

Pengaruh Bentuk Pin Tool Terhadap Kekuatan Mekanik Pada Pengelasan Friction Stir Welding High Density Polyethylene (HDPE)

Fairuz Jian^a, Aris Widyo Nugroho^b, Muhammad Budi Nur Rahman^c

^aUNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA

Jl. Brawijaya, Kasihan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta
+62 853 2022 3320
e-mail: fairuzjian1996@gmail.com

^bUNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA

Jl. Brawijaya, Kasihan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta
+62 856 4336 1829
e-mail: ariswn70@gmail.com

Abstract

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh bentuk pin tool terhadap kekuatan mekanik pada pengelasan friction stir welding menggunakan high density polyethylene (HDPE). Menggunakan lembaran HDPE dengan dimensi ketebalan 5mm, lebar 80mm dan panjang 100mm.

Pengelasan dilakukan dengan kecepatan putaran 1560 rpm, kecepatan pengelasan 14 mm/menit, dept of plunge sekitar 0,5mm dan variasi bentuk pin tool yang terbagi menjadi dua kelompok yakni diameter 3mm dan 4mm, keduanya memiliki tiga bentuk pin tool yakni silinder, silinder ulir dan segitiga. Penelitian ini menggunakan tiga pengujian yaitu pengujian struktur makro, kekuatan tarik dan kekerasan terhadap hasil lasan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bentuk pin tool silinder ulir berukuran 3mm merupakan hasil yang terbaik dimana pada hasil lasan struktur makronya terlihat tidak terdapat cacat dan menghasilkan permukaan yang rata serta hasil yang konstan pada semua daerah proses pengelasan. Nilai kekerasan didapat dengan nilai sebesar 41,47 HRH sedangkan bahan dasar sebesar 54,77 HRH, bisa diartikan bahwa nilai kekerasan sambungan yang tertinggi sekitar 75% dari bahan dasarnya. Pada uji kuat tarik nilai tegangan maksimum mencapai 17,3 MPa dengan nilai regangan 5,8%. Sedangkan tegangan pada bahan dasar sebesar 25,9 MPa dan regangan senilai 13%. Bentuk pin tool yang direkomendasikan berdasarkan hasil penelitian ini adalah silinder ulir berdiameter 3mm, karena memiliki hasil permukaan dan sifat mekanik yang baik.

Keywords: *pin tool, friction stir welding, high density polyethylene, dept of plunge.*

1. PENDAHULUAN

Dewasa ini plastik sebagai bahan atau material baru yang cukup familier dengan kehidupan manusia di bumi sekarang. Pemakaiannya tidak hanya untuk alat-alat sederhana, melainkan juga alat-alat yang terbilang lumayan kompleks. Bahkan sekarang ini penggunaan plastik sudah banyak diterapkan di dunia industri. Lebih dari itu plastik pada mulanya hanyalah bahan yang biasa saja, tidak ada yang menduga jika plastik dan isomer-isomer lainnya akan berpeluang besar menggantikan material logam sebagai bahan yang paling dominan dipakai di masa ini.

High density polyethylene (HDPE) merupakan salah satu polimer yang populer karena ketersediaan dan kompetitifnya biaya dan merupakan material termoplastik dengan konduktivitas termal rendah, titik leleh yang rendah serta kekerasan yang rendah. Dengan semakin meningkatnya perkembangan plastik rekayasa saat ini, permintaan untuk handal, cepat, produktivitas tinggi dan biaya yang efektif pada metode penyambungan juga meningkat.

Dalam kasus menciptakan sambungan dengan efisiensi tinggi (rasio kekuatan sambungan terhadap kekuatan material dasar) antara metode penyambungan yang ada saat ini pengelasan merupakan pilihan terbaik (Kiss dan Czygany, 2007; Arici dan Sinmaz, 2005). Pengelasan adalah proses penyambungan dua material yang salah satunya dipanaskan sampai cair sampai terjadi ikatan metalurgi antara dua material tersebut. Biasanya dilakukan pada material termoplastik.

Semua teknik pengelasan plastik terdiri dari tiga macam tahap : (a) pembentukan lapisan bahan cair pada permukaan untuk menjadi sambungan, (b) pembentukan ikatan dengan penerapan tekanan, (c) lelehan dibiarkan dingin, dan pada tahap ini tekanan harus dijaga agar tidak terbentuk rongga di dalam zona las (Strand, 2003). Tahap terakhir merupakan tahap yang paling signifikan dan tambahan perhatian harus dilakukan untuk mencapai lasan berkualitas tinggi (Mostafapour dan Azarsa, 2012).

Untuk polimer termoplastik seperti polyethylene atau polypropilene, pengelasan friction stir welding (FSW) adalah proses yang efisien untuk menghasilkan sambungan las yang continued dengan cepat dan efisien (Shaikh et al., 2012) apalagi di Indonesia sangat jarang dengan adanya perekat yang diperuntukan material berbasah dasar polyethylene (PE), hal itu juga yang mendasari kenapa penelitian tentang pengelasan FSW pada HDPE perlu dilakukan. Awalnya FSW diperuntukan untuk aluminium pada tahun 1991 yang telah dipatenkan oleh the welding institute (TWI), namun FSW telah dipindah gunakan untuk termoplastik pada awal tahun 2000an. Dalam beberapa tahun terakhir, banyak usaha dilakukan untuk menyelidiki kemampuan las dari HDPE menggunakan proses FSW.

Kiss dan Czigány (2007) meneliti tentang kondisi dan kemungkinan penerapan friction stir welding untuk berbagai bahan polimer. Penerapan pengelasan dilakukan pada bahan polypropylene. Material disiapkan dengan menggunakan berbagai parameter pengelasan dan propertinya diselidiki dengan uji tensile, DCS, optical dan scanning electron microscopy. Hasilnya, terbukti teknologi FSW bisa diaplikasikan pada kondisi praktis, namun optimalisasi teknologi parameter dan tool geometri masih perlu banyak perbaikan. Hal itu menunjukkan bahwa distribusi alur yang lebih padat memberikan hasil yang lebih baik dalam kondisi pengelasan daripada tool dengan kemiringan alur bawah.

Adapun prinsip kerja FSW adalah memanfaatkan gesekan dari alat yang berputar dengan dilengkapi silinder yang menonjol (pin) serta silinder luar yang lebih besar (shoulder) yang jatuh di antar muka dua benda kerja yang dirapatkan antar sisinya sehingga membentuk garis las yang terkunci diam. Shoulder merupakan sumber utama pembangkit panas bila dibandingkan dengan panas yang dihasilkan oleh pin tool, deformasi geser yang terjadi disekitar pin tool memberikan efek termal yang diperlukan untuk melakukan proses FSW (Rezgui et al., 2011).

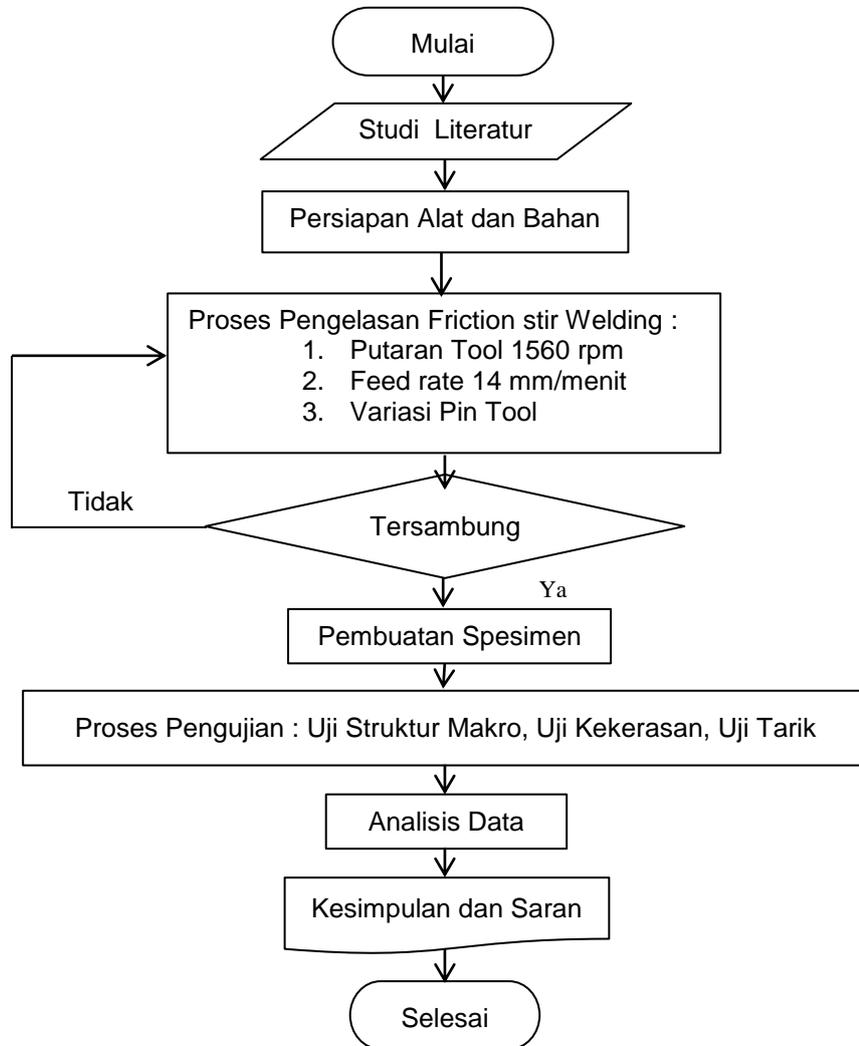
Dari beberapa penelitian FSW pada polimer yang ditinjau ditemukan bahwa belum banyaknya penelitian yang menggunakan parameter bentuk pin tool sebagai topik utama penelitian. Squeo dkk. (2009) meneliti tentang friction stir welding pada lembaran poliethylene. Dalam proses set up jarak minimum sekitar 0,2 mm antara permukaan pin dan permukaan bawah sempelnya, kecepatan rotasi pin antara 3000 dan 20.000 rpm, laju pengelasan antara 10 dan 40 mm/menit, diameter pin antara 1 dan 3 mm. Hasilnya, dalam hal bentuk pin tool, pin tool yang lebih besar yang terdapat hasil buruk pada lasan, kekuatan tertinggi sekitar 10 MPa, sedangkan bahan dasar mencapai 23 MPa. Dari penelitian Squeo dkk. Salah satu parameter yang mereka gunakan adalah bentuk pin tool, mereka menggunakan variasi diameter pin.

Bentuk pin tool merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi hasil lasan pada proses FSW, seperti struktur makro dan sifat mekanik pada sambungan las. Oleh karena itu, tujuan utama dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh bentuk pin tool terhadap kekuatan mekanik pada pengelasan friction stir welding dengan menggunakan benda kerja polimer high density polyethylene (HDPE) dengan ketebalan 5mm, lebar 80mm dan panjang 100mm. Selanjutnya dilakukan pengujian sifat mekanik pada hasil lasan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Diagram Alir

Pada penelitian ini memiliki beberapa langkah yang dilakukan. Adapun langkah-langkah dalam proses penelitian dapat dilihat pada Gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

2.2 Bahan Penelitian dan Tool Desain

2.2.1 Bahan Dasar



Gambar 2 HDPE Sheet

Bahan dasar yang digunakan untuk penyambungan pada penelitian ini adalah material polimer termoplastik yakni lembaran *high density polyethylene* (HDPE) dengan ketebalan 5 mm, lebar 80mm dan panjang 100mm seperti pada Gambar 2. Adapun sifat fisik dan kimia HDPE terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Sifat Fisik dan Kimia Polietilen HDPE

No.	Sifat	Nilai
1	Unjuk kerja suhu dingin	Baik
2	Berat jenis ASTM D 792	0,94 – 0,96
3	Kuat dampak ASTM D 256 (J/12 mm)	1,02 – 8,15
4	Kuat tensile ASTM D 638, D 651 (MN m ^o)	21,4 – 38
5	Elongasi tegangan ASTM D 638 (%)	50 - 800
6	Modulus elastisitas tegangan ASTM D 747 (MN m ^o x 10 ^o)	5,53 – 10,4
7	Kuat flexural ASTM D 790 (MN m ^o)	13,8 – 20,3
8	Kuat kompresif ASTM D 695 (MN m ^o)	16,5
9	Tetapan dielektrik ASTM D 150 (10 ^o Hz)	2,25 – 2,35
10	Muai termal ASTM D 696 (mm mm' °C x 10 ^o)	11 - 13
11	Kalor jenis (k) kg')	2,22 – 2,3
12	Titik leleh (lunak (°C)	120 - 130

2.2.2 Pin Tool

Pin tool adalah sebuah alat yang dilengkapi dengan silinder yang menonjol yang disebut pin dengan silinder luar lebih besar yang disebut shoulder yang digunakan untuk mengaduk dua material sehingga tersambung. Pada penelitian ini menggunakan tiga bentuk pin tool yang berbeda (silinder, segitiga dan silinder) dan dua diameter pin yang berbeda (4 mm & 3 mm). Seperti yang terlihat pada Gambar 3 dibawah ini dan pada Gambar 4 menunjukkan Gambar teknik dari tiap-tiap pin tool.

Pada penelitian ini dipilih bahan baja ST 42 Baja karbon rendah sebagai material utama pembuatan tool. Selanjutnya pembuatan desain tool dengan menggunakan software Autodesk Inventor 2017 seperti yang terlihat pada Gambar 4 kemudian diproses di Jasatec untuk proses pembuatan. Tool dibuat dengan tiga variasi bentuk berbeda (silinder, segitiga dan silinder berulir) dan dua variasi diameter pin yang berbeda(4 mm dan 3 mm). Adapun dimensi tool bisa dilihat pada Gambar pada bagian shoulder sengaja dibuat panjang berguna sebagai tindakan antisipasi ketika ada kerusakan pada pin ketika proses pengelasan berlangsung.

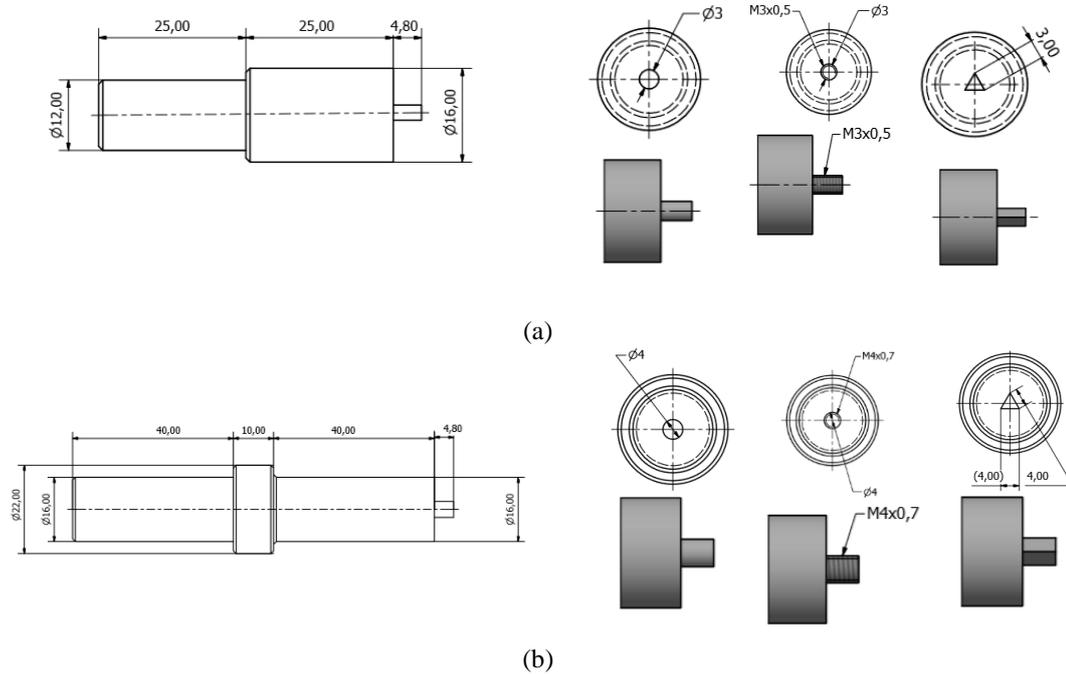


(a)



(b)

Gambar 3 Pin tool (a) berukuran 3mm dan (b) berukuran 4mm



Gambar 4 Sketsa Pin tool (a) berukuran 3mm dan (b) berukuran 4mm

2.3 Proses Pengelasan dan Pesiapan Pengujian

Parameter proses sangat mempengaruhi pada hasil lasan, pada penelitian ini parameter pengelasan friction stir welding yang digunakan dibuat konstan adalah ; kecepatan putaran spindle dibuat 1560 rpm, kecepatan feed rate sekitar 0,24 mm/s atau sekitar 14 mm/menit dan dept of plunge sekitar 0,5 mm. Sedangkan variasi bentuk pin tool menggunakan diameter 3mm (silinder, silinder ulir dan segitiga) dan 4mm (silinder, silinder ulir dan segitiga). Spesimen pengelasan dijepit dengan penjepit khusus yang dipasang pada mesin milling vertikal.

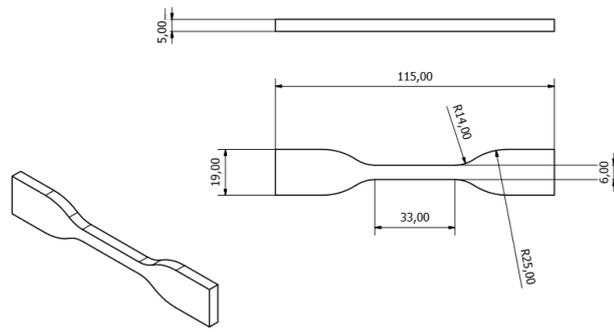
Persiapan dilakukan setelah lembaran HDPE sudah dalam keadaan tersambung atau sudah melalui proses pengelasan FSW. Kemudian material yang sudah tersambung dipotong tegak lurus dengan arah pengelasan sesuai dengan pola standar ASTM D 638 tipe IV seperti pada Gambar 5 untuk pengujian tarik. Pemotongan dilakukan dengan water jet dengan dimensi yang terlihat pada Gambar 6.

Pada penelitian ini menggunakan Optik usb yang terintegrasi dengan komputer sebagai pengambil gambar dengan 50 kali pembesaran. Mesin Z020 TN ProLine Materials Testing Machine Zwick Roell digunakan untuk pengujian tarik dengan kecepatan 5 mm/ menit. Sedangkan pengujian kekerasan dilakukan dengan mesin Zwick roell dengan skala H yang menggunakan indentor bola baja skala H yakni 1/8".

Pada penelitian ini juga dilakukan percobaan penyambungan dengan perekat sebagai pembanding dan tolak ukur seberapa efektif penyambungan dengan FSW ini diaplikasikan khususnya pada material HDPE.



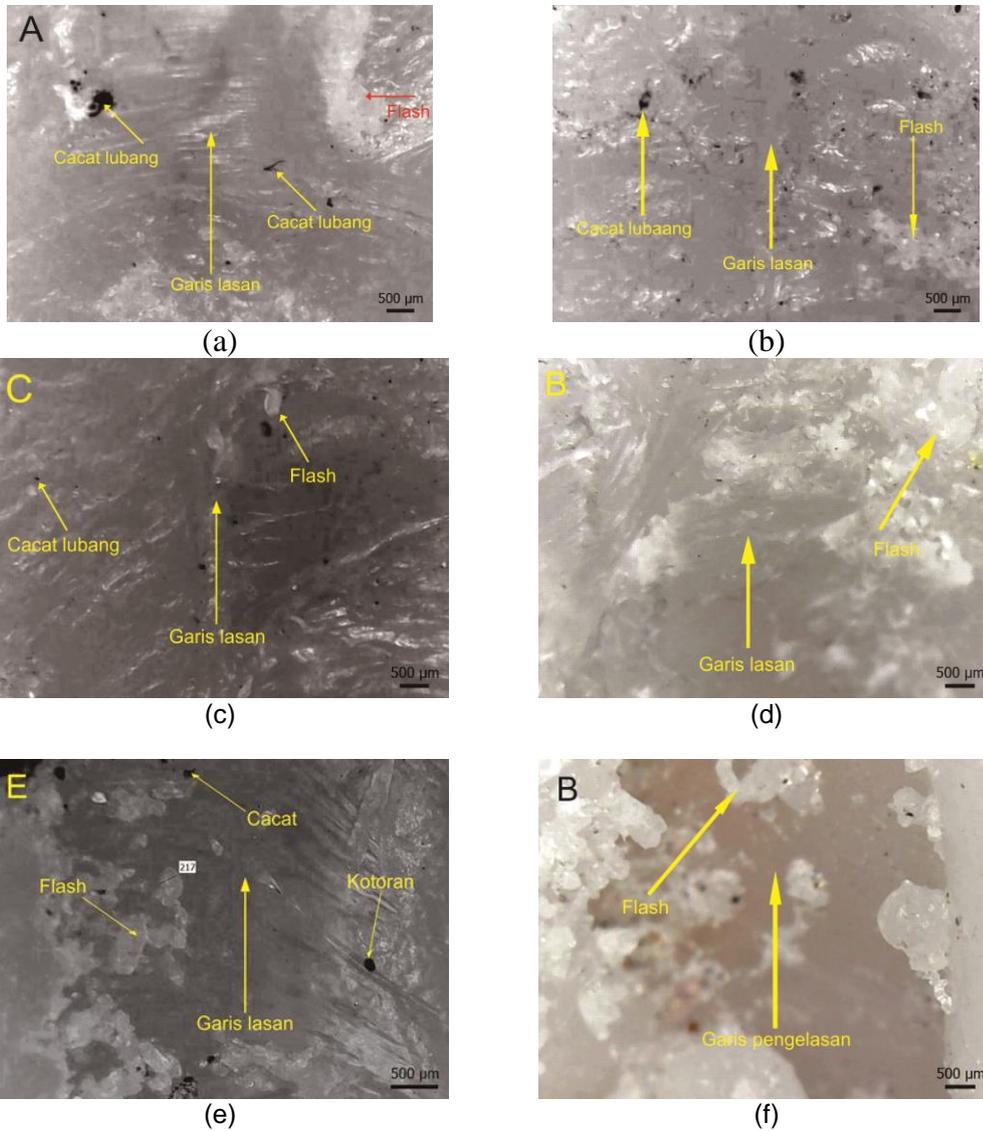
Gambar 5 Spesimen uji tarik



Gambar 6 Sketsa spesimen uji tarik

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Foto Makro



Gambar 7 Struktur makro hasil lasan dengan variasi bentuk (a) pin silinder 3mm, (b) silinder 4mm, (c) silinder ulir 3mm, (d) silinder ulir 4mm, (e) segitiga 3mm dan (f) segitiga 4mm.

Hasil penelitian struktur makro yang terlihat pada Gambar 7 diatas dapat diketahui bahwa penggunaan bentuk pin tool silinder ulir yang berukuran 3mm mendapatkan hasil yang baik dimana pada hasil lasan struktur makronya terlihat tidak terdapat cacat dan mengasilkan permukaan yang rata serta hasil yang konstan pada semua daerah proses pengelasan. Sedangkan hasil yang paling buruk didapat dari penggunaan bentuk pin tool segitiga baik yang 3mm ataupun 4mm keduanya memiliki banyak cacat lubang dan membentuk gumpalan-gumpalan seperti kristal dan membuang material keluar dari daerah sambungan. Hal ini sama dengan hasil yang didapat pada penelitian Prabowo H. dkk. (2013) yang terdapat banyak cacat rongga atau *voids* ini terbentuk karena kecepatan putaran tool yang terlalu tinggi serta adanya penambahan pemanas.

Putaran tool yang terlalu tinggi serta penambahan pemanas akan meningkatkan panas material akibat gesekan antara material dengan *pin tool* sehingga material menjadi terlalu lunak. Material yang terlalu lunak mengakibatkan banyak lelehan material yang terlepas keluar dari zona las pada saat proses pengadukan berlangsung.

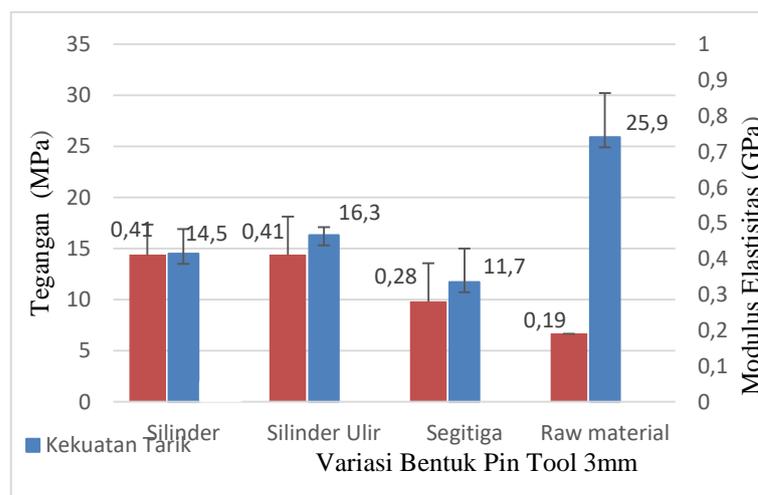
Jenis cacat yang terjadi pada pengelasan FSW berupa cacat rongga (*void*). *Void* terjadi karena kurangnya tekanan tool terhadap material benda kerja dan mengakibatkan *friction heat* dihasilkan tidak mampu untuk melelehkan material secara optimal sehingga jumlah material yang meleleh tidak dapat mengisi rongga sambungan secara sempurna. Selain cacat *void* kurangnya material yang meleleh mengakibatkan sambungan material kurang homogen. Pemanasan awal dan kedalaman tool yang sesuai akan mengurangi terjadinya cacat, sehingga kekuatan sambungan akan semakin meningkat (Triyono dkk. 2015).

3.2 Hasil Uji Tarik

Pada Gambar 8 terlihat bahwa variasi bentuk pin tool yang memiliki nilai kekuatan tarik atau tegangan rata-rata yang paling besar dalam lingkup pin berukuran 3 mm adalah bentuk silinder ulir dengan nilai tegangan rata-rata sebesar 16,3 MPa dan standar deviasi senilai 0,8 dan modulus elastisitas 0,41 GPa.

Tabel 2 Hasil pengujian tarik pada pengelasan FSW dengan pin tool berukuran 3 mm

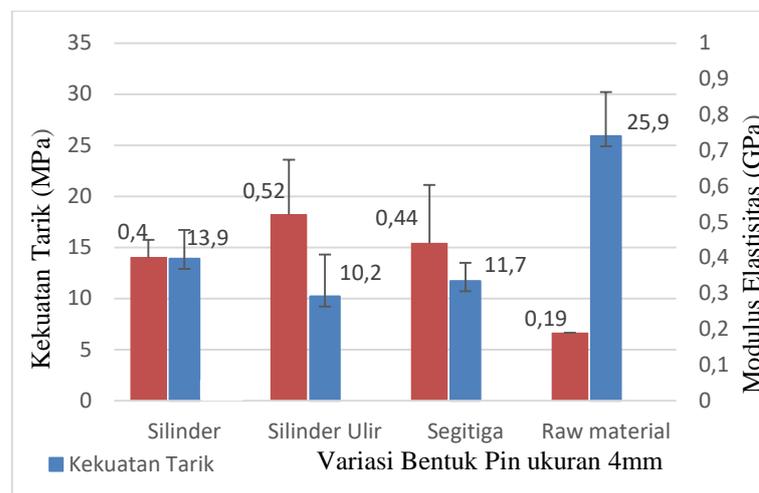
Pin diameter 3 mm	Percobaan			Kekuatan tarik rata-rata (MPa)	Modulus Elastisitas
	Ke 1	Ke 2	Ke 3		
Silinder	11,9	16,6	15,1	14,5 ± 2,4	0,41
Silinder ulir	16,2	17,3	15,6	16,3 ± 0,8	0,41
Segitiga	12,1	8,18	14,9	11,7 ± 3,3	0,28
Raw material	25,9	25,9	25,9	25,9 ± 4,3	0,19



Gambar 8 Grafik tegangan (MPa) dan Modulus elastisitas (GPa) hasil pegelasan FSW pada tool 3 mm

Tabel 3 Hasil pengujian tarik pada pengelasan FSW dengan *pin tool* berukuran 4mm

Pin diameter 4 mm	Ke 1	Ke 2	Ke 3	Kekuatan tarik rata-rata (MPa)	Modulus elastisitas
Silinder	16,3	14,6	10,8	13,9 ± 2,8	0,4
Silinder ulir	12,7	5,53	12,6	10,2 ± 4,1	0,52
Segitiga	4,39	3,36	6,89	4,88 ± 1,8	0,44
Raw material	25,9	25,9	25,9	25,9 ± 4,3	0,19



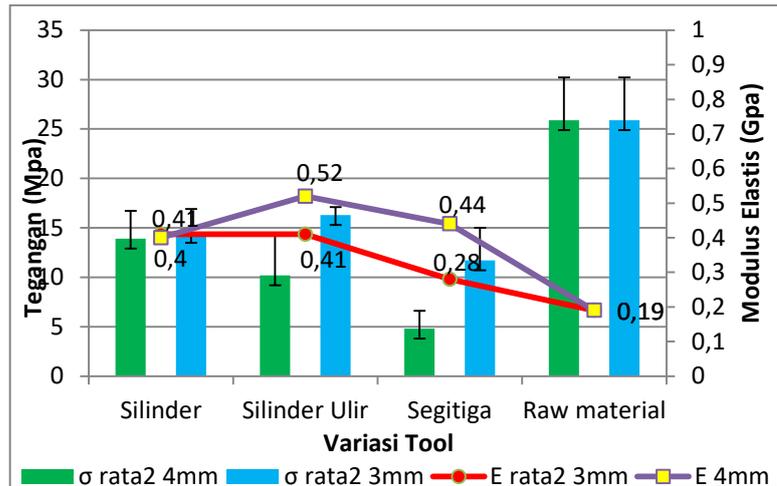
Gambar 9 Grafik tegangan dan modulus elastisitas hasil pengelasan FSW pada tool 4mm

Pada grafik yang terdapat pada Gambar 9 menunjukkan bahwa penggunaan bentuk pin berukuran 4 mm ini sangat cocok menggunakan bentuk pin tool silinder dimana memiliki tegangan yang besar yaitu sekitar 13,9 dan memiliki modulus elastisitas yang cukup kecil seharga 0,4 GPa.

Pembahasan : Penelitian tentang pengujian tarik pada hasil lasan friction stir welding dengan menggunakan lembaran HDPE sebelumnya telah dilakukan oleh Squeo dkk. (2009) Dalam proses set upnya jarak minimum sekitar 0,2 mm antara permukaan pin dan permukaan bawah sempelnya (dept of plunge), kecepatan rotasi pin antara 3000 dan 20.000 rpm, laju pengelasan antara 10 dan 40 mm/menit, diameter pin antara 1 dan 3 mm. Hasilnya, dalam hal bentuk pin tool, pin tool yang lebih besar yang terdapat hasil buruk pada lasan, kekuatan tertinggi sekitar 10 MPa, sedangkan bahan dasar mencapai 23 MPa. Hasil penelitian ini pun sama bahwa bentuk pin tool yang lebih kecil memiliki hasil lasan yang baik dari pada pin yang berukuran lebih besar.

Pada Gambar 10 menunjukkan bahwa dari semua variasi bentuk pin tool yang dipakai pengelasan, kekuatan tertinggi terdapat pada bentuk pin silinder ulir berdiameter 3 mm dengan nilai tegangan maksimum mencapai 17,3 MPa dengan nilai regangan 5,8%. Sedangkan tegangan pada bahan dasar sebesar 25,9 Mpa dan regangan senilai 13%.

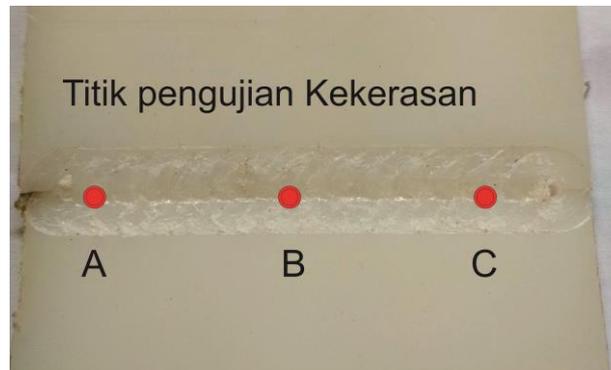
Pada kasus modulus elastisitas pun, pada pin berukuran yang lebih kecil terdapat hasil modulus elastisitas yang mendekati bahan dasar dengan nilai 0,28 GPa sedangkan pada bahan dasar sekitar 0,19 GPa. Dengan demikian bentuk pin yang berukuran lebih kecil memang memiliki hasil lasan yang lebih baik dalam hal ini bentuk silinder ulir. Akan tetapi pada penggunaan bentuk silinder ulir berukuran 3mm memiliki laju perpanjangan sedikit rendah dan pada saat patah menunjukkan hubungan lurus.



Gambar 10 Grafik tegangan dan modulus elastisitas dari semua variasi bentuk *Pin tool* pada pengelasan FSW

3.3 Hasil Uji kekerasan

Pada Tabel 2 terlihat menunjukkan adanya sebaran data yang mempunyai interval yang sedikit jauh. Hal ini membuktikan bahwa pada daerah sambungan terjadi pengadukan yang tidak mencapai homogen sedangkan sifat dari material uji homogen. Gambar 11 menunjukkan pengambilan titik pada pengujian kekerasan. Pada Gambar 12 menunjukkan grafik batang yang merupakan nilai kekerasan hasil pengelasan dengan metode friction stir welding dengan variasi bentuk pin dan diameter pin dimana terlihat pada variasi bentuk pin tool silinder yang berukuran 3mm menghasilkan nilai kekerasan tertinggi dengan nilai sebesar 41,47 HRH sedangkan bahan dasar sebesar 54,77 HRH, dengan demikian bisa diartikan bahwa nilai kekerasan sambungan yang tertinggi sekitar 75% dari bahan dasar. Sedangkan pada nilai kekerasan terendah terjadi pada pengelasan dengan menggunakan pin tool silinder ulir yang berdiameter 4mm sebesar 23,17 HRH, hasil ini berarti nilai kekerasan hasil lasan didapat sekitar 40% dari bahan dasar.

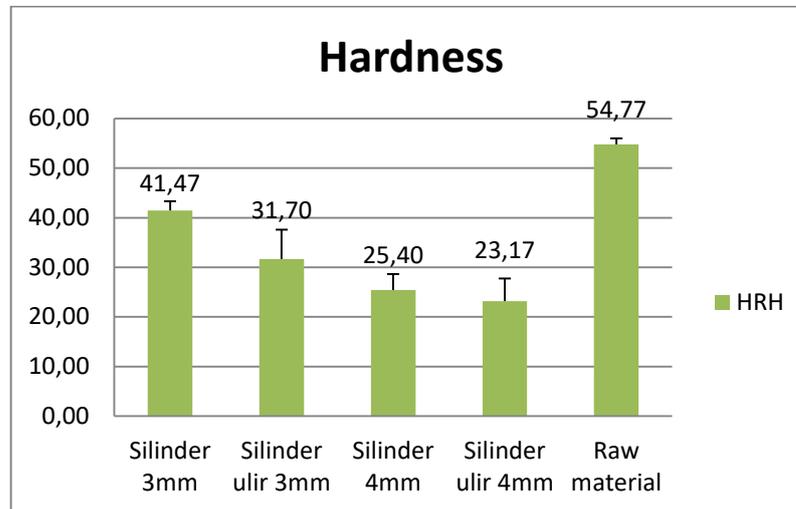


Gambar 11 Posisi titik pada pengujian kekerasan pada hasil pengelasan FSW

Tabel 2 Hasil rata-rata dari pengujian kekerasan pada pengelasan FSW

Variasi bentuk	Posisi titik pengujian			Rata-rata ALL	Std Deviasi
	A	B	C		
Silinder 3mm	39,50	41,70	43,20	41,47	1,861003
Silinder ulir 3mm	36	34,1	25	31,70	5,879626
Silinder 4mm	27,9	26,6	21,7	25,40	3,269557
Silinder ulir 4mm	22,3	28,1	19,1	23,17	4,562163
Raw material	54,8	56	53,5	54,77	1,250333

Pada kasus standar deviasi, terlihat bahwa pada bentuk pin tool silinder berukuran 3mm memiliki standar deviasi yang paling bagus dengan harga sebesar 1,86, sedangkan pada raw material senilai 1,25. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengelasan dengan menggunakan pin tool silinder berukuran 3mm menghasilkan lasan yang bagus yang ditunjukkan dengan sebaran data pada setiap titik pengujian tidak memiliki jarak yang terlalu jauh.



Gambar 12 Grafik hasil uji kekerasan rockwell pada lasan FSW

4. KESIMPULAN

Setelah meneliti dan mengkaji hasil penelitian berdasarkan hasil pengujian struktur makro, kekuatan tarik dan kekerasan terhadap hasil pengelasan *friction stir welding* pada lembaran *high density polyethylene* dengan menggunakan kecepatan putar 1560 rpm, kecepatan pengelasan 14 mm/menit, *dept of plunge* sekitar 0,5 mm dan variasi bentuk dan ukuran pin tool yakni silinder, silinder ulir dan segitiga yang berdiameter 3 mm dan 4 mm, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengelasan material HDPE dengan metode *friction stir welding* telah berhasil dilakukan
2. Hasil dari penggunaan bentuk pin tool silinder ulir yang berukuran 3mm merupakan hasil yang tidak terdapat cacat dan mengasilkan permukaan yang rata serta hasil yang konstan pada semua daerah proses pengelasan. Sedangkan hasil yang kurang rata dan meghasilkan banyak
3. *flash* didapat dari pengelasan yang menggunakan pin tool berbentuk segitiga..
4. Pada pengujian kekerasan sepanjang garis las didapat variasi bentuk pin tool silinder yang berukuran 3mm menghasilkan nilai kekerasan tertinggi dengan nilai sebesar 41,47 HRH sedangkan bahan dasar sebesar 54,77 HRH, dengan demikian bisa diartikan bahwa nilai kekerasan sambungan yang tertinggi sekitar 75% dari bahan dasar.
5. Pada pengujian kuat tarik kekuatan tertinggi terdapat pada bentuk pin silinder ulir berdiameter 3 mm dengan nilai tegangan maksimum mencapai 17,3 MPa dengan nilai regangan 5,8%. Sedangkan tegangan pada bahan dasar sebesar 25,9 MPa dan regangan senilai 13%. Dengan demikian bentuk pin yang berukuran lebih kecil memang memiliki hasil lasan yang lebih baik dalam hal ini bentuk silinder ulir.
6. Bentuk pin tool yang direkomendasikan berdasarkan hasil penelitian ini adalah bentuk pin tool silinder ulir yang berdiameter 3 mm, karena memiliki hasil permukaan dan sifat mekanik yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Armagan Arici and Tamer Sinmaz (2005). Effects of Double Passes of the Tool on Friction Stir Welding of Polyethylene.
- Husain I. M., Salim R. K., Azdast T., Hasanifard S., Shishavan S. M. and Lee R. E. (2015). Mechanical Properties of Friction Stir Welded Polyamide Sheets.
- Kiss Z. and Czirány T. (2007). Applicability of Friction Stir Welding in Polymeric Materials.
- Mendes N., Neto P., Simão M. A., Loureiro A. and Pires J. N. (2014). A novel Friction Stir Welding Robotic Platform Welding Polymeric Materials.
- Mostafapour A. And Azarsa E. (2012). A Study on The Role of Processing Parameters in Joining Polyethylene Sheets Via Heat Assisted Friction Stir Welding: Investigating Microstructure, Tensile and Flexural Properties.
- Prabowo H., Triyono dan Kusharjanta B. (2013). Pengaruh Kecepatan Putaran Tool dan Pemanas Tambahan Terhadap Kekuatan Mekanik Polypropylene Hasil Las Friction Stir Wedding.
- Rezgui M. A., Ayadi M., Cherouat A., Hamrouni K., Zghal A., Bejaoui S. (2010). Application of Taguchi Approach to Optimize Friction Stir Welding Parameters of Polyethylene.
- Rezgui M. A., Trabelsi A. C., Ayadic M. and Hamrounic K. (2011). Optimization of Friction Stir Welding Process of High Density Polyethylene. Vol 2.
- Setiawan A., Irawan Y. S., Purnowidodo A. (2011). Pengaruh Temperatur Pelat Landasan Selama Proses Friction Stir Welding Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Lembaran HDPE.
- Shaikh A. S., Tahir M. S., Qureshi M. K. A., Zain-ul-abdein M. and Khalid F. A. (2012). Experimental Investigation of Mechanical Properties of Friction Stir Welded HDPE With Additions of Silicon Carbide, Silica, Nano-Alumina, and Graphite.
- Squeo E. A., Bruno G., Guglielmotti A., Quadrini F. (2009). Friction Stir Welding of Polyethylene Sheets.
- Triyono, Nugroho B. Dan Muhayat N. (2015). Pengaruh Plunge Depth dan Preheat Terhadap Sifat Mekanik Sambungan Friction Stir Welding Polyamide.