

PENGARUH KECEPATAN PUTAR TOOL TERHADAP KEKUATAN MEKANIK SAMBUNGAN LAS FRICTION STIR WELDING PADA HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE)

M. Rafiuddin Imbaraga¹, Aris Widyo Nugroho², Muhammad Budi Nur Rahman³
Program Sudi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Brawijaya, Tamantirto, Bantul Yogyakarta 55183
Muhammad.rafiuddin.2014@ft.umy.ac.id

Abstract

Friction stir welding (FSW) is a welding process in a solid state that does not require additional materials. Its connection utilizes the friction of the rotating pin tool with the workpiece to make it connected. HDPE is a polymer material that can be connected using the FSW process. The purpose of this study was to determine the effect of tool rotational speed on the mechanical strength of HDPE materials by knowing the macro structure, tensile characteristic, and flexural characteristic.

The parameters used are variations in the rotational speed of 900 rpm, 1500 rpm and 2000 rpm. The welding process uses a feed rate of 20 mm / minute, depth of plunge 0.5 mm, and pin tool of 3 mm. Tensile test using ASTM D638 type IV standard, flexural test with ASTM D790 standard and macro structure test.

The higher the speed tool, the lower the mechanical properties of HDPE material. The highest tensile strength was obtained from a 900 rpm tool rotating speed of 13.6 MPa with a 6.2% strain and 0.51 GPa modulus of elasticity, at a 2000 rpm was 2.69 MPa with a 4.6% strain and a modulus of elasticity of 0.21 GPa. The highest flexural strength value of 14.2 MPa at 900 rpm, at 2000 rpm of 8.58 MPa. In observing the macro structure, every variation was seen with flash defects, but at 2000 rpm rotational speed was seen with many defects namely void defects, flash defects, and dirt in the weld joint area.

Keyword: *friction stir welding, HDPE, variations of the rotational speed*

1. PENDAHULUAN

Teknik penyambungan atau pengelasan material berkembang seiring dengan berkembangnya jenis material dan aplikasi dari material tersebut. Teknik pengelasan *friction stir welding* (FSW) merupakan salah satu teknik penyambungan yang sedang dikembangkan, khususnya pada bahan HDPE (Prabowo dkk, 2013). Proses FSW pada HDPE dapat dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu: proses yang melibatkan gerakan mekanis untuk menghasilkan panas (*ultrasonic welding, friction welding, vibration welding*) dan proses yang melibatkan pemanasan *eksternal* (*hot plate welding, hot gas welding and resistive and implant welding*) (Azarsa dan Mostafapour, 2013).

Metode pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) adalah suatu proses pengelasan dimana penggabungan terjadi dalam keadaan padat (*solid state*) dan dalam proses tersebut tanpa diperlukan bahan tambahan, input panasnya didapatkan antara gesekan tool dengan material yang dilas. Prinsip kerja FSW adalah memanfaatkan gesekan dari *pin tool* yang berputar dengan benda kerja lain yang diam sehingga mampu melelehkan benda kerja yang diam tersebut dan akhirnya tersambung menjadi satu. Beberapa contoh pengelasan jenis ini adalah pembuatan bodi mobil, sayap ataupun bodi pesawat terbang serta pipa perairan (Ashari dan Subiyanto, 2016).

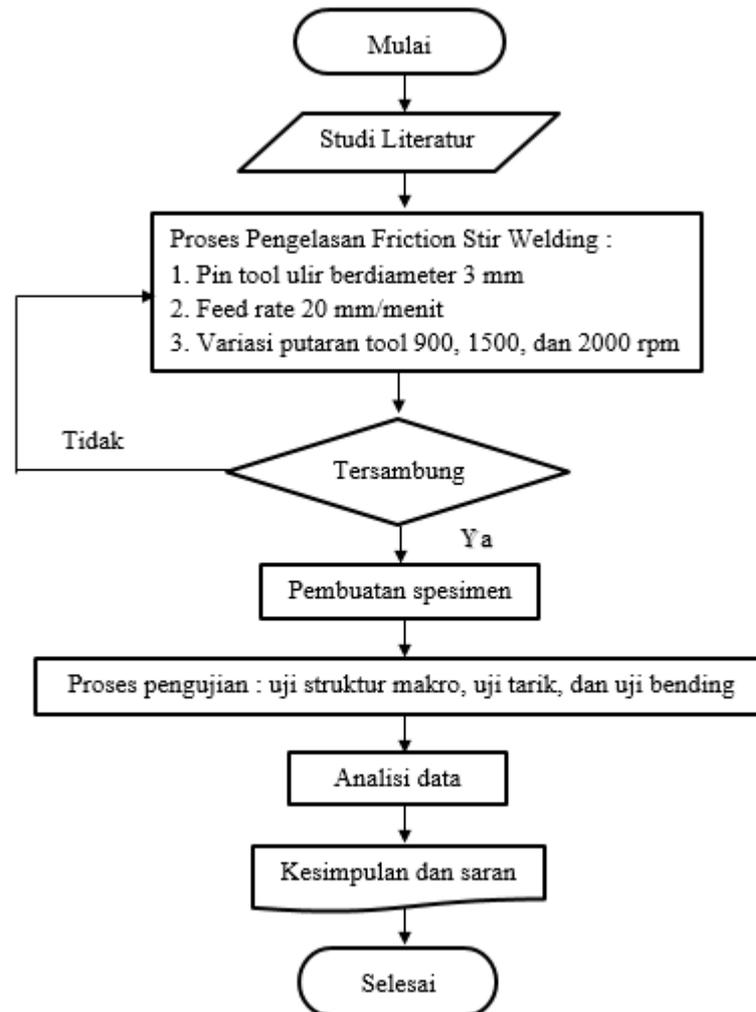
Bahan HDPE termasuk bahan plastik yang merupakan isolator panas murni atau nilai konduktivitas panasnya rendah, nilai konduktivitas panas yang rendah. Proses pengelasan plastik dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu: proses yang melibatkan gerakan mekanis yang menghasilkan panas (*ultrasonic welding, friction welding, vibration*

welding), dan proses yang melibatkan pemanasan eksternal (hot plate welding, hot gas welding, implant welding) (Arici dan Sinmaz, 2005). Pada proses FSW diketahui bahwa konduktivitas panas merupakan faktor penentu cepat atau tidaknya proses pelunakan material di dekat pin. Selama proses FSW kondisi pelat landasan tanpa perlakuan sifat material HDPE sebagai isolator masih menjadi penghambat proses merambatnya panas hasil gesekan antara pin dengan material di daerah sambungan. Sifat isolator dari material HDPE mengakibatkan terjadinya fluktuasi temperatur, fluktuasi temperatur ini memicu terjadinya cacat las permukaan berbentuk celah (lembah). Dengan semakin meningkatnya temperatur pelat landasan maka sifat isolator dari material yang menghambat proses merambatnya panas hasil gesekan pin dengan material semakin berkurang pengaruhnya dan memperkecil cacat las permukaan yang berbentuk celah (Setiyawan dkk, 2011).

Disamping pengaruh temperatur pelat landasan terhadap proses FSW, kecepatan putaran tool juga sangat berpengaruh terhadap kualitas dari lasan FSW. Pada kecepatan rotasi yang rendah, panas yang dihasilkan tidak cukup untuk merusak material secara plastis dan karenanya ada sedikit aliran material dari sisi yang maju (*advancing side*) ke sisi yang mundur (*retreating side*) dari lasan. Dengan meningkatnya kecepatan rotasi, gesekan antara pin dan material meningkat yang menghasilkan lebih banyak panas. Panas ini cukup untuk mencapai keadaan plastis. Hal ini disebabkan suhu yang ditimbulkan pada kecepatan yang lebih tinggi menghasilkan bahan cair yang mengarah pada sambungan yang efisien (Bilici dkk, 2017). Rotasi tool pada permukaan membuat bahan plastik mengalir di sekitar pin dan dengan demikian, diperoleh hasil lasan yang lebih baik (Sahu dkk, 2016).

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, ada beberapa langkah yang dilakukan. Adapun langkah-langkah dalam proses penelitian ini disampaikan dalam bentuk diagram alir yang dapat dilihat pada gambar 1.



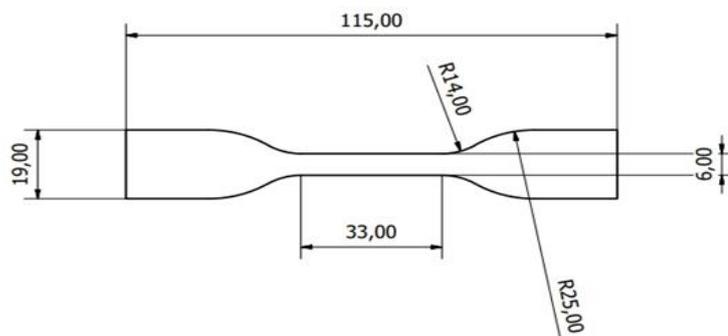
Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini, proses FSW menggunakan dua parameter tetap yaitu feed rate 20 mm/menit, tool silinder ulir berdiameter 3 mm dan menggunakan satu variasi parameter yaitu kecepatan rotasi spindle dengan 3 variasi dimuali yang terendah 900 rpm, 1500 rpm dan 2000 rpm. Pada gambar 3.14 terlihat proses FSW berlangsung.

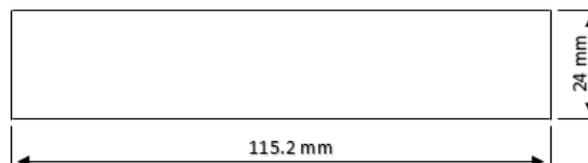


Gambar 2 Proses FSW

Tahap persiapan spesimen dilakukan setelah semua proses pengelasan selesai. Kemudian material yang sudah tersambung dipotong dan disesuaikan menurut ukuran pengujian yang sudah ditetapkan. Untuk uji tarik menggunakan standar ASTM D638 type IV dan untuk uji bending menggunakan ASTM D790. Seperti yang terlihat pada Gambar 3 menunjukkan standar ASTM D638 type IV dan Gambar 4 menunjukkan ASTM D790.



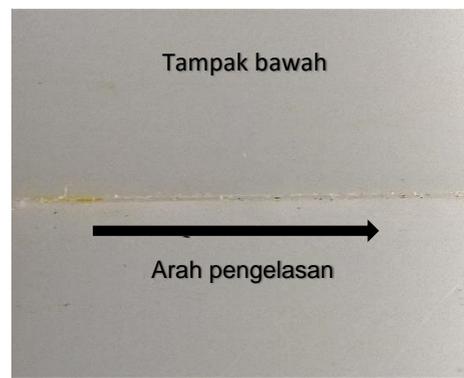
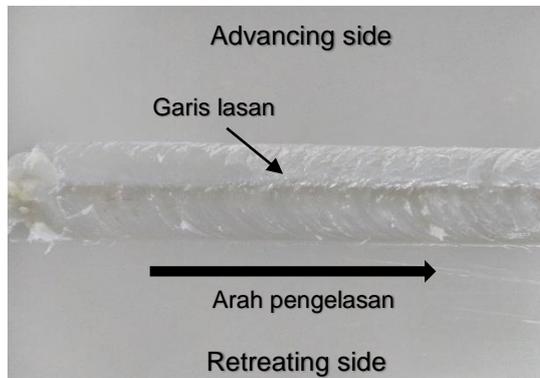
Gambar 3 Standar ASTM D638 Type IV



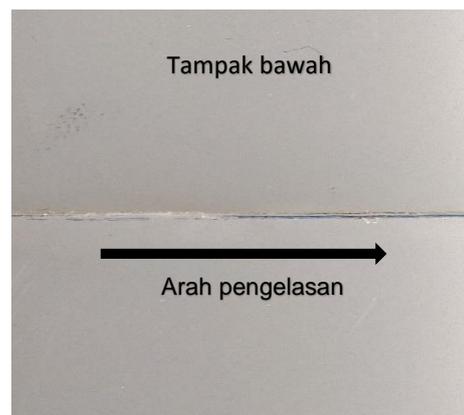
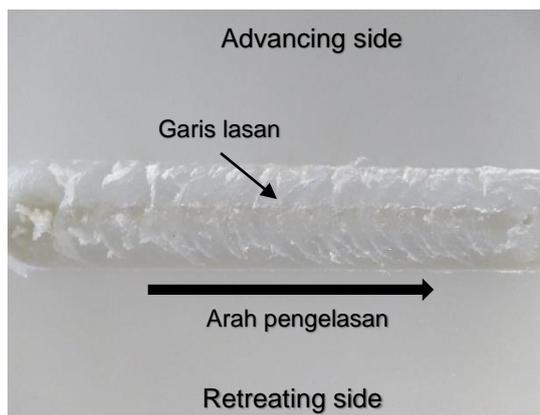
Gambar 4 Standar ASTM D790

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

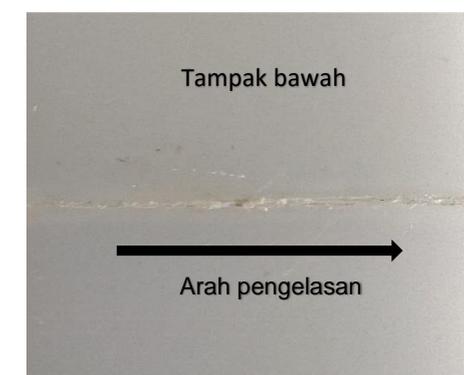
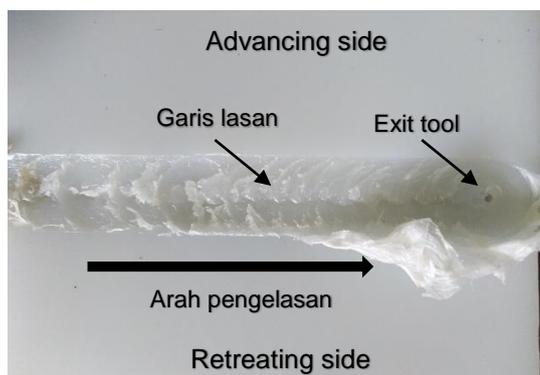
I. Hasil Pengelasan FSW pada HDPE dengan variasi kecepatan putar tool



(a). Hasil Pengelasan FSW Variasi 900 rpm



(b). Hasil Pengelasan FSW Variasi 1500 rpm



(c). Hasil Pengelasan FSW Variasi 2000 rpm

Gambar 5 Hasil Pengelasan FSW Variasi Kecepatan Putar Tool

Pengelasan dengan kecepatan putar tool 900 rpm merupakan hasil pengelasan terbaik pada penelitian kali ini, baik dari segi visual ataupun segi kekuatan mekaniknya. Hasil pengelasan dengan variasi kecepatan putar tool 900 rpm seperti yang terlihat pada Gambar 5 menunjukkan hasil lasan yang bagus dan rapih di sepanjang jalur pengelasannya, itu karena pada putaran 900 rpm pengadukan antara shoulder dan pin tool dengan benda kerja bercampur dengan baik sehingga hasilnya terlihat baik.

Pada variasi kecepatan putar tool 1500 rpm secara kasat mata tidak terlihat perbedaan tetapi hasil dari uji kekuatan material variasi 1500 rpm mengalami penurunan daripada variasi 900 rpm baik hasil dari uji tarik maupun uji bending.

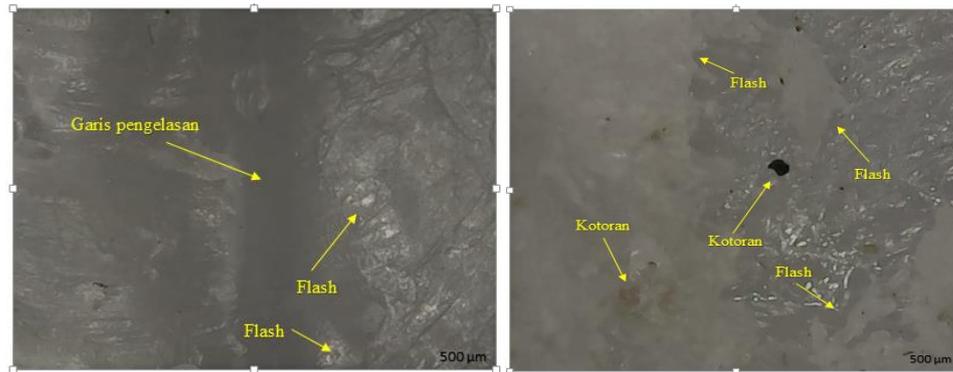
Hasil dari pengelasan dengan variasi kecepatan putar tool 2000 rpm terdapat gelombang pada jalur pengelasan dikarenakan putaran yang lebih tinggi menghasilkan panas yang berlebih yang mengakibatkan saat proses pengadukan lelehan dari material terlempar dari area sambungan dan mengakibatkan sambungan kedua material tidak sempurna. Terlihat dari gambar pada akhir pengelasan sebelum *exit tool* ada lelehan material yang terlempar dari area sambungan di bagian *retreating side* lasan yang pada variasi 900 rpm ataupun 1500 rpm tidak ditemukan hal seperti ini. Gambar 10 menunjukkan hasil dari pengelasan variasi putaran tool 200 rpm.

II. Hasil Uji Makro

Hasil dari struktur makro ini berdasarkan penelitian menggunakan alat mikroskop optik usb merk CMP 022 dengan perbesaran 500x pada hasil lasan FSW pada bahan HDP. Berikut merupakan hasil pengamatan struktur makro yang dipaparkan menjadi tiga bagian menurut variasi yang ada.



(a). Hasil uji makro 900 rpm



(b). Hasil uji makro 1500 rpm

(c). Hasil uji makro 2000 rpm

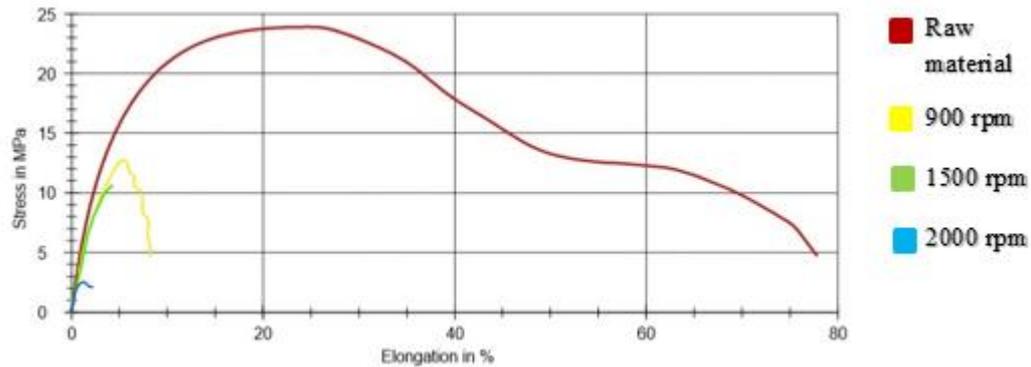
Gambar 6 Hasil Uji Struktur Makro

Pada hasil struktur makro pada variasi 2000 rpm terlihat banyak cacat seperti kotoran, dan banyak *flash* akibat dari kecepatan putar tool yang teramat tinggi yang mengakibatkan rusaknya struktur dari bahan HDPE. Pada umumnya jenis cacat yang terjadi pada pengelasan FSW dikategorikan dalam tiga bagian yaitu improper heating, excessive heating dan design faults (Mishra dkk, 2019). Cacat improper heating terjadi karena kurangnya molten material 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. Semakin rongga sambungan atau zona las terisi penuh maka kekuatan tariknya akan semakin meningkat (Paygadeh dkk, 2011). Tetapi kelebihan *friction heat* tidak baik karena bisa mengakibatkan *molten material* keluar dari jalur lasan dan meninggalkan rongga/void yang tidak terisi akibat dari keluarnya *molten material* tadi. Jadi untuk meningkatkan kualitas sambungan FSW dibutuhkan variasi kecepatan tool yang sesuai yang menghasilkan panas yang pas untuk melelehkan material yang bisa membuat sambungan lasan lebih sempurna baik secara fisik maupun struktur makro nya.

Pada penelitian ini variasi terbaik yang disarankan adalah variasi putaran kecepatan tool 900 rpm yang tidak banyak terdapat cacat dan hasil uji tarik maupun uji bending dari variasi ini merupakan yang terbaik dari ketiga variasi yang ada.

III. Hasil Pengujian Tarik

Hasil pengujian tarik pada penelitian ini menunjukkan nilai kekuatan tarik maksimum dari bahan HDPE dengan metode FSW dalam bentuk kurva atau grafik berdasarkan tegangan dan regangannya.



Gambar 7 Kurva Nilai Tegangan Maksimum dari Tiap Variasi

Adapun penjelasan dari kurva hasil uji tarik sebagai berikut :

- Untuk raw material ditunjukkan oleh warna merah dengan nilai kekuatan tarik maksimum sebesar 23.9 MPa, setelah itu bahan mengalami penurunan kekuatan sampai nilai 4.78 MPa sebelum terjadi patah.
- Warna kuning menunjukkan variasi 900 rpm yang merupakan variasi terbaik pada penelitian ini dengan kekuatan tarik maksimum sebesar 13.6 MPa atau sekitar 57% dari kekuatannya, dan mengalami penurunan kekuatan sebelum benar-benar patah.
- Variasi 1500 rpm ditunjukkan oleh warna hijau dengan nilai kekuatan tarik 11.2 MPa, lebih kecil daripada variasi 900 rpm karena pada variasi ini suhu yang dihasilkan pada saat proses pengelasan lebih tinggi yang mengakibatkan molten material tidak mengisi rongga di jalur lasan.
- Variasi 2000 rpm ditunjukkan oleh warna biru dengan menghasilkan nilai uji tarik 2.69 MPa, terendah dari semua variasi karena pada variasi ini suhu yang dihasilkan sangat tinggi yang mengakibatkan banyaknya cacat flash disekitar daerah lasannya yang membuat nilai uji tarik sangat buruk.

1. Raw Material



Gambar 8 Raw Material Uji Tarik

Pengujian raw material dilakukan untuk membandingkan hasil dari variasi pengelasan yang ada dengan bahan dasar untuk melihat berapa efisiensi yang didapatkan dari hasil pengelasan FSW ini.

Pada Gambar 8 terlihat benda uji memanjang dari bentuk semula tanpa putus sedikitpun. Hal ini menandakan bahwa patahan yang terjadi pada bahan dasar HDPE bersifat ulet dan tidak getas dengan regangan maksimum yang didapatkan sebesar 78 % dan tegangan maksimum 23.9 MPa.

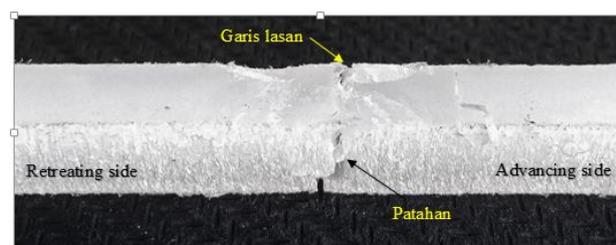
2. Variasi 900 rpm



Gambar 9 Hasil Uji Tarik Variasi 900 rpm

Pada hasil pengujian tarik variasi putaran tool 900 rpm seperti yang terlihat pada Gambar 9 terlihat patahan terjadi pada pinggir garis lasan. Pada Gambar 9 tidak terlihat putus sampai terpisah dua bagian tetapi mesin uji sudah menganggapnya putus. Pada variasi ini hasil lasan paling baik karena panas yang dihasilkan sesuai dan nilai dari tegangan maupun regangan nya variasi ini merupakan yang mendekati dari nilai bahan dasar HDPE yaitu tegangan maksimum didapatkan sebesar 13.6 MPa sedangkan regangan maksimum rata-rata nya sebesar 6.1 %.

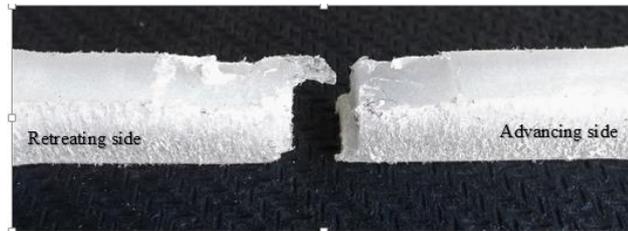
3. Variasi 1500 rpm



Gambar 10 Hasil Uji Tarik Variasi 1500 rpm

Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa patahan terjadi pada garis lasan yang menunjukkan bahwa patahan ini bersifat getas tetapi seperti pada variasi 900 rpm bahwa patahan ini tidak benar-benar terbagi dua. Pada variasi ini tegangan maksimum didapatkan sebesar 11.2 MPa dan regangan maksimum rata-rata 3.8 %.

4. Variasi 2000 rpm



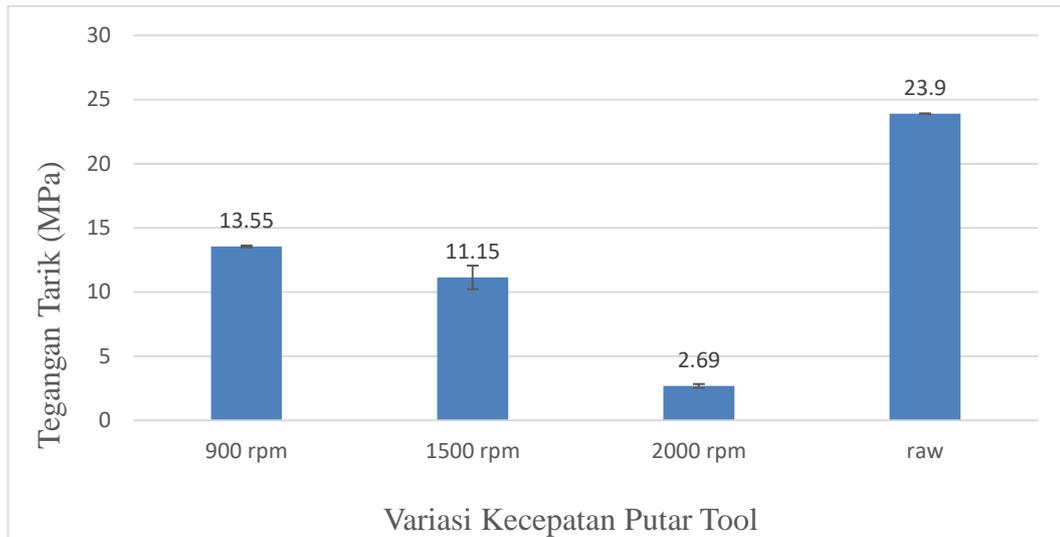
Gambar 11 Hasil Uji Tarik Variasi 2000 rpm

Pada variasi ini spesimen benar-benar patah terbagi dua seperti yang terlihat pada Gambar 11. Patahan yang terjadi pada garis lasan dan patahan ini bersifat getas dan mendapatkan nilai tegangan dan regangan terendah dari ketiga variasi yang dilakukan dengan tegangan maksimum sebesar 2.69 MPa dan regangan nya 4.6 %. Hal ini dikarenakan ketika proses pengelasan panas yang dihasilkan dari putaran tool 2000 rpm berlebih dan putaran yang lebih cepat mengakibatkan struktur dari bahan HDPE rusak dan tidak tersambung secara sempurna. Dibenarkan dengan data hasil uji tarik bahwa variasi ini mendapatkan hasil yang paling buruk diantara ketiga variasi yang ada.

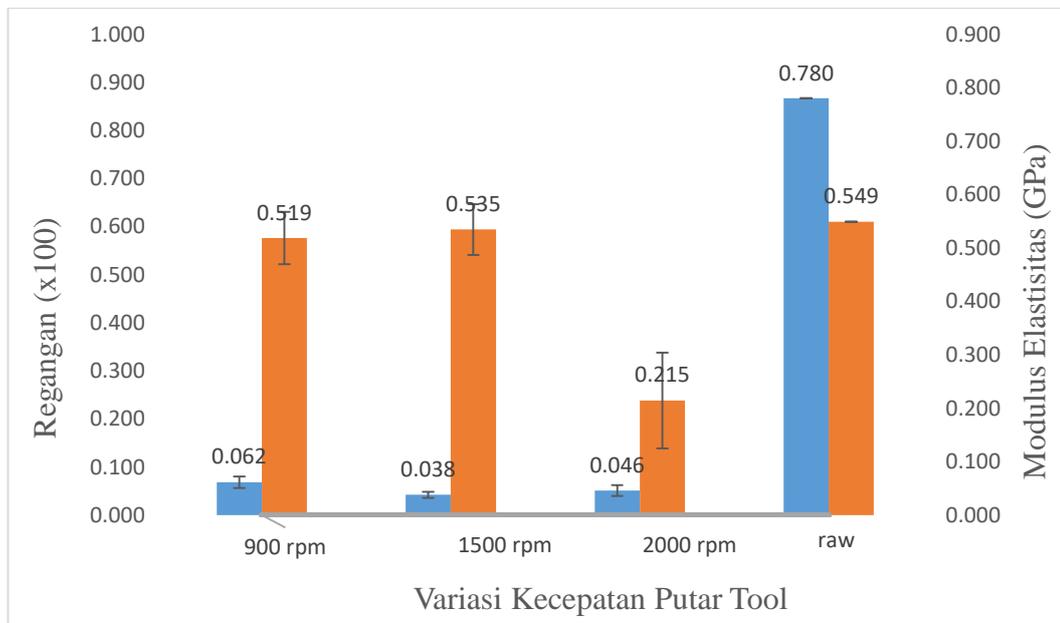
Tabel 1 Hasil Pengujian Tarik Standar ASTM D638 Type IV

| RPM | UTS | | Kekuatan tarik rata-rata (MPa) | Regangan maksimum | Modulus elastisitas |
|------|------------|------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| | σ_1 | σ_2 | | | |
| 900 | 13.5 | 13.6 | 13.55 ± 0.05 | 0.061 | 0.51 |
| 1500 | 11.8 | 10.5 | 11.2 ± 0.65 | 0.038 | 0.53 |
| 2000 | 2.59 | 2.79 | 2.69 ± 0.10 | 0.046 | 0.21 |
| raw | 23.9 | 23.9 | 23.9 ± 0 | 0.78 | 0.54 |

Dari tabel diatas terlihat bahwa tegangan maksimum atau UTS terbesar terdapat pada variasi kecepatan putar tool 900 rpm dengan nilai 13.6 MPa, sedangkan untuk raw material HDPE mempunyai nilai tegangan maksimum 23.9 MPa. Untuk lebih jelasnya akan diperlihatkan oleh gambar grafik tegangan, regangan dan modulus elastisitas.



Gambar 10 Grafik tegangan FSW bahan HDPE



Gambar 11 Grafik regangan dan modulus elastisitas hasil pengujian tarik HDPE

Berdasarkan Gambar 10 tegangan tarik tertinggi didapatkan pada variasi 900 rpm dengan 13.55 MPa atau 57% dari bahan dasar HDPE yang mendapatkan nilai tegangan tarik 23.9 MPa. Sedangkan untuk tegangan tarik terendah didapatkan dari hasil variasi 2000 rpm. Untuk nilai regangan maksimum terbesar didapatkan dari variasi kecepatan putar tool 900 rpm sebesar 0.062 atau 6.2%, dan untuk regangan maksimum terkecil terjadi pada variasi kecepatan putar tool 1500 rpm yaitu sebesar 3.8%. Sedangkan untuk raw material bahan HDPE nilai regangannya sebesar 78%.

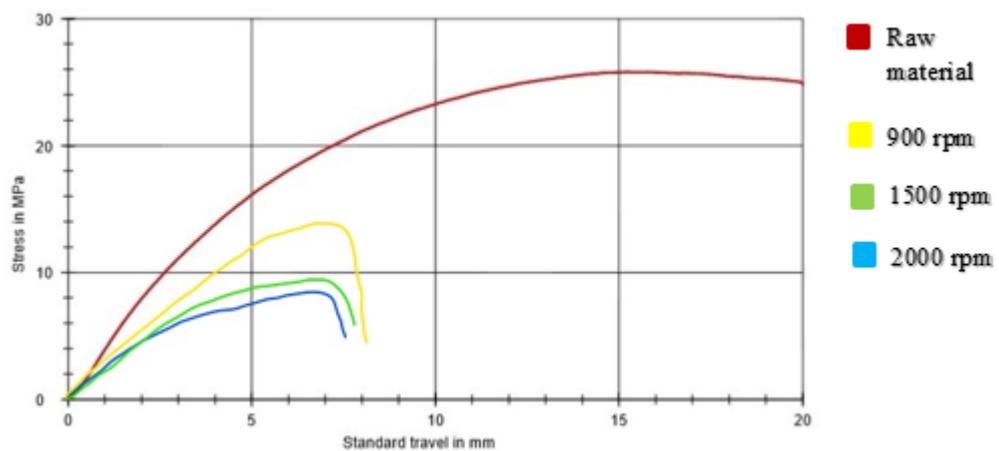
Penelitian yang sudah dilakukan oleh Setiyawan dkk, (2011) hasil dari uji tarik pada HDPE dengan tegangan maksimum didapatkan mencapai 95% dari kekuatan tegangan maksimum bahan dasarnya. Hal itu berbeda jauh dengan hasil dari penelitian ini yang hanya mendapatkan nilai tegangan maksimum 57% dari bahan dasarnya yang didapat

dari variasi putaran tool 900 rpm. Hal ini terjadi dikarenakan parameter yang digunakan berbeda dan Setiyawan dkk, (2011) menambahkan perlakuan khusus pada bahan yang akan dilas yaitu dengan meningkatkan temperatur pelat landasan ketika proses pengelasan berlangsung. Sedangkan penulis disini tidak memberikan temperatur tambahan pada pelat landasan dalam artian suhu bahan las sesuai dengan suhu ruangan yaitu sekitar 30°. Meningkatnya temperatur pelat landasan mengakibatkan cacat las dalam semakin kecil muncul dan homogenitas sambungan las benar-benar sama dengan material induk yang terjadi pada pelat landasan $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Penelitian lain yang sudah dilakukan tanpa perlakuan khusus pada pelat landasan hasilnya tidak jauh berbeda dengan hasil yang didapatkan penulis pada penelitian ini. Sahu, dkk (2017) melakukan penelitian tentang pengaruh kecepatan putar tool terhadap kekuatan tarik material, hasilnya dari tiga variasi yang dilakukan yaitu 500, 750 dan 1000 rpm kekuatan tarik maksimum didapatkan dari variasi kecepatan putar tool 750 rpm sebesar 63% dari kekuatan tarik maksimum bahan dasarnya, sedangkan peneliti mendapatkan hasil kekuatan tarik maksimum dari variasi kecepatan putar tool 900 rpm sebesar 57 % dari bahan dasarnya yaitu HDPE. Hasil ini tidak jauh berbeda karena parameter yang digunakan hampir sama dan tidak ada perlakuan khusus pada pelat landasan pada saat proses FSW berlangsung. Pada hasil lasannya ada cacat rongga dan menunjukkan adanya aliran material yang tidak seragam pada *retreating side* dari lasan.

IV. Hasil Pengujian Bending/Lentur

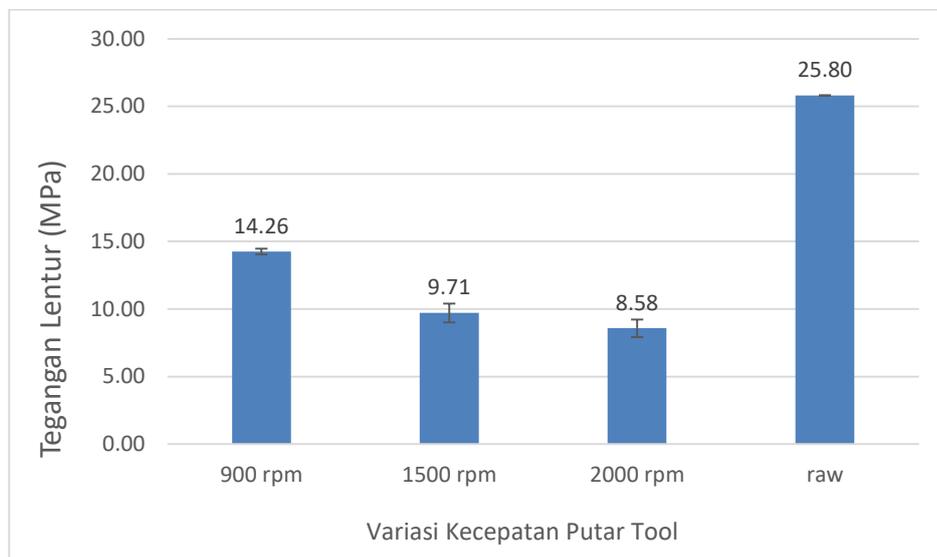
Pengujian kekuatan bending dilakukan untuk mengetahui kemampuan sambungan dalam menahan beban dalam arah tegak lurus permukaan sambungan. Beban yang diberikan pada sambungan merupakan beban statik. Pengujian dilakukan berdasarkan standar ASTM D 790. Hasil dari proses pengujian bending yang dilakukan untuk memperoleh data beban maksimal yang nantinya akan digunakan untuk mengetahui nilai kekuatan lentur. Pengujian ini dilakukan pada bagian sisi permukaan lasan root atau akar. Hasil pengujian bending dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 12 Kurva nilai kekuatan lentur bending tiap variasi

Tabel 2 Data Hasil Pengujian Bending pada Sambungan Las FSW

| Variasi | Beban Maksimum (kN) | Kekuatan Lentur Maksimum (MPa) | | Rata-rata Nilai Kekuatan Lentur (MPa) |
|----------|---------------------|--------------------------------|-------|---------------------------------------|
| 900 rpm | 0.073 | 14.4 | 14.11 | 14.2 ± 0.21 |
| 1500 rpm | 0.053 | 10.2 | 9.21 | 9.69 ± 0.70 |
| 2000 rpm | 0.044 | 9.04 | 8.12 | 8.58 ± 0.65 |
| raw | 0.142 | 25.8 | 25.8 | 25.8 ± 0 |



Gambar 13 Grafik Pengaruh Kecepatan Putar Tool terhadap Kekuatan Lentur Sambungan las FSW

Gambar 13 menunjukkan grafik hubungan antara variasi kecepatan putar tool terhadap kekuatan lentur bahan HDPE pada proses FSW. Pada kecepatan putar tool 900 rpm merupakan nilai kekuatan lentur tertinggi sebesar 14.2 MPa, sedangkan nilai kekuatan lentur terendah sebesar 8.58 MPa yang terdapat pada kecepatan putar tool 2000 rpm. Hal ini dikarenakan dalam pengelasan pada kecepatan putar mesin 900 rpm mengalami masukan panas lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan putar mesin 2000 rpm mengalami masukan panas lebih tinggi. Dari uraian diatas dapat disimpulkan bahwa makin besar masukan panas makin besar pula penurunan sifat-sifat yang baik (H. Wiryosumarto., 1996). Hal ini disebabkan pada daerah lasan mengalami perubahan struktur mikro dan sifat mekanik akibat dari pengelasan.

Kekuatan bending hasil lasan spesimen dengan variasi kecepatan tool yang semakin meningkat menunjukkan hasil kekuatan bending yang menurun. Turunnya kekuatan bending tersebut terjadi karena kecepatan putaran tool yang terlalu tinggi yang mengakibatkan banyak material leleh (*molten material*) yang terlempar keluar dari sambungan pada saat proses pengadukan berlangsung. Hal ini menyebabkan munculnya kembali *voids* pada sambungan yang mengakibatkan menurunnya nilai kekuatan mekanik hasil lasan (Pirizadeh, 2013).

Variasi kecepatan putar tool 900 rpm mampu menahan beban maksimum sebesar 0.073 kN dan mendapatkan nilai kekuatan lentur tertinggi diantara tiga variasi yang ada yaitu sebesar 14.2 MPa atau sekitar 55% dari kekuatan lentur bahan dasarnya yaitu 25.8 MPa dan mampu menahan beban maksimum sebesar 0.142 kN. Sedangkan untuk variasi kecepatan putar tool 1500 rpm mampu menahan beban maksimum sebesar 0.053 kN dan mendapatkan nilai kekuatan lentur sebesar 9.69 MPa atau sekitar 37% dari kekuatan lentur bahan dasar HDPE. Untuk variasi yang terakhir yaitu 2000 rpm merupakan variasi yang mendapatkan nilai terendah hanya mampu menahan beban maksimum 0.044 kN dan kekuatan lentur sebesar 8.58 MPa atau 33.2% dari kekuatan lentur maksimum bahan dasarnya.

4. Kesimpulan

Setelah penulis melakukan penelitian dan menganalisis berdasarkan hasil pengujian berupa struktur makro, uji tarik dan uji bending terhadap hasil *friction stir welding* pada bahan *high density polyethylene* dengan menggunakan parameter tool berukuran 3 mm berulir, *feed rate* 20 mm/menit, *dept of plunge* sekitar 0.5 mm dan variasi kecepatan putar tool 900 rpm, 1500 rpm dan 2000 rpm, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Semakin tinggi kecepatan putar tool pada pengujian struktur makro, semakin banyak cacat yang terlihat. Variasi kecepatan putar tool 900 rpm mempunyai hasil yang paling sedikit memiliki cacat baik itu cacat rongga, flash ataupun kotoran. Berbeda dengan variasi kecepatan putar tool 1500 rpm dan 2000 rpm yang terlihat banyak terdapat cacat rongga/void, kotoran ataupun flash.
2. Semakin tinggi kecepatan putar tool, kekuatan tarik semakin rendah. Kekuatan tarik tertinggi didapatkan dari kecepatan putar tool 900 rpm sebesar 13.6 MPa sekitar 57% dari kekuatan tarik maksimum bahan HDPE yang mempunyai nilai 23.9 MPa. Sedangkan untuk nilai terendah didapat dari variasi 2000 rpm dengan nilai 2.69 MPa.
3. Semakin tinggi kecepatan putar tool, kekuatan lentur yang didapat semakin rendah. Kekuatan lentur tertinggi didapatkan dari kecepatan putar tool 900 rpm sebesar 14.2 MPa sekitar 55% dari kekuatan lentur bahan dasar dari HDPE yang mempunyai nilai 25.8 MPa. Sedangkan nilai terendah didapatkan dari kecepatan putar tool 2000 rpm dengan nilai 8.58 MPa.

Saran

1. Pada penelitian selanjutnya perlu adanya tambahan variasi diluar dari variasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu 900, 1500 dan 2000 rpm karena masih mempunyai potensi mendapatkan hasil pengelasan yang lebih baik.
2. Perlu adanya publikasi, ajakan ataupun mengadakan seminar-seminar untuk mempopulerkan metode penyambungan *friction stir welding* ini karena memang mempunyai keuntungan yang banyak yang bisa didapat dari pengelasan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Arici A., Sinmaz T. (2005). Effects of double passes of the tool on friction stir welding of polyethylene. *Journal of Materials Science* 40 (2005) 3313-3316.
- Ashari F., Subiyanto H. (2016). Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Kecepatan Putaran Spindle dengan Pin Tirus terhadap Impact Strength dan Metallography Polyethylene dengan Metode Friction Stir Welding.
- Azarsa E., Mostafapour A. (2013). Experimental Investigation on Flexural Behavior of Friction Stir Welded High Density Polyethylene Sheets. *Journal of Manufacturing Processes* 16, hal. 149-155
- Bilici M. K., Kurt B., Kurt H. (2017). Friction Stir Welded of High Density Polyethylene Sheets. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 2017, 4(9):363-370
- Mishra D., Mahto R. P., Sahu S. K., Pal S. K. (2019). Friction Stir Welding for Joining of Polymers.
- Payganeh GH, Mostafa A, Dadgar A, Ghasemi F, Saeidi BM. 2011. Effects of Friction Stir Welding Process Parameters on Appareances and Strength of Polypropylene Composite Welds. *International Journal of Physical Sciences*, 6 : 4595 – 4601.
- Pirizadeh, M., Azdast, T., Ahmadi, S.R., Shishavan, S.M., Bagheri, A. (2013). Friction Stir Welding of Thermoplastics Using a Newly Designed Tool, *Materials and Design*.
- Prabowo H., Triyono., Kusharjanta B. (2013). *Pengaruh Kecepatan Putaran Tool dan Pemanas Tambahan terhadap Kekuatan Mekanik Polypropylene Hasil Las Friction Stir Welding*. MEKANIKA, Volume 12 Nomor 1.
- Sahu S. K., Mishra D., Mahto R. P., Pal K. (2016). Friction Stir Welding of HDPE Sheets: A Study on the Effect of Rotational Speed.
- Setiyawan A., Irawan Y. S., Purnowidodo A. (2011). Pengaruh Temperatur Pelat Landasan Selama Proses Friction Stir Welding terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Lembaran HDPE. *Jurnal Rekayasa Mesin* Vol.2, No. 3 Tahun 2011 : 232-240

