kajian dari berbagai penelitian terdahulu, penelitian ini mengimplementasikan metode Friction Stir Welding (FSW) pada material dissimilar, yaitu paduan aluminium AA7075-T6 dan AA6061-T6. Proses pengelasan dilakukan dengan parameter tetap berupa kecepatan putaran spindel sebesar 1990 rpm dan kecepatan gerak (traverse speed) 30 mm/menit, tanpa menggunakan sudut kemiringan tool. Variabel utama yang menjadi fokus penelitian adalah kedalaman penetrasi pin, yang divariasikan pada tiga level, yaitu 3,5 mm, 4,5 mm, dan 5,5 mm. Tool yang digunakan

adalah pin berdesain tirus dengan ulir dan diameter ujung (tip) sebesar 2,5 mm. Material uji berukuran $160 \times 100 \times 6$ mm kemudian disambung melalui proses FSW sesuai variabel yang ditentukan. Setelah pengelasan, spesimen disiapkan dan diuji tarik mengacu pada standar ASTM E8/E8M guna memperoleh data kekuatan tarik sambungan. Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk menganalisis sejauh mana pengaruh variasi kedalaman pin terhadap kekuatan tarik dari hasil sambungan las FSW pada material dissimilar tersebut, sehingga diharapkan dapat ditemukan kedalaman optimal yang menghasilkan kualitas sambungan terbaik.

METODE PENELITIAN

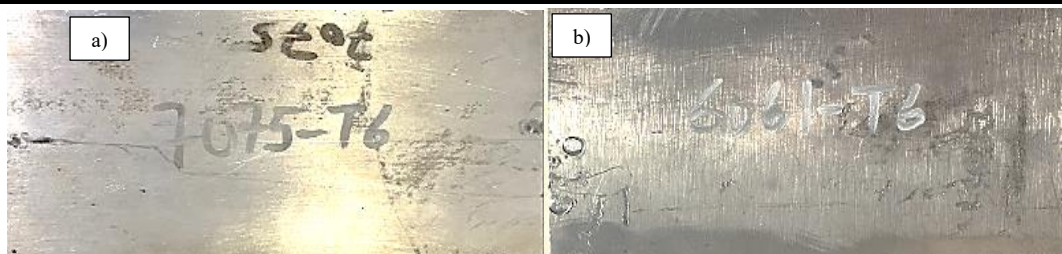
Penelitian dilaksanakan dengan durasi 6 bulan di Laboratorium Fakultas Teknik Universitas Singaperbangsa Karawang, dan pengujian dilaksanakan pada laboratorium PT. Intec Instrument. Metode penelitian disusun guna menetapkan langkah-langkah maupun alur proses yang akan dijalani dalam upaya menjawab persoalan yang menjadi fokus kajian. Meninjau dari Gambar 1, Tahapan diawali dengan penetapan variabel pengelasan, seperti model *pin tool*, tipe *butt joint*, kedalaman pin, serta parameter utama lainnya. Setelah proses FSW berlangsung, benda kerja yang tersambung kemudian dipotong dan dibentuk menjadi specimen uji tarik. Spesimen ini selanjutnya diuji tarik untuk mengukur kekuatannya. Data dari uji tarik tersebut kemudian dikaji guna menilai mutu sambungan dan kekuatan mekanis hasil las.



Gambar 1 Skema Penelitian

Spesifikasi Bahan Uji

Material mentah yang digunakan yaitu berbentuk lembaran dengan ukuran $160 \times 100 \times 6$ mm tiap lembarnya, seperti yang terlihat pada Gambar 2 yaitu a) material mentah AA7075-T6 dan b) material mentah AA6061-T6. Meninjau dari Tabel 1, Tabel 2 menunjukkan sifat mekanik dan Tabel 3, Tabel 4 menunjukan struktur kimia dari material AA7075-T6 dan AA6061-T6, berdasarkan data dari referensi dan lapangan (Kumar Jha dkk., 2022).



Gambar 2 Aluminium a) AA7075-T6, b) AA6061-T6

Tabel 1. Sifat Mekanik AA7075-T6 & AA6061-T6

Material	<i>Ultimate Tensile strenght</i> (Mpa)	Elongasi (%)
AA7075-T6	575	10,5
AA6061-T6	240	18,8

Tabel 2. Struktur Kimia AA7075-T6

Unsur	Persentase (%)
Al	Seimbang
Cr	0,18
Cu	1,4
Fe	0,11
Mn	0,05
Mg	2,5
Zn	4,8
Si	0,25
Ti	0,09

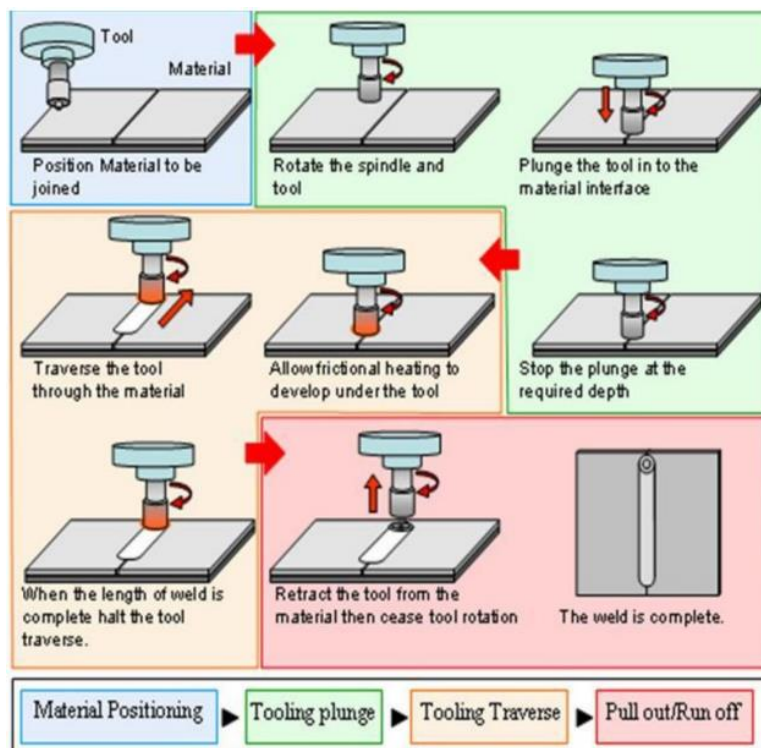
Tabel 3. Komposisi Kimia AA6061-T6

Unsur	Persentase (%)
Al	Seimbang
Cr	0,11
Cu	0,26
Fe	0,58
Mn	0,11
Mg	1,92
Zn	0,09
Si	0,74
Ti	0,07

Proses Friction Stir Welding

Proses pengelasan dilakukan dengan variasi kedalaman pin tool 3,5 mm, 4,5 mm, dan 5,5 mm menggunakan jenis pin tirus berulir, kecepatan spindel 1990 rpm, dan kecepatan pemakanan 30 mm/menit pada mesin milling yang diposisikan vertikal dengan arah pengelasan horizontal. Meninjau dari Gambar 3, proses FSW dimulai ketika tool yang terdiri dari pin dan bahu diputar lalu

ditekan ke garis sambungan dua material yang dijepit pada pelat penopang, dengan AA7075-T6 pada Advancing Side dan AA6061-T6 pada Retreating Side. Gesekan dan deformasi plastis akibat rotasi menghasilkan panas yang melunakkan logam hingga kondisi plastis. Berdasarkan prinsip difusi hukum Fick nonsteady state, putaran tool yang tinggi dengan laju gerak lambat serta kedalaman pin yang optimal memperpanjang pengadukan material, mendorong presipitasi fasa kedua, memecah butiran, dan menghasilkan sambungan yang solid. Tool kemudian diangkat setelah seluruh area menyatu (Callister & Retwisch, 2018) (FSW-TECH ERASMUS, 2017).



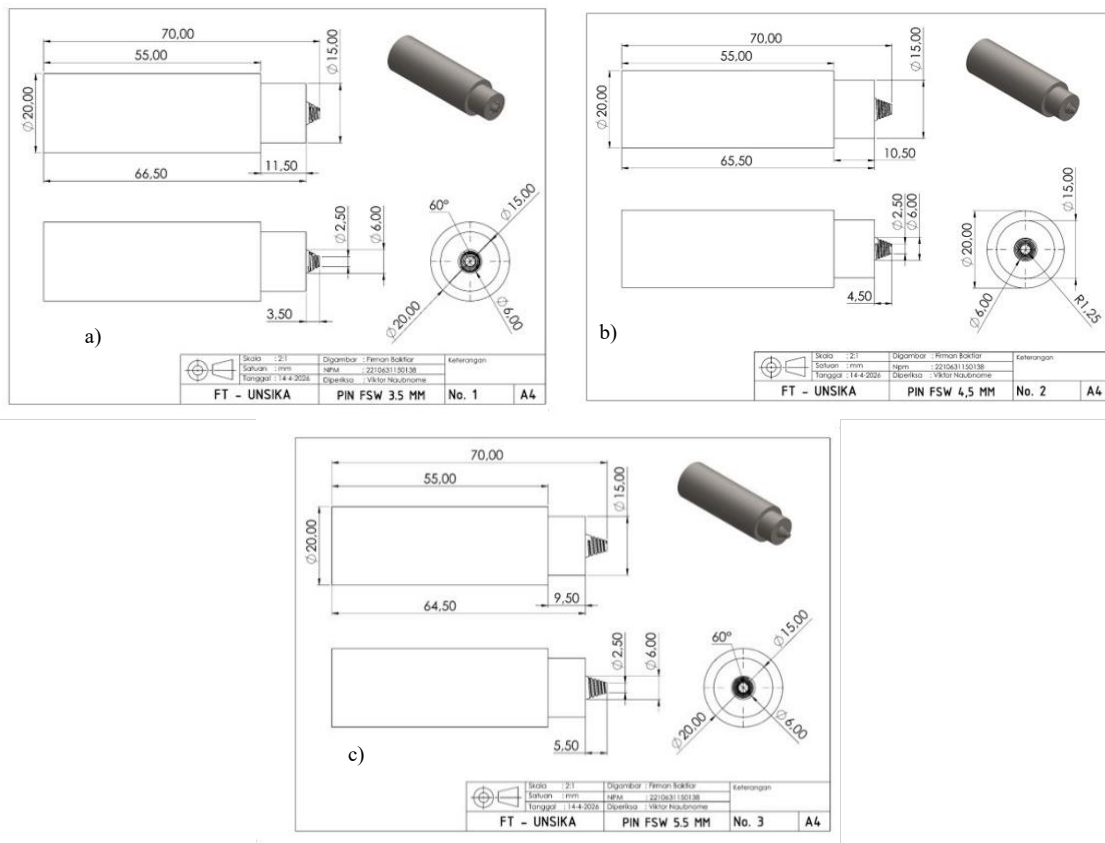
Gambar 3 Skema Proses FSW

Desain Pin Tool

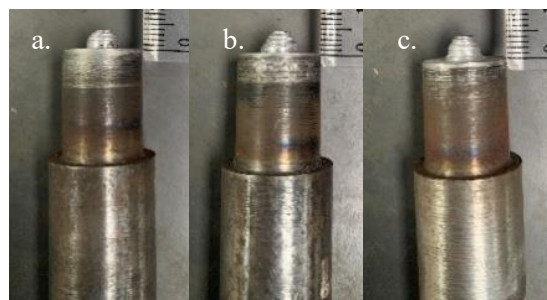
Bentuk dan jenis *pin* memiliki peran penting dalam mengatur arah aliran material serta pembentukan struktur butir di area adukan. Setiap variasi desain *pin* akan memengaruhi cara material bergerak dan menyatu selama proses pengelasan berlangsung. Desain alat dan *pin* diameter bahu/mata pahat, ulir berlekuk atau cekung, fitur pada *pin*, dan panjang *pin* memengaruhi jumlah material yang diolah. Bentuk umum pin yaitu bulat, *paddle* (dayung), segitiga, perbedaan bentuk spiral (*changing spiral form*) dengan ujung pin bulat, *pin* tiga sudut dengan badan pin *spiral* (TWI, 2020). Pada penelitian ini menggunakan jenis *pin* tirus berulir seperti yang terlihat pada Gambar 4 dan 5, dari banyak jenis parameter yang tersedia pada penelitian ini memfokuskan parameter kedalaman *pin*. Setelah penentuan dan pembuatan desain *pin tool*, berikutnya pembuatan *pin tool* dengan menggunakan material mentah SCM440, pemilihan material tersebut meninjau dari material mentah yang akan dilakukan pengelasan, data kekuatan mekanik dan komposisi kimia tersedia pada Tabel 4 dan Tabel 5 (Callister & Retwisch, 2018) (FSW-TECH ERASMUS, 2017).

Tabel 4. Kekuatan Mekanik

Keterangan	Nilai Mekanik
Kekuatan Tarik	985 MPa
Kekuatan Luluh	835 MPa
Regangan	154 KN
Kekerasan	325 HB

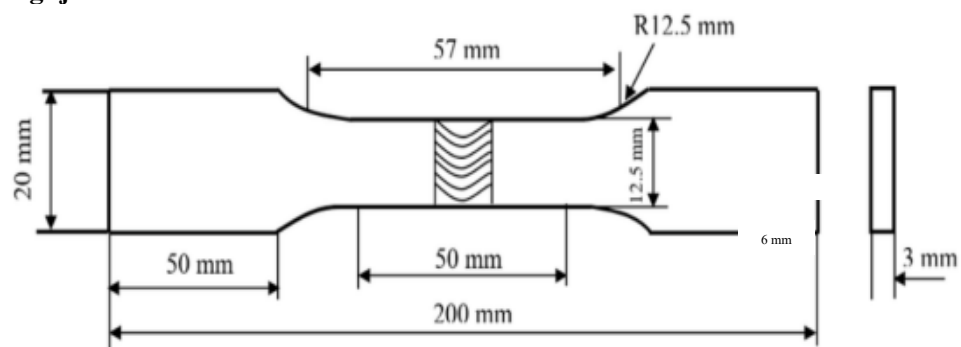


Gambar 4 Gambar Teknik *Pin Tool* a) 3,5 mm, b) 4,5 mm, c) 5,5 mm



Gambar 5 a) *Pin Tool* 3,5 mm, b) *Pin Tool* 4,5 mm, c) *Pin Tool* 5,5 mm

Prosedur Pengujian Tarik



Gambar 6 Dimensi Specimen Uji Tarik ASTM E8



Gambar 7 Spesimen Uji Tarik ASTM E8

Pengujian tarik dilaksanakan mengacu pada standar *ASTM E8/E8M* (Gambar 6 dan 7). Dimensi spesimen tarik ditentukan berdasarkan ketentuan yang ada dalam standar tersebut dengan lebar gauge length 12,5 mm, tebal 6 mm, dan panjang gauge length 50 mm, sehingga luas penampang awal $A_0 = 75 \text{ mm}^2$ (ASTM E8, 2010) (Gusniar dkk., 2022). Spesimen dipotong, diampelas, dan diberi tanda identifikasi sebelum diuji menggunakan mesin uji universal tarik di PT. Intec Instruments.

Rumus Perhitungan

Perhitungan kekuatan luluh dan kekuatan tarik menggunakan persamaan (1):

$$\sigma = F / A_0 \quad (1)$$

Sedangkan regangan dihitung menggunakan persamaan (2):

$$\varepsilon = (L - L_0) / L_0 \times 100\% \quad (2)$$

Dimana σ adalah tegangan (N/mm^2), F adalah gaya tarik (N), A_0 adalah luas penampang awal spesimen (mm^2), ε adalah regangan (%), L adalah panjang akhir spesimen (mm), dan L_0 adalah panjang awal spesimen (mm).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian

Hasil dari proses FSW dapat dilihat pada Gambar 8 bentuk spesimen dari hasil pengelasan, arah pengelasan sesuai dengan arah panah petunjuk didalam gambar:



Gambar 8 a) 3,5 mm, b) 4,5 mm, c) 5,5 mm

Meninjau dari Gambar 8, hasil pengelasan variasi 3,5 mm, memiliki cacat porositi yang berada di awal pengelasan dan di keluar/pengangkatan *tool*, serta terdapat *excessive flash* atau material berlebih di awal pengelasan atau penetrasi masuk. Pada hasil pengelasan variasi 4,5 mm terdapat cacat las *excessive flash* atau material berlebih, dan terlihat penumpukan *slag* material atau *surface irregularity* pada area pengelasan, yang disebabkan oleh pengadukan tidak merata. Hasil pengelasan variasi 5,5 mm terlihat cacat pengelasan *excessive flash* disertai *surface irregularity* atau ketidak teraturan permukaan yang disebabkan oleh kombinasi *welding speed* dan *rotational speed* yang tidak optimal, yang mengakibatkan bisa terciptanya *void* atau rongga di dalam area las. Hasil dari pengujian tarik tersedia pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Tarik

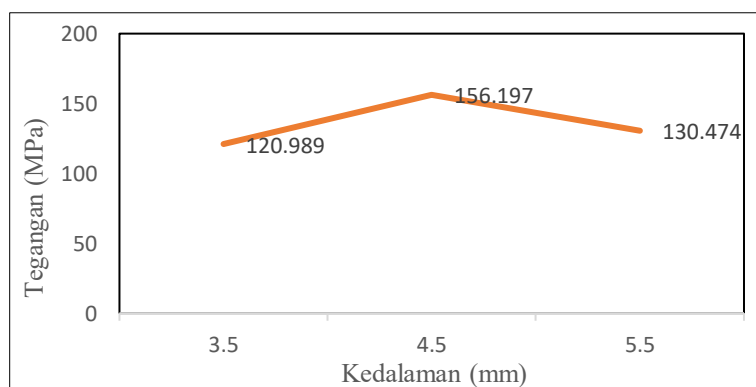
Keterangan	Max Force (kN)	Tensile Strength (MPa)	Elongasi (%)	YS Offset 0,2% (MPa)
3.5	8,438	112,512	3,360	91,506
3.5	9,871	131,617	3,780	115,046
3.5	8,913	118,839	2,480	111,782
Avg (3.5)	9,074	120,989	3,207	106,111
4.5	12,079	161,049	2,240	160,054
4.5	12,193	162,568	5,220	162,413
4.5	10,873	144,973	3,840	133,563
Avg (4.5)	11,715	156,197	3,767	152,010
5.5	10,813	144,179	4,000	143,703
5.5	9,122	121,626	3,820	116,207
5.5	9,421	125,617	3,960	123,130
Avg (5.5)	9,786	130,474	3,927	127,680

Pembahasan

Dari data pengujian tarik, selanjutnya diolah untuk diterapkan ke perhitungan manual guna memvalidasi ulang nilai yang sudah didapatkan dari pengujian tarik, terutama untuk mencari nilai kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan regangan. Tabel 4 menyajikan hasil perhitungan manual dan dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 9.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Manual

Sampel Variasi	Perhitungan	Hasil Perhitungan
3,5 mm	Kekuatan Luluh	$\sigma = F/A_0 = 7958,33 \text{ N} / 75 \text{ mm}^2 = 106,111 \text{ N/mm}^2$
	Kekuatan Tarik	$\sigma = F/A_0 = 9074,18 \text{ N} / 75 \text{ mm}^2 = 120,989 \text{ N/mm}^2$
	Regangan	$\varepsilon = (51,603 - 50) / 50 \times 100\% = 3,20667\%$
4,5 mm	Kekuatan Luluh	$\sigma = F/A_0 = 11400,75 \text{ N} / 75 \text{ mm}^2 = 152,010 \text{ N/mm}^2$
	Kekuatan Tarik	$\sigma = F/A_0 = 11714,78 \text{ N} / 75 \text{ mm}^2 = 156,197 \text{ N/mm}^2$
	Regangan	$\varepsilon = (51,883 - 50) / 50 \times 100\% = 3,76667\%$
5,5 mm	Kekuatan Luluh	$\sigma = F/A_0 = 9576,00 \text{ N} / 75 \text{ mm}^2 = 127,680 \text{ N/mm}^2$
	Kekuatan Tarik	$\sigma = F/A_0 = 9785,55 \text{ N} / 75 \text{ mm}^2 = 130,474 \text{ N/mm}^2$
	Regangan	$\varepsilon = (51,963 - 50) / 50 \times 100\% = 3,92667\%$



Gambar 9 Pengaruh Kedalaman Pin Terhadap Kekuatan Tarik

Gambar 9 Grafik hasil uji tarik menunjukkan bahwa kedalaman penetrasi pin sangat memengaruhi sifat mekanik sambungan FSW. Kedalaman 4,5 mm menghasilkan kekuatan terbaik (tarik 156,197 N/mm², luluh 152,010 N/mm²) karena pin mampu mengaduk seluruh ketebalan material secara optimal tanpa menimbulkan cacat internal. Sebaliknya, kedalaman 3,5 mm terlalu dangkal sehingga menyebabkan pengadukan tidak sempurna di akar las umumnya disebut cacat porositi (*kissing bond/void*), yang menurunkan kekuatan tarik hingga 120,989 N/mm².

KESIMPULAN

Merujuk pada data hasil pengujian tarik yang telah dilaksanakan terhadap sambungan FSW *dissimilar* material AA7075-T6 dan AA6061-T6, maka dapat disimpulkan. Kedalaman *pin* sebesar 4,5 mm terbukti menghasilkan performa sambungan yang paling baik, dengan kekuatan tarik yang dicapai sebesar 156,197 N/mm² serta kekuatan luluh sebesar 152,010 N/mm². Capaian nilai tersebut memperlihatkan bahwa penggunaan kedalaman *pin* 4,5 mm mampu menghasilkan kualitas sambungan dengan sifat mekanik yang lebih unggul jika dibandingkan dengan variasi kedalaman lainnya, sehingga parameter ini layak untuk dijadikan rujukan dalam proses pengelasan FSW kedepannya.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM E8. (2010). ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1. *Annual Book of ASTM Standards 4*, (C), 1–27. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- Callister, W. D., & Retwisch, D. G. (2018). Materials Science and Engineering, an Introduction. Dalam A. Alecci (Ed.), *Wiley* (10 ed., Vol. 10, Nomor 10). Wiley. <https://doi.org/10.1177/030641909402200102>
- FSW-TECH ERASMUS. (2017). Friction Stir Welding Handbook. Dalam *Erasmus+*. <http://www.fsw-tech.eu/>
- Gusniar, I. N., Juhri, A., & Naubnome, V. (2022). Pengaruh Variasi Arus Dan Posisi Pengelasan Smaw Terhadap Sifat Mekanik Sambungan Las Pada Baja ST 37. *Jurnal Masyarakat Sehat Indonesia*, 5(1), 27–30. <https://journal.ypai.org/index.php/jmsi/article/view/1>
- Kumar Jha, K., Kesharwani, R., & Imam, M. (2022). Microstructural and micro-hardness study on the fabricated Al 5083-O/6061-T6/7075-T6 gradient composite component via a novel route of friction stir additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 56, 819–825. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.262>
- Nunes, R., Adams, J. H., & Ammons, M. (1990). ASM Handbook Vol 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Dalam *ASM Internasional* (2 ed.). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02.9781627081627>
- Rahmat, D. A., & Naubnome, V. (2024). Pengaruh Feed Rate Terhadap Uji Kekerasan, Uji Tarik dan Mikro Struktur Pada Aluminium 6061 dengan Metode Friction Stir Welding. *Junral Serambi Engineering*, IX(3), 10034–10041.
- Rajan, T. V., Sharma, C. P., & Sharma, A. (2011). Heat Treatment: Principles and Techniques. Dalam *Encyclopedia of Food and Health* (2 ed.). PHI Learning Private Limited. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00371-8>
- Rio wahyu Prabowo, Sarjito Jokosisworo, B. A. A. (2019). Aluminium 6061 Hasil Pengelasan Double Sided. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 7(4), 294–302. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval> ISSN
- Saravanan, V., Banerjee, N., Amuthakkannan, R., & Rajakumar, S. (2015). Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints of Dissimilar AA6061-T6 and AA7075-T6 Aluminium Alloys. *Applied Mechanics and Materials*, 787, 350–354. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.787.350>
- Sumarno, D. P., & Ilman, M. N. (2025). Microstructures and mechanical properties of friction stir dissimilar AA2024-O/AA6061-T6 welded joints at varying tool rotational speeds. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, 5(1), 268–275. <https://doi.org/10.31603/mesi.13499>
- TWI. (2020). *Functions, designs and materials of Friction Stir Welding tools*. TWI. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/friction-stir-welding-tools>