

Analisis Pengaruh Durasi Gesek *Friction Welding* Terhadap Temperatur dan Kekuatan Tarik Material Batang Akrilik

M. Luqman Hakim¹, Mokh. Hairul Bahri^{1*}, Asroful Abidin¹

¹Universitas Muhammadiyah Jember; mluqmanhkm@gmail.com

¹Universitas Muhammadiyah Jember; mhairulbahri@unmuhjember.ac.id

¹Universitas Muhammadiyah Jember; asrofulabidin@unmuhjember.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.xxxxx/xxxxx>

*Correspondensi: Mokh. Hairul Bahri

Email: mhairulbahri@unmuhjember.ac.id

Published: Januari, 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstrak: Sambungan adalah hasil penyatuan beberapa bagian atau konstruksi dengan menggunakan suatu cara tertentu. Pada umumnya proses penyambungan material berbahan akrilik hanya dengan menggunakan lem perekat yang dioleskan pada permukaan sehingga kekuatan dari sambungan tersebut bertumpu pada lem saja. Sambungan merupakan bagian yang paling lemah, sehingga banyak kegagalan atau kerusakan struktur yang disebabkan oleh gagalnya sambungan. Kekuatan sambungan dapat meningkat melalui metode penyambungan tertentu salah satunya menggunakan metode *friction welding*. *Friction welding* merupakan salah satu metode pengelasan jenis *solid state welding* yang mana tidak diperlukan fase cair untuk penyambungannya. Dalam proses pengelasan ini dapat digunakan berbagai macam material asalkan mempunyai simetri rotasi, batang pejal dan pipa tabung dapat disambung dengan kekuatan sambungan yang baik. Adanya kombinasi antara panas dihasilkan melalui gesekan dan tekanan pada kedua permukaan sehingga kedua material tersambung dengan homogen tanpa membutuhkan *filler*. Parameter pada proses ini yang penting adalah waktu gesekan, tekanan gesekan, waktu tempa, tekanan tempa dan kecepatan putar. Metode pengelasan tersebut dapat diaplikasikan pada penyambungan batang material akrilik akan tetapi masih sangat jarang dilakukan penelitian, agar menghasilkan kekuatan sambungan yang baik, Maka dalam penelitian ini akan mengkaji proses pengelasan *friction welding* terhadap akrilik. Variasi parameter yang digunakan dalam proses pengelasan ini untuk durasi gesek 15, 30, dan 45 detik, kemudian dengan variabel tetap kecepatan putar 600 rpm, tekanan gesek 37,51 kgf/cm², tekanan tempa 75,02 kgf/cm², dan durasi tempa 5 detik. Dari hasil penelitian ini kekuatan tarik terbaik didapatkan pada durasi gesek 30 detik sebesar 49,08 MPa dengan temperatur permukaan 98 °C.

Keywords: *friction welding* ; akrilik ; durasi gesek ; temperatur ; kekuatan tarik

PENDAHULUAN

Proses pembuatan dekorasi akrilik dengan menggunakan lem yang dioleskan di atas permukaan akrilik sehingga kekuatan dari sambungan lemah. Sambungan merupakan bagian yang paling lemah, sehingga banyak kegagalan atau kerusakan struktur yang disebabkan oleh gagalnya sambungan (Basuki, 2015). Oleh karena itu teknik penyambungan sangat berperan untuk mendapatkan struktur yang baik alternatifnya adalah dengan peningkatan peran teknologi pengelasan gesek (*friction welding*) dalam memproduksi dekorasi akrilik.

Dalam *friction welding*, panas yang dibutuhkan dihasilkan melalui gesekan pada permukaan (*interface*) dua komponen yang akan disambung. Setelah kontak yang cukup terjalin, bagian yang berputar dihentikan dengan cepat (sehingga las tidak rusak akibat geser) sedangkan bagian aksial kekuatan meningkat. Tekanan pada antarmuka dan gesekan yang dihasilkan menghasilkan panas yang cukup untuk menghasilkan sambungan

yang kuat. Pengelasan gesekan dapat digunakan untuk menyambung berbagai macam material, asalkan salah satu komponennya mempunyai simetri rotasi. Bagian padat atau berbentuk tabung dapat disambung, dengan kekuatan sambungan yang baik (Kalpakjian, 2023).

Beberapa keuntungan dari *friction welding* ini adalah penghematan material pengisi dan waktu untuk penyambungan dua material yang sama maupun berbeda. Sedangkan parameter proses yang penting adalah waktu gesekan, tekanan gesekan, waktu tempa, tekanan tempa dan kecepatan putar. Pada proses penyambungan ini terjadi proses deformasi plastis akibat tekanan tempa dan terjadi proses difusi karena adanya panas yang tinggi sehingga menghasilkan sambungan yang berkualitas tinggi antara bahan serupa maupun berbeda (Husodo, 2013).

Dalam proses *friction welding* masih sangat jarang dilakukan penelitian terhadap material akrilik. Pada *friction welding* sangat berpengaruh pada kecepatan putar, durasi gesek, tekanan gesek dan tekanan tempa. Variabel-variabel ini sifatnya saling mempengaruhi dan berdampak pada hasil pengelasan. Oleh karena itu dilakukan penelitian untuk mengkaji panas yang ditimbulkan (masukan panas) dan uji kekuatan tarik.

METODE

Material

Akrilik merupakan bahan polimer dengan nama *Polymethyl methacrylate* ($C_5H_8O_2$)_n memiliki modulus elastisitas 2.800 MPa serta kekuatan tarik 55 MPa. Temperatur beku akrilik sekitar 105 °C sedangkan temperatur leleh sekitar 200 °C (Nugraha, 2021). Dalam penelitian ini, material yang digunakan adalah 2 batang akrilik yang masing-masing berdiameter 20 mm dengan panjang 78 mm dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Spesimen

Penyambungan dengan *Friction Welding*

Spesimen awal mempunyai panjang 2.000 mm sebanyak 1 batang, kemudian dipotong menjadi 12 pasang sama panjang. Proses pengelasan menggunakan mesin *friction welding* sebagai berikut :

1. Pembuatan spesimen dipotong menggunakan gergaji, meratakan permukaan dengan mesin bubut dan menghaluskan dengan kertas gosok nomor 500.
2. Pemasangan spesimen pada masing-masing *chuck* di mesin.
3. Pengaturan kecepatan putaran 600 rpm.
4. Mesin dinyalakan hingga putaran stabil/konstan.
5. Pemberian tekanan gesek sebesar 37,51 kgf/cm² dengan durasi waktu bervariasi yaitu 15, 30, dan 45 detik. Ketika proses *friction* dilakukan maka masing- masing spesimen mengalami *upset* awal pada kedua permukaan yang disambung.
6. Setelah waktu yang ditentukan tercapai, lalu mesin *friction welding* dihentikan dan kemudian dilakukan proses tempa dengan tekanan sebesar 75,02 kgf/cm² selama 5 detik. Selanjutnya spesimen didinginkan dengan media udara pada temperatur ruangan.
7. Pelepasan specimen dari mesin, lakukan pengelasan sebanyak 3 kali pada masing- masing variasi durasi waktu.

8. Pengecekan hasil las penyambungan dari metode *friction welding*.

Penyambungan dengan Lem Perekat

Penyambungan ini menggunakan jenis lem *epoxy* yang memiliki kekuatan tahan lama dan tahan air. Lem tersebut digunakan untuk mengikat material bermacam-macam material seperti kayu, logam, dan bahan plastik. Kekuatan tarik hasil penyambungan dengan lem ini bisa mencapai lebih dari 20 MPa. Waktu optimal untuk mencapai hasil sambungan yang optimal yaitu lebih dari 3 jam.

Peralatan dan Pengujian Tarik

Peralatan dan alat uji yang digunakan untuk penelitian ini antara lain :

Mesin Las esek (*Friction Welding*)

Alat ini pada gambar 2 sebagai inti dari penelitian yaitu untuk menyambungkan kedua buah spesimen. Di Indonesia mesin *friction welding* dengan operasional yang otomatis sangat jarang ditemui. Maka digunakan mesin bubut yang telah dimodifikasi menjadi mesin *friction welding*, dimana kepala lepas dimodifikasi untuk pemasangan *non-rotating chuck* sebagai pencekam dilengkapi dengan pendorong hidrolik sebagai fungsi tekanan gesek dan tempa pada proses pengelasan. Spesifikasi hidrolik memiliki diameter piston 50 mm, diameter rod 28 mm, stroke 300 mm, dan tekanan maksimal 80 kgf/cm².



Gambar 2. Mesin *friction welding*

Infrared Thermograph

Infrared Thermograph pada gambar 3 untuk digunakan mengambil data temperatur pada kontak *interface* material pada saat proses pengelasan. Alat ini mampu digunakan untuk mengukur temperatur tanpa harus bersentuhan langsung dengan benda kerja yang akan diukur suhunya dengan cara menekan tombol *Measurement trigger* yang terdapat pada alat tersebut.



Gambar 3. *Infrared thermograph*

Pengujian Tarik (*Tensile Test*)

Setelah dilakukan pengelasan gesek, semua spesimen diukur kekuatan tarik hasil lasan tersebut. Standar yang digunakan yaitu ASTM D638-02, pengujian dilakukan pada suhu ruang dengan

menggunakan *Universal Testing Machine* seperti pada gambar 4 model UH-300kNX kapasitas 300 kN dan kecepatan 5 mm/min.

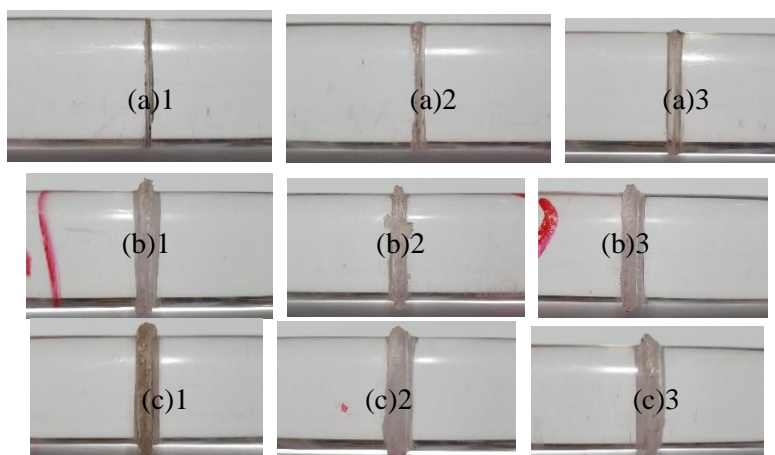


Gambar 4. Mesin uji tarik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Karakteristik Spesimen

Pada gambar 5 menunjukkan spesimen dalam bermacam-macam variabel durasi waktu, masing-masing variabel dilakukan pengulangan percobaan sebanyak 3 kali. Seperti gambar yang terlihat spesimen dapat sempurna tersambung satu dengan yg lain tanpa adanya cacat. Setelah dilakukan metode pengelasan *friction welding* karakteristik fisik spesimen di zona las berubah menjadi *flash* (tampak putih buram). Karena masukan panas dari gesekan membuat bahan melunak dan terbentuknya *flash* di permukaan spesimen yang saling bergesekan. Gambar 5 (a,b,c) menunjukkan durasi waktu pengelasan yaitu 15, 30 dan 45 detik, hal ini menunjukkan bahwa pengelasan *thermal* menghasilkan *flash*. Namun, perhatikan volume *flash* dan plastik meleleh yang dihasilkan pada masing-masing spesimen berbeda. Volume *flash* dan plastik meleleh pada durasi waktu 15 detik pengelasan mempunyai jumlah yang sedikit bahkan hampir tidak ada, hal ini menunjukkan bahwa masukan panas yang sedikit pula pada Gambar 5 (a)1, 2, dan 3. Pada durasi waktu 30 detik ditemukan bahwa masukan panas cukup untuk membentuk *flash* dan plastik yang meleleh lebih tinggi hal ini ditunjukkan pada Gambar 5 (b)1, 2, dan 3. Akan tetapi peningkatan durasi waktu pengelasan menjadi 45 detik mengalami penurunan *flash*, masukan panas yang tinggi menyebabkan pelunakan tekstur spesimen sehingga ditemukan adanya plastik yang benar-benar meleleh (lumer) ditunjukkan pada Gambar 5 (c)1, 2, dan 3.



Gambar 5. Hasil sambungan dari specimen pada durasi waktu (a) 15 detik, (b) 30 detik, dan (c) 45 detik.

Upset dan Temperatur Spesimen Friction Welding

Spesimen yang bergesekan akan mengalami keausan, namun pada pengelasan berikut ini disebut sebagai *upset* yaitu berkurangnya panjang spesimen setelah proses pengelasan gesek. Hasil penyambungan spesimen metode *friction welding* menghasilkan *upset* atau pengurangan panjang yang berbeda-beda akibat dari variasi durasi waktu gesekan, hal tersebut dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengukuran *upset* dan temperatur

No. Percobaan	Durasi Waktu (detik)	Upset (mm)	Average (mm)	Suhu (C)	Average (C)
1		1,0		72	
2	15	1,0	0,9	64	65,33
3		0,7		60	
1		3,0		95	
2	30	3,2	2,7	99	98,00
3		2,0		100	
1		3,5		90	
2	45	4,0	3,8	88	87,67
3		4,0		85	

Telah ditunjukkan pada tabel 1 bahwa semakin lama durasi waktu pengelasan gesek *upset* cenderung mengalami kenaikan. Nilai *upset* terendah ditunjukkan pada durasi waktu 15 detik yaitu sebesar 0,9 mm, kemudian diikuti *upset* sebesar 2,7 mm dengan durasi waktu 30 detik. Nilai *upset* tertinggi terletak pada durasi waktu 45 detik sebesar 3,8 mm. *Upset* terjadi karena pergerakan volume meleleh yang disebabkan oleh panas akibat gesekan selama durasi waktu tertentu sehingga material terekstrusi dimana volume tersebut menjadi *flash* dan beberapa plastik yang meleleh di zona las. Semakin tinggi panas yang dihasilkan oleh gesekan maka semakin besar *upset* yang terjadi.

Pada tabel 1 terdapat pula hasil pengukuran temperatur pada masing-masing variasi durasi waktu gesek, terlihat bahwa untuk durasi waktu gesek 15 dan 30 detik mengalami *trenline* kenaikan karena spesimen yang awalnya pada suhu ruang bergesekan satu dengan yang lain. Gaya gesek akan berubah menjadi energi panas pada waktu tertentu, hingga energi tersebut dapat melelehkan spesimen. Setelah spesimen meleleh temperatur pada permukaan lelehan menurun disertai penambahan jarak *upset* terlihat pada variasi durasi waktu gesek 45 detik.

Hasil Uji Tarik Spesimen



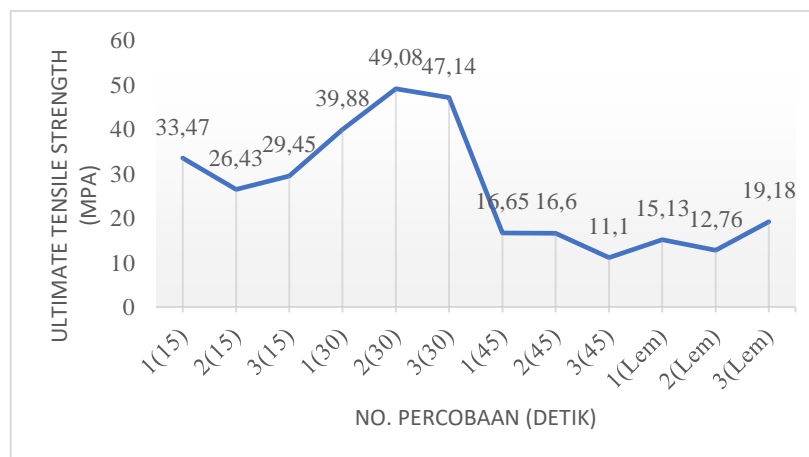
Gambar 6. Spesimen uji kekuatan tarik.

Semua spesimen pada gambar 6 telah distandarkan menggunakan standar ASTM D638-02 lalu diuji untuk mengetahui kekuatannya. Hasil uji tarik dari masing-masing sambungan las berbeda kondisi hal ini tampak pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji tarik

No. Percobaan	Durasi Waktu (detik)	UTS (MPa)	Average (MPa)	Daerah Patahan
1	15	33,47	29,78	Interface
2		26,43		Interface
3		29,45		Interface
1	30	39,88	45,37	Interface
2		49,08		Interface
3		47,14		Interface
1	45	16,65	14,78	Interface
2		16,60		Interface
3		11,10		Interface
1	Lem	15,13	15,69	Interface
2		12,76		Interface
3		19,18		Interface

Dari tabel 2 diketahui bahwa pengaplikasian variasi durasi waktu gesek yang diberikan pada proses pengelasan gesek berpengaruh terhadap sifat mekanik kekuatan tarik dari material akrilik. Variasi durasi waktu gesek yang diberikan sebesar 15, 30, dan 45 detik memiliki hasil kekuatan tarik berbeda-beda, akan tetapi hasil daerah patahan pada spesimen sama yaitu di pemukaannya atau *interface*. Kekuatan tarik rata-rata yang paling besar adalah 45,37 MPa dimana hasil tersebut dilakukan saat pengelasan gesek dengan menggunakan variasi durasi waktu gesek sebesar 30 detik.



Grafik 1. Kekuatan tarik sambungan akrilik

Semakin lama durasi waktu gesek yang diberikan terhadap spesimen maka kekuatan tarik yang dihasilkan lebih rendah dapat diketahui pada grafik 1, dikarenakan mengalami deformasi plastis dan terbentuknya rongga dengan mudah. Material akrilik yang menerima panas tinggi saat pengelasan, setelah pengelasan spesimen menjadi rapuh. Itu ditunjukkan pada durasi waktu gesek 45 detik yang memiliki kekuatan tarik rata-rata sebesar 14,78 MPa. Hasil yang hampir sama terjadi pada penyambungan spesimen menggunakan lem perekat terdapat peningkatan kekuatan tarik tetapi tidak signifikan menjadi sebesar 15,69 MPa. Penurunan durasi waktu gesek menjadi 15 dan 30 detik menghasilkan kekuatan tarik yang meningkat karena masukan panas yang lebih rendah selama pengelasan. Namun, hasil kekuatan tarik dari berbagai macam durasi waktu gesek lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai dasar kekuatan tarik akrilik sebesar 55 MPa. Kekuatan tarik pada spesimen bergantung pada zona las dan masukan panas yang mencapai suhu rekristalisasi. Selama proses pengelasan gesek mencapai suhu rekristalisasi, akan terdapat pori-pori atau rongga pada sambungan karena masuknya udara.

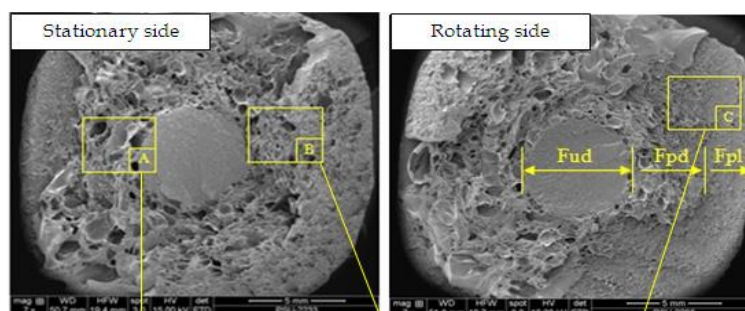
Hasil Patahan Spesimen

Pada material akrilik ikatan-ikatan molekul akan berubah setelah mengalami penyambungan dengan metode *friction welding* akibat gesekan dan panas yang ditimbulkan, sehingga permukaan patahan spesimen setelah dilakukan uji kekuatan tarik memiliki struktur tertentu. Gambar 7 menunjukkan permukaan patahan di masing-masing variasi durasi waktu gesek yang berbeda.



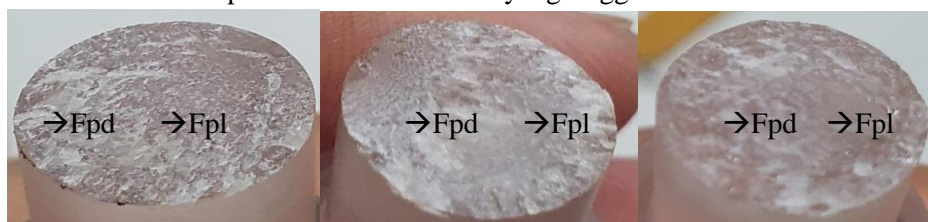
Gambar 7. Permukaan patahan spesimen dengan durasi waktu gesek 15, 30, dan 45 detik.

Tensile morphology yang telah dilakukan peneliti Suppachai Chainarong, et al. dapat dilihat pada Gambar 8 dengan metode penyambungan pengelasan gesek material akrilik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa patahan morfologi permukaan akrilik yang dilas dapat dibagi menjadi tiga zona, seperti *central zone* (Fud), *middle section* (Fpd), dan *peripheral zone* (Fpl). Zona Fud merupakan bagian yang lebih sedikit panas dari gesekan dan tidak terikat bersama dengan sangat baik. Sementara itu zona Fpd merupakan bagian yang langsung menerima masukan panas dari peningkatan gesekan karena putaran menjauhi pusat untuk meningkatkan ikatan adhesi. Zona Fpl merupakan bagian yang paling banyak menerima masukan panas dari gesekan antara kedua permukaan material tersebut sehingga terbentuk tumpukan plastik.



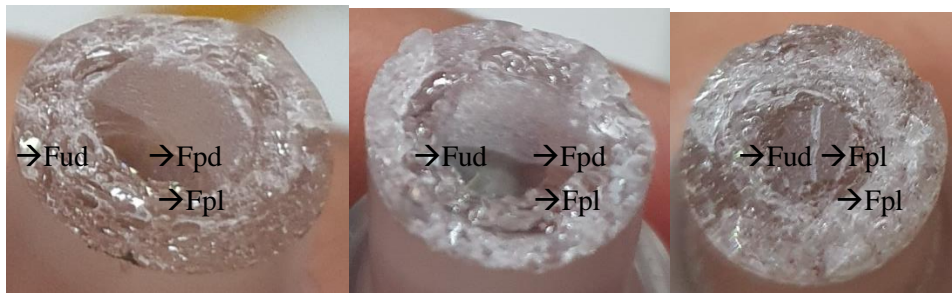
Gambar 8. Tiga bagian struktur material akrilik dalam *tensile morphology*.

Penyebab terjadinya zona Fud karena pada titik pusat tersebut paling sedikit menerima gesekan dimana hanya sampai terjadi keausan sedangkan pada zona Fpd dan Fpl keausan karena gesekan yang didapat sangat besar sehingga mampu membangkitkan panas. Hal ini terjadi karena semakin kecil jari-jari lingkaran hingga ke pusat titik putar hanya menerima sedikit gesekan. Kekuatan tarik tertinggi terdapat pada 49,08 MPa durasi waktu gesek 30 detik dimana terdapat zona Fpd dan Fpl pada spesimen, ditunjukkan pada Gambar 9. Setelah mengamati hasil patahan permukaan tersebut tidak ditemukannya zona Fud. Pada permukaan tersebut banyak ditemui gelombang-gelombang di area luar dari pusat dan titik-titik pada sekitar pusat. Hal ini yang menjadi perhatian dan akibat untuk mencapai nilai kekuatan tarik yang tinggi.



Gambar 9. Permukaan patahan spesimen nomor percobaan 1, 2, dan 3 dengan durasi waktu gesek 30 detik.

Hasil yang berbeda ditemukan pada permukaan patahan hasil uji kekuatan tarik variasi durasi waktu gesek 45 detik, ditemukannya dengan jelas zona Fud ditunjukkan dalam Gambar 10. Terdapat pula rongga-rongga udara yang tampak jelas terjebak pada zona Fpd dan Fpl. Rongga-rongga udara terbentuk karena masukan panas yang tinggi dari durasi waktu gesek yang lebih lama pada permukaan sambungan las. Plastik menjadi lebih cair yang memungkinkan lebih banyak udara yang terperangkap di dalamnya. Lalu, rantai molekul juga dihancurkan oleh gaya gesek. Inilah yang melemahkan sifat mekanik material akrilik dengan variasi durasi gesek 45 detik terendah hanya 11,10 MPa.



Gambar 10. Permukaan patahan spesimen nomor percobaan 1, 2, dan 3 dengan durasi waktu gesek 45 detik.

Pada proses *friction welding* untuk mendapatkan sambungan yang homogen saat tahap pemanasan diharapkan mampu membangkitkan panas yang bisa terdistribusi dengan baik kemudian saat proses pendinginan dilakukan tahap penekanan tempa untuk menahan penurunan temperatur lebih lambat agar memberi kesempatan ikatan-ikatan molekul pada *interface* bisa menyesuaikan ikatan yang kuat sebelum mendingin.

SIMPULAN

Dalam penelitian ini menganalisa penerapan *friction welding* untuk menyambung kedua material batang akrilik yang menggunakan durasi waktu gesek yang berbeda. Terlihat bahwa pemilihan parameter ini penting karena mempengaruhi sifat mekanik spesimen. Masukan panas hasil rekristalisasi pada zona pengelasan dan rantai molekul dihancurkan oleh gaya gesek sehingga menjadikan getas. Kondisi optimum penyambungan pada durasi waktu gesek 30 detik dengan temperatur 98 °C mampu menghasilkan kekuatan tarik sebesar 49,08 MPa. Namun durasi waktu gesek pengelasan 45 detik mampu memberikan kekuatan tarik terendah sebesar 11,10 MPa. Selain itu, kekuatan tarik sangat bergantung pada jumlah udara yang terperangkap dan rongga.

DAFTAR PUSTAKA

- Kalpakjian, Serope and Steven R. Schmid (2023) 'Manufacturing Engineering and Technology Eighth Edition in SI Units', *Pearson Education Limited*.
- Spindler, D. E. (1994) 'What Industry Needs to Know about Friction Welding', *Welding Journal*.
- Berins, Michael L. (2000) 'SPI Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry Inc., 5th ed Society of the Plastics Industry', *Michigan, Amerika Serikat*.
- Nugraha, Noviyanti et al. (2021) 'Rancang Bangun Mesin Pemanas Akrilik Tipe Turbular Skala Industri Kecil', *METAL: Jurnal Sistem Mekanik dan Termal*, Padang: UNAND.
- Surdia, T., Shinroku S. (1995) 'Pengetahuan Bahan Teknik', *Jakarta: Pradnya Paramita*.

A. Miftahul, and Kaelani Yusuf (2017) 'Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Kecepatan Putar Terhadap Temperatur dan Tensile Strength pada Friction Welding dengan Material High-Density Polyethylene', *Jurnal Teknik ITS*, vol. 6, no. 2, ISSN 2337-3539.

F. Alfian, W. Angelia H. A., As'adi H. and Husodo Nur (2014) 'Mesin Roll Bending Plat Akrilik', *Jurnal Program Studi D3 Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya Disnakertransduk Prov. Jawa Timur*.

Chainarong Suppachai, Meengam Chaiyoot and Boonseng Kulyuth (2015) 'Effect of Friction Welding on Tensile Strength of Polymethyl Methacrylate (PMMA) by Computerized Numerical Control Machine', *Journal, Songkhla Rajabhat University, KRU Res.j.; 20(1) : 42-53*.

Aditya, Dewangga (2018) 'Studi Eksperimen Pengaruh Tekanan Aksial pada Direct-Drive Friction Welding Terhadap Temperatur dan Tensile Strength dengan Material Polimer Polypropylene', *Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.

Husodo Nur, et al. (2013) 'Penerapan Teknologi Las Gesek (Friction Welding) dalam Rangka Penyambungan Dua Buah Logam Baja Karbon St41 pada Produk Back Spring Pin', *Jurnal Energi dan Manufaktur* Vol.6, No.1, 1-94.

Basuki Achmad, et al. (2015) 'Sambungan Batang Tekan dan Momen Lentur *Laminated Veneer Lumber* (LVL) Kayu Sengon (*Paraserianthes Falcataria*) dengan Alat Pengencang Baut', *e-Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 59-64.

Loock F. Van and Fleck N. A. (2018) 'Deformation and Failure Maps for PMMA in Uniaxial Tension', *Engineering Department, Cambridge University, Trumpington Street, Cambridge CB2 1PZ, United Kingdom*.

Jaiganesh V. (2018) 'An Investigation of Process Parameters of Acrylic polymer using Friction Stir Welding', *Professor, Department of Mechanical Engineering, Genba Sopanrao Moze College of Engineering, Balewadi, Pune., Maharastra, INDIA*.

Grewell D. and Benatar A. (2007) 'Welding of Plastic: Fundamentals and New Developments' Review Article, *Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa State University, Ames, IA, USA*.

Lin C. B. and Wu Li Cheng (2000) 'Friction Welding of Similar and Dissimilar Materials: PMMA and PVC', *Polymer Engineering and Science*, ISSN 0032-3888