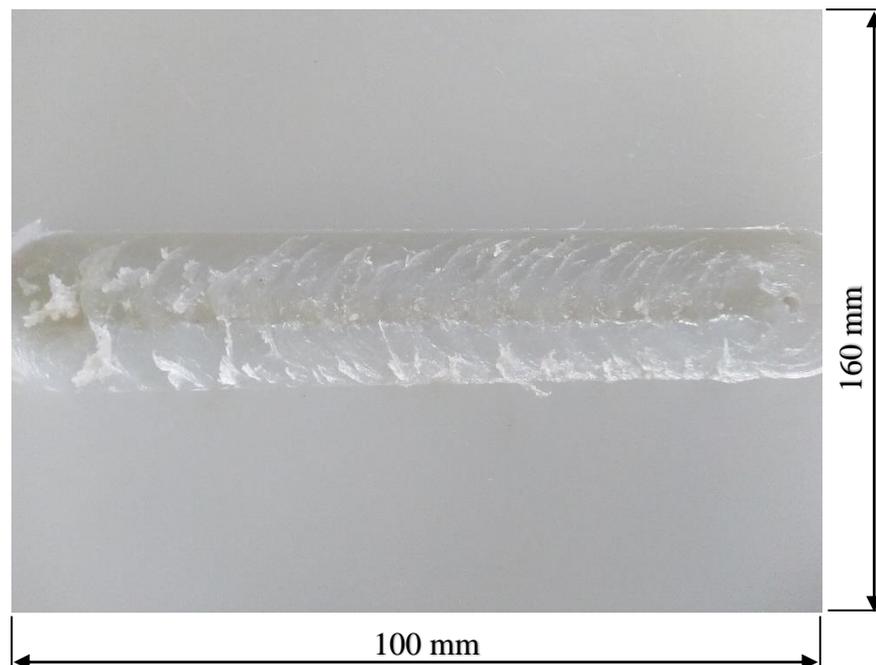


## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Hasil Pengelelasan FSW

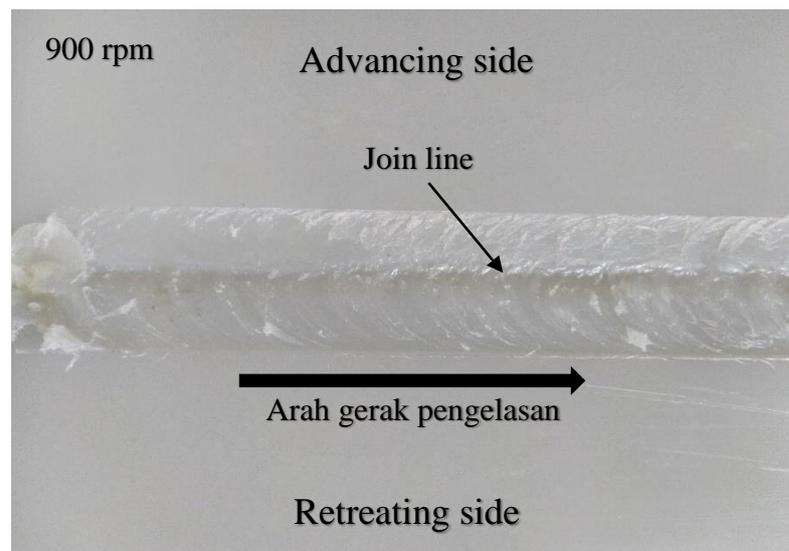
Sambungan dengan metode FSW yang menggunakan variasi kecepatan putaran tool dan parameter tetap seperti *feed rate* memakai 20 mm/menit, bentuk pin tool silinder ulir berdiameter 3 mm dan depth of plunge 0.5 mm, menghasilkan sambungan lasan yang berbeda-beda di tiap variasi yang digunakan, baik dilihat dari segi visual ataupun berdasarkan hasil uji kekuatan material. Hasil pengelasan dibagi menjadi 3 bagian yang akan menjadi pembahasan utama pada penelitian ini. Gambar 4.1 menunjukkan ukuran dimensi dari hasil pengelasan tiap variasi.



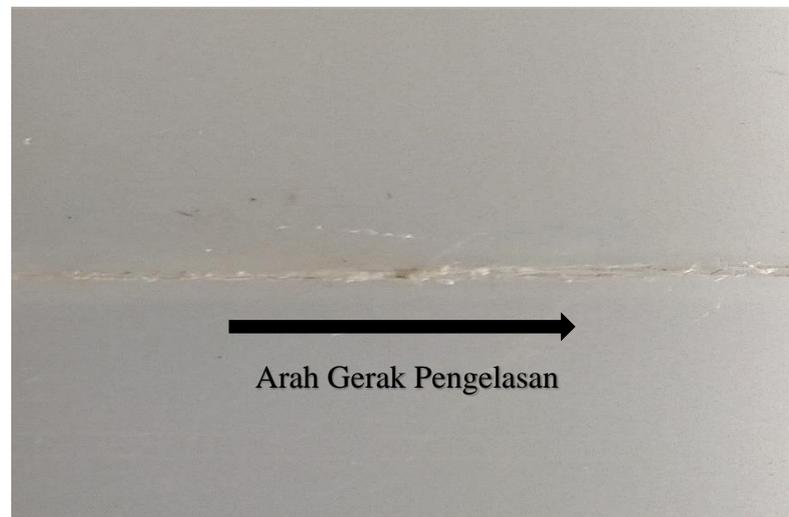
Gambar 4.1 Dimensi Bahan HDPE Hasil dari Lasan FSW

#### 4.1.1. Hasil Pengelasan dengan Kecepatan Putar Tool 900 rpm

Pengelasan dengan kecepatan putar tool 900 rpm merupakan hasil pengelasan terbaik pada penelitian kali ini, baik dari segi visual ataupun segi kekuatan mekaniknya. Pada gambar 4.2 akan ditunjukkan hasil pengelasan variasi kecepatan putar tool 900 rpm.



a. Hasil pengelasan tampak atas



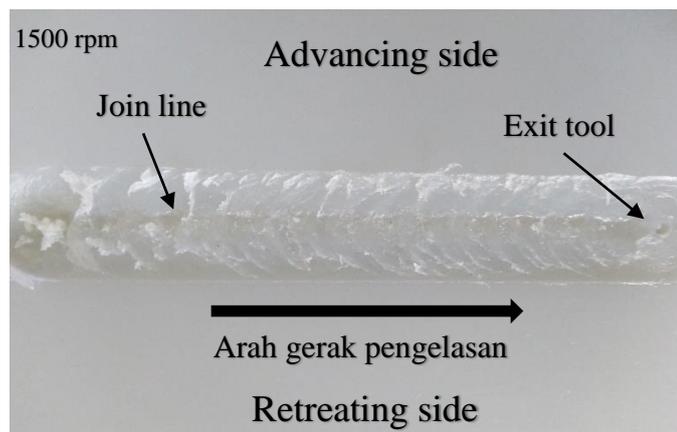
b. Hasil pengelasan tampak bawah

Gambar 4.2 Hasil Pengelasan FSW variasi 900 rpm

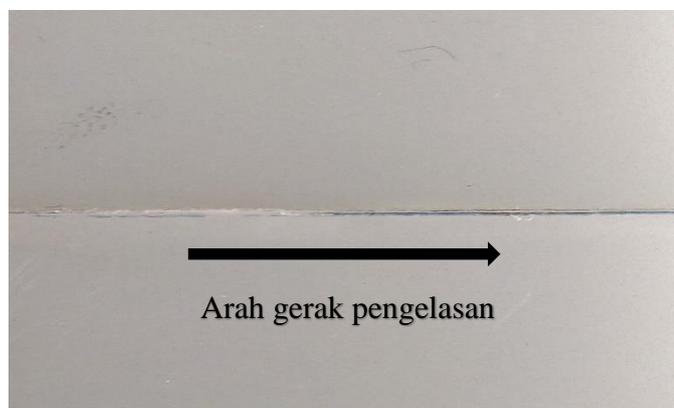
Hasil pengelasan dengan variasi kecepatan putar tool 900 rpm seperti yang terlihat pada gambar 4.2 menunjukkan hasil lasan yang bagus dan rapih di sepanjang jalur pengelasannya, itu karena pada putaran 900 rpm pengadukan antara shoulder dan pin tool dengan benda kerja bercampur dengan baik sehingga hasilnya terlihat baik.

#### 4.1.2. Hasil Pengelasan dengan Kecepatan Putar Tool 1500 rpm

Pada variasi ini hasil dari pengelasan dengan 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 yang akan dibahas setelah ini. Hasil dari pengelasan variasi kecepatan putar tool 1500 rpm ditunjukkan oleh gambar 4.3.



a. Hasil pengelasan tampak atas

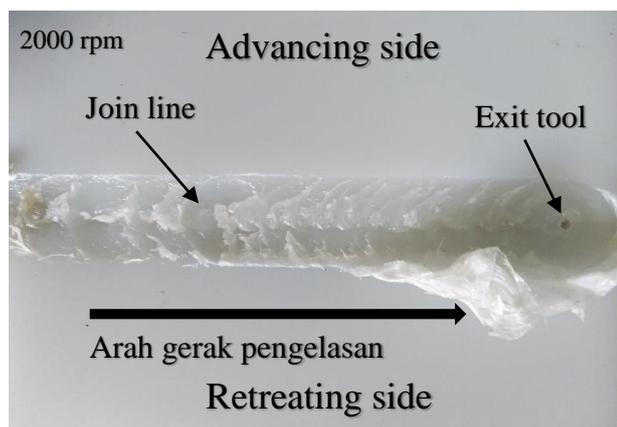


b. Hasil pengelasan tampak bawah

Gambar 4.3 Hasil pengelasan FSW variasi 1500 rpm

#### 4.1.3. Hasil Pengelasan dengan Kecepatan Putar Tool 2000 rpm

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 4.4 menunjukkan hasil dari pengelasan variasi putaran tool 2000 rpm.



a. Hasil pengelasan tampak atas



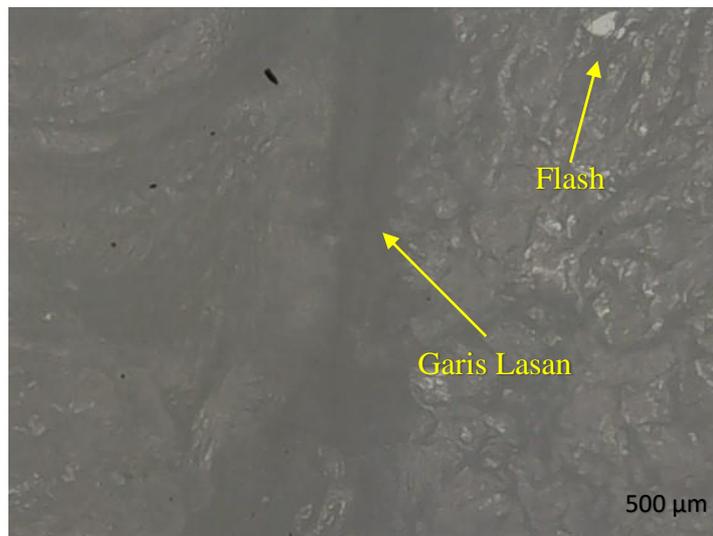
b. Hasil pengelasan tampak bawah

Gambar 4.4 Hasil pengelasan FSW variasi 2000 rpm

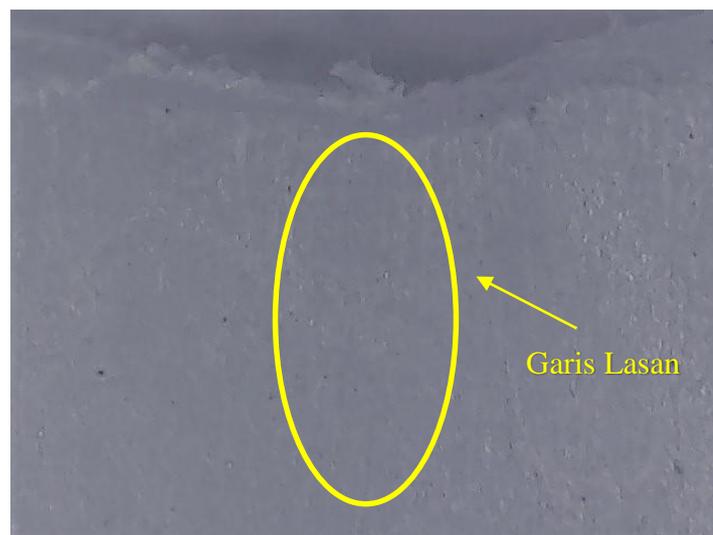
#### 4.2. Hasil Penelitian Struktur Makro

Hasil dari struktur makro ini berdasarkan penelitian menggunakan alat mikroskop optik usb merk CMP 022 dengan perbesaran 500x pada hasil lasan FSW pada bahan HDPE setelah dilakukan uji tarik dan uji bending. Berikut merupakan hasil pengamatan struktur makro menurut variasi yang ada, yaitu :

##### 1. Variasi Putaran Tool 900 rpm



a. Hasil struktur makro tampak atas

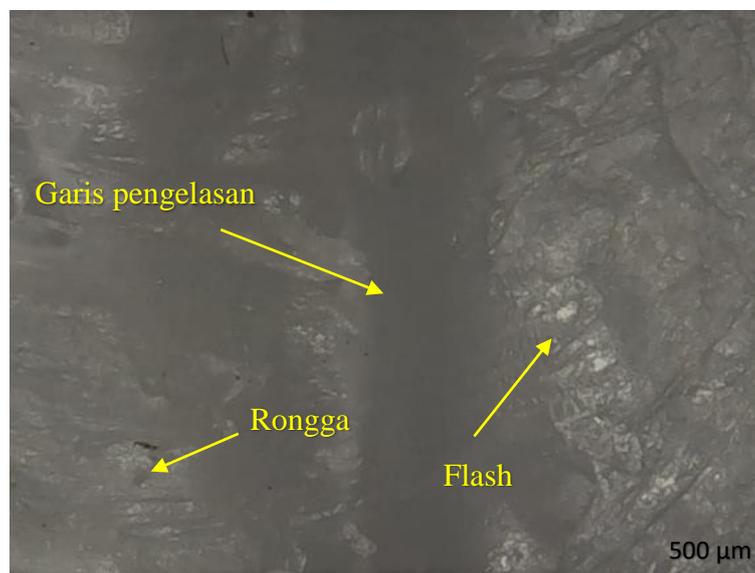


b. Hasil struktur makro tampak samping

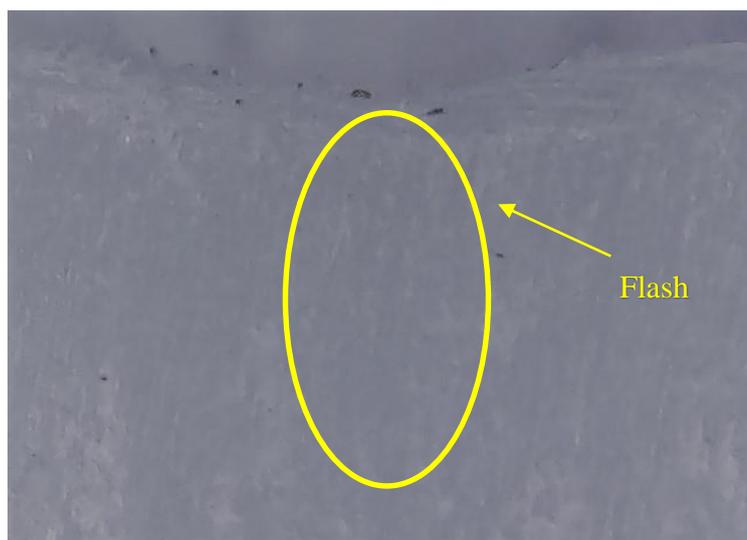
Gambar 4.5 Struktur Makro Hasil Lasan 900 rpm

Gambar 4.5 menunjukkan bentuk struktur makro variasi 900 rpm yang menghasilkan bentuk lasan yang konstan dari awal pengelasan sampai akhir proses pengelasan, tidak terdapat banyak cacat hanya muncul flash. Hal ini dikarenakan pada variasi kecepatan 900 rpm ini mendapatkan panas yang sesuai yang dihasilkan dari gesekan tool dengan benda kerjanya.

## 2. Variasi Putaran Tool 1500 rpm



a. Hasil struktur makro tampak atas

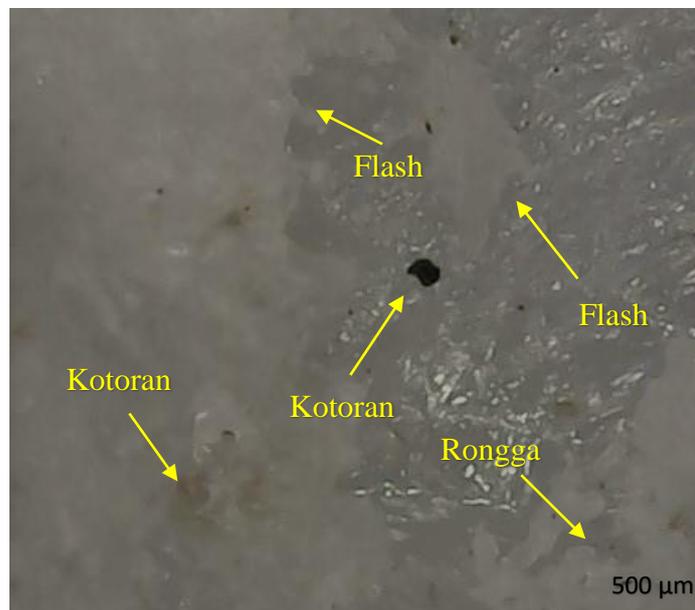


b. Hasil struktur makro tampak samping

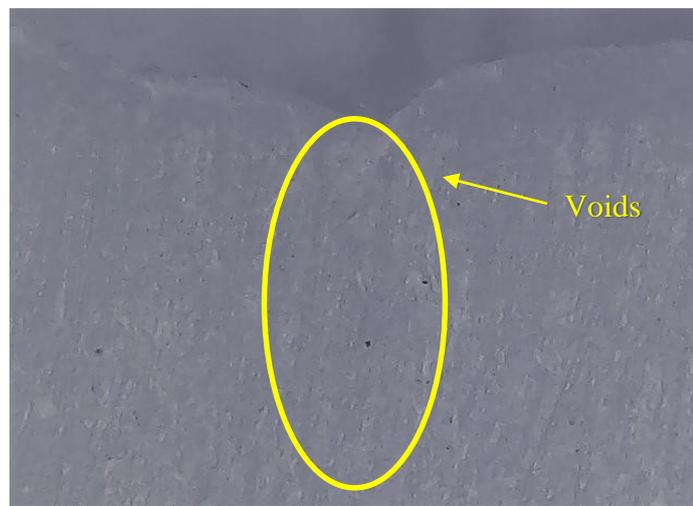
Gambar 4.6 Struktur Makro Hasil Lasan 1500 rpm

Gambar 4.6 menunjukkan hasil struktur makro dari variasi kecepatan 1500 rpm. Seperti pada variasi 900 rpm, pada variasi ini muncul kembali cacat flash tetapi pada beberapa titik. Penyebab adanya cacat flash disebabkan oleh panas yang berlebih yang dihasilkan pada saat proses pengelasan yang mengakibatkan lelehan dari material yang belum sempat menempel terlepas dari jalur pengelasan dan mengakibatkan adanya cacat jenis ini.

### 3. Variasi Putaran Tool 2000 rpm



a. Hasil struktur makro tampak atas



b. Hasil struktur makro tampak samping

Gambar 4.7 Hasil Struktur Makro Variasi 2000 rpm

Hasil pengamatan struktur makro pada Gambar 4.7 terlihat banyak sekali cacat *flash* hampir di seluruh permukaan pengelasan yang mengakibatkan tidak terlihatnya lagi jalur pengelasan seperti variasi 900 rpm maupun 1500 rpm. Hal ini disebabkan dari kecepatan putar tool yang sangat tinggi mengakibatkan rusaknya struktur dari bahan HDPE dan banyaknya molten/lelehan material yang seharusnya menempel pada jalur pengelasan untuk mengisi rongga, terlempar keluar jalur. Variasi ini merupakan variasi terburuk dari ketiga variasi yang ada karena terdapat banyak sekali cacat flash dan terdapat kotoran pada struktur makro nya.

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 menghasilkan cacat flash akibat keluarnya *molten material* dan menjadi gumpalan di area penyambungan. 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.

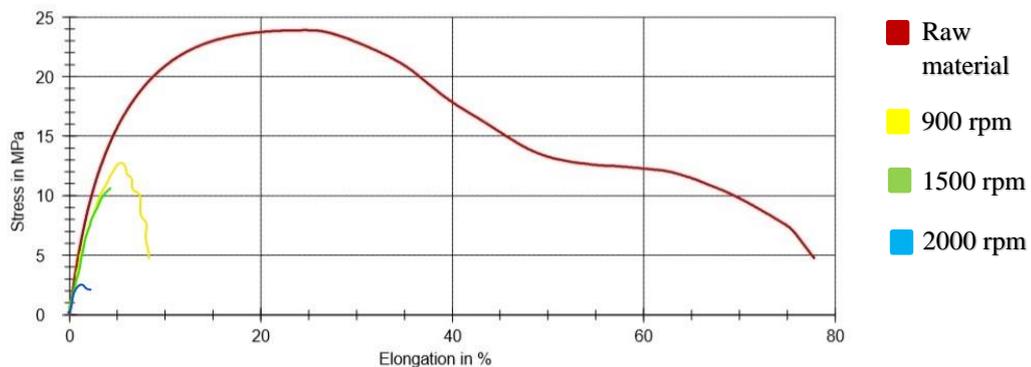
Pada penelitian ini variasi terbaik yang disarankan adalah variasi putaran kecepatan tool 900 rpm yang tidak banyak terdapat cacat dan hasil uji tarik maupun uji bending dari variasi ini merupakan yang terbaik dari ketiga variasi yang ada.

### 4.3. Uji Tarik / Tensile Test

#### 4.3.1 Hasil Uji Tarik

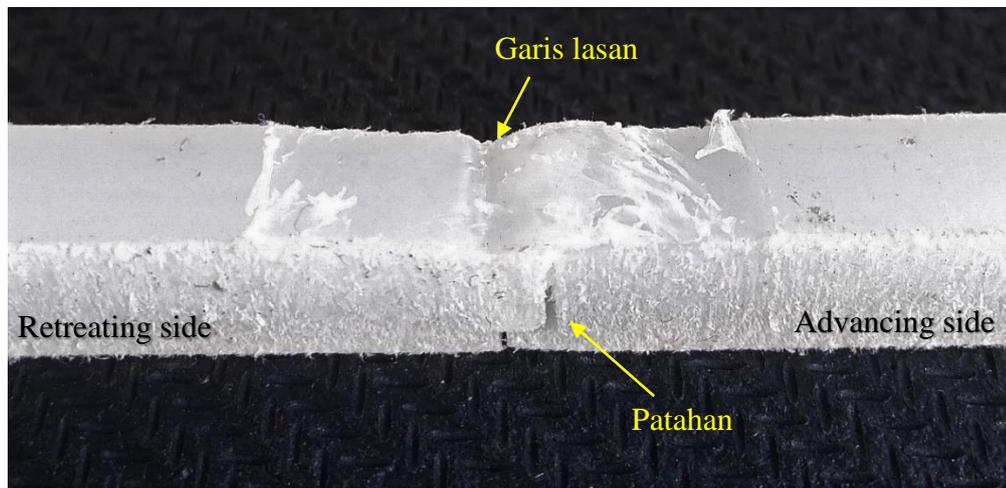
Prinsip dari pengujian tarik yaitu sampel atau benda uji dengan ukuran dan bentuk tertentu ditarik dengan beban kontinyu sambil diukur pertambahan panjangnya. Data yang didapat berupa perubahan panjang dan perubahan beban yang selanjutnya ditampilkan dalam bentuk grafik tegangan-regangan, sebagaimana ditunjukkan oleh tabel. Dalam pengujian tarik ini akan didapatkan besar beban maksimum pada material hasil pengelasan saat mengalami plastisitas hingga putus.

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 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Kurva Hasil Uji Tarik dengan Nilai Tegangan Maksimum dari Tiap Variasi Kecepatan Putar Tool

## 1. Hasil Penggunaan Variasi Putaran Tool 900 rpm



a. Permukaan spesimen setelah diuji tarik

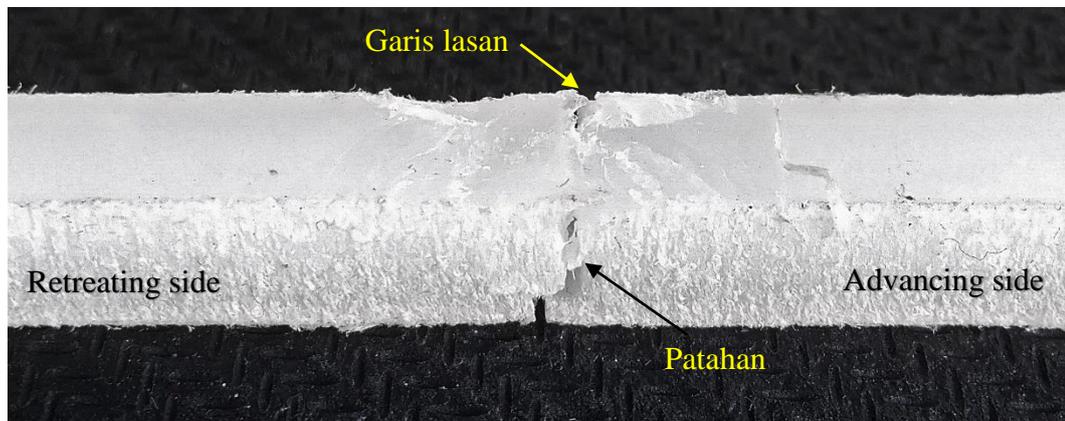


b. Patahan spesimen setelah diuji tarik

Gambar 4.9 Hasil Uji Tarik Variasi 900 rpm

Pada hasil pengujian tarik variasi putaran tool 900 rpm seperti yang terlihat pada Gambar 4.9 terlihat patahan terjadi pada pinggir garis lasan. Pada Gambar 4.9 tidak terlihat putus sampai terpisah dua bagian tetapi mesin uji sudah menganggapnya putus. Pada variasi ini hasil lasan terbilang cukup ulet seperti yang terlihat pada kurva yang menyerupai bahan dasar 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 %.

## 2. Hasil Penggunaan Variasi Putaran Tool 1500 rpm



a. Permukaan spesimen setelah diuji tarik



b. Patahan spesimen setelah diuji tarik

Gambar 4.10 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 %.

### 3. Hasil Penggunaan Variasi Putaran Tool 2000 rpm



a. Permukaan spesimen setelah diuji tarik



b. Patahan spesimen setelah diuji tarik

Gambar 4.11 Hasil Uji Tarik Variasi 2000 rpm

Pada variasi ini spesimen benar-benar patah terbagi dua seperti yang terlihat pada Gambar 4.11. 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.

#### 4. Raw Material



Gambar 4.12 Hasil Uji Tarik Raw Material

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.

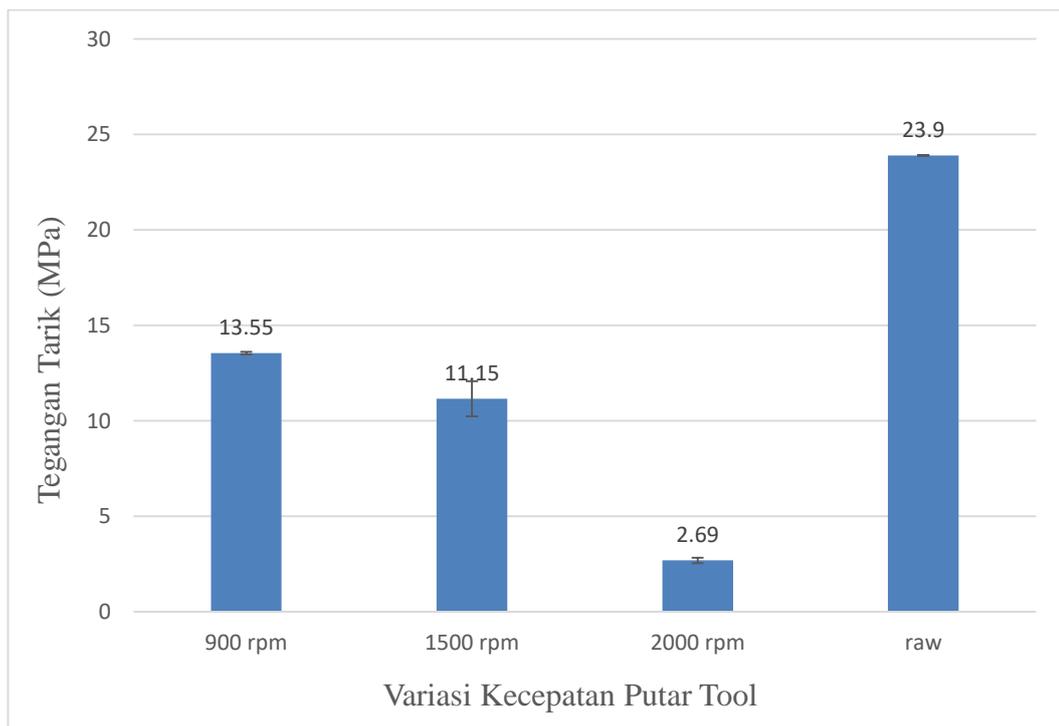
Pada Gambar 4.12 terlihat benda uji memanjang dari bentuk semula tanpa putus sedikitpun. Hal ini menandakan bahwa patahan yang terjadi pada bahan dasar HDPE bersifat ulet dan tidak getas dengan regangan maksimum yang didapatkan sebesar 78 % dan tegangan maksimum 23.9 MPa.

Pada tabel 4.1 menunjukkan data hasil pengujian tarik yang telah diperoleh dari pengujian spesimen untuk setiap variasi pengelasan dan hasil uji tarik raw material dari bahan HDPE itu sendiri.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Tarik Standard ASTM D638 pada HDPE

RPM	UTS		Kekuatan tarik rata-rata (MPa)	Regangan maksimum	Modulus elastisitas
	$\sigma_1$	$\sigma_2$			
900	13.5	13.6	$13.6 \pm 0.05$	0.061	0.51
1500	11.8	10.5	$11.2 \pm 0.65$	0.038	0.53
2000	2.59	2.79	$2.69 \pm 0.10$	0.046	0.21
raw	23.9	23.9	$23.9 \pm 0$	0.78	0.54

Dari tabel diatas bisa terlihat nilai yang didapat dari tegangan maksimum atau *Ultimate Tensile Strength* (UTS), kekuatan tarik rata-rata dan nilai regangannya. Kemudian dari Tabel 4.1 diatas akan diuraikan dalam bentuk grafik yang akan ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan 4.14.

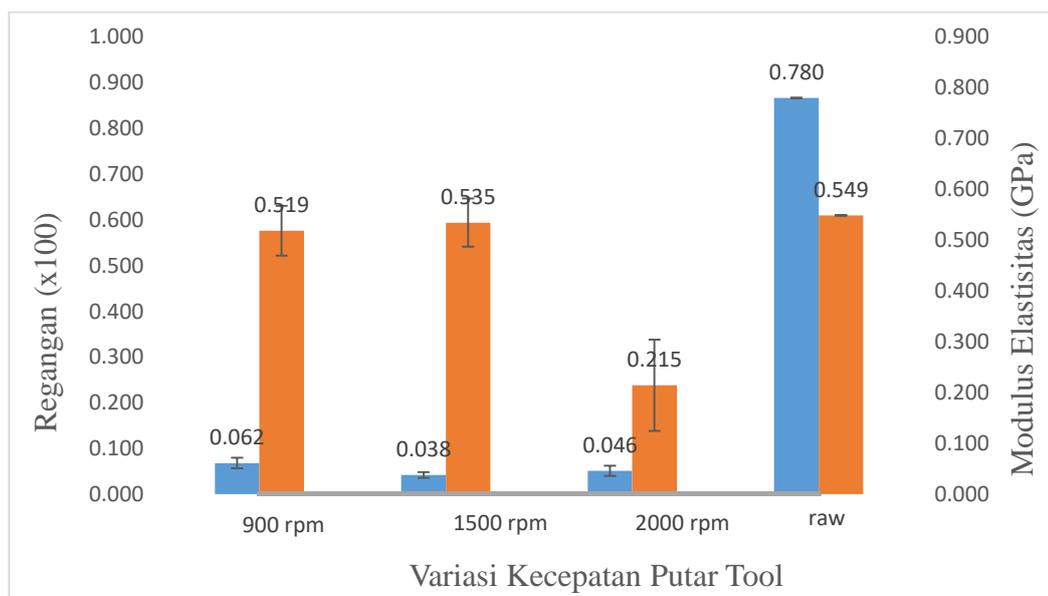


Gambar 4.13 Grafik tegangan pada hasil pengujian tarik FSW dengan variasi kecepatan putar tool

Dari Gambar 4.16 diatas terlihat dengan jelas bahwa tegangan maksimum atau UTS terbesar terdapat pada variasi kecepatan putar tool 900 rpm dengan nilai 13.6 MPa, kemudian berikutnya putaran tool 1500 rpm dengan nilai 11.2 MPa,

dan putaran tool 2000 rpm memiliki tegangan maksimum terkecil dari semua variasi yang ada dengan nilai 2.69 MPa. Sedangkan untuk raw material HDPE mempunyai nilai tegangan maksimum 23.9 MPa. Pada penelitian ini, menurut data yang didapatkan yang paling mendekati nilai dari kekuatan tarik raw material adalah variasi putaran tool yang menggunakan kecepatan 900 rpm dengan nilai 13.6 MPa atau sekitar 57% dari bahan dasarnya. Sedangkan hasil terburuk didapatkan dari variasi putaran tool dengan kecepatan 2000 rpm dengan nilai 2.69 MPa atau hanya sekitar 11% dari kekuatan tarik bahan dasarnya.

Penelitian yang sudah dilakukan sahu dkk (2017) ialah 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 berbeda karena pada penelitian ini berfokus pada pengaruh kecepatan putar tool sedangkan sahu dkk (2017) menggabungkan beberapa parameter yang berbeda dan mencari yang terbaik diantara variasi-variasi yang ada.



Gambar 4.14 Grafik regangan dan modulus elastisitas pada hasil pengujian tarik FSW dengan variasi kecepatan putar tool

Gambar 4.14 menunjukkan grafik nilai regangan dan modulus elastisitas dari pengelasan FSW dengan 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%.

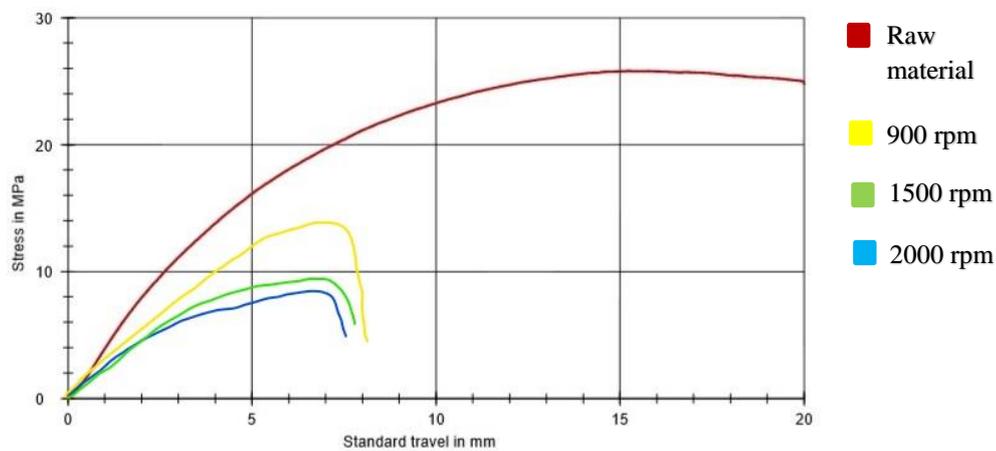
Nilai regangan berbanding lurus dengan nilai tegangannya dan berbanding terbalik dengan modulus elastisitas. Regangan tertinggi didapatkan dari variasi kecepatan putar tool 900 rpm sebesar 6.2% dan pada pembahasan sebelum ini tegangan tertinggi juga didapatkan dari variasi yang sama yaitu variasi kecepatan putar tool 900 rpm. Hal ini membuktikan bahwa nilai regangan berbanding lurus dengan nilai tegangannya.

#### **4.3.2. Pengaruh Kecepatan Putar Tool pada Kekuatan Tarik**

Hasil dari proses FSW dipengaruhi oleh beberapa parameter. Kecepatan putar *spindle/tool* adalah faktor utama yang bertanggung jawab untuk menghasilkan panas dan pengadukan mekanis. Pada kecepatan putar tool 900 rpm, kekuatan tarik yang diperoleh adalah 13.6 MPa. Kekuatannya semakin menurun seiring bertambahnya kecepatan rotasi putar tool. Pada kecepatan putar tool 1500 rpm kekuatan tarik yang didapatkan sebesar 11.2 MPa. Dengan meningkatnya kecepatan rotasi, gesekan antara pin dan media meningkat yang menghasilkan suhu yang lebih tinggi. Peningkatan lebih lanjut dalam kecepatan rotasi 2000 rpm, menghasilkan suhu yang sangat tinggi yang sangat merusak struktur material dan dibuktikan dengan hasil uji tarik terendah yang didapatkan diantara tiga variasi kecepatan tadi yaitu hanya sebesar 2.69 MPa. Suhu yang sangat tinggi membuat bahan HDPE mengalami fluktuasi temperatur karena bahan termoplastik memiliki konduktivitas termal yang rendah.

#### 4.4. Uji Bending / Uji Lentur / Flexural Test

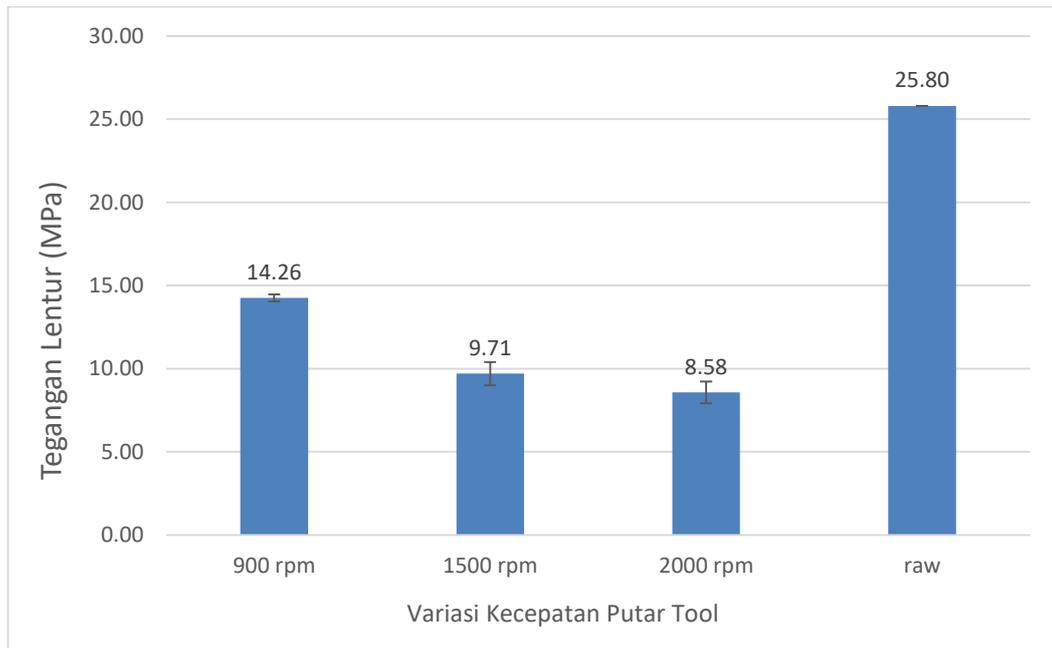
Pengujian kekuatan bending dilakukan untuk mengetahui kemampuan sambungan dalam menahan beban dalam arah tegak lurus permukaan sambungan. Beban yang diberikan pada sambungan merupakan beban statik. Pengujian dilakukan berdasarkan standar ASTM D 790. Hasil dari proses pengujian bending yang dilakukan 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 4.2.



Gambar 4.15 Kurva Hasil Uji Bending dengan nilai kekuatan lentur Maksimum dari Tiap Variasi Kecepatan Putar Tool

Tabel 4.2 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



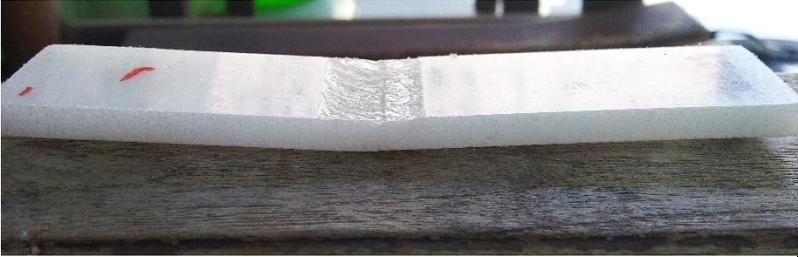
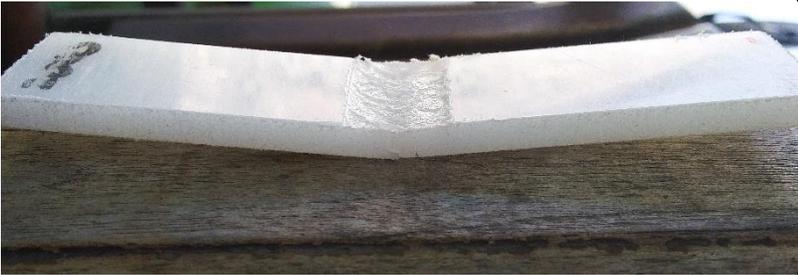
Gambar 4.16 Grafik Pengaruh Kecepatan Putar Tool terhadap Kekuatan Lentur Sambungan las FSW

Gambar 4.16 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 masukkan panas lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan putar mesin 2000 rpm mengalami masukkan panas lebih tinggi. Dari uraian diatas dapat disimpulkan bahwa makin besar masukkan 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 *void* pada sambungan yang mengakibatkan menurunnya nilai kekuatan mekanik hasil lasan (Pirizadeh, 2013).

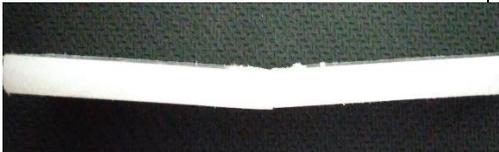
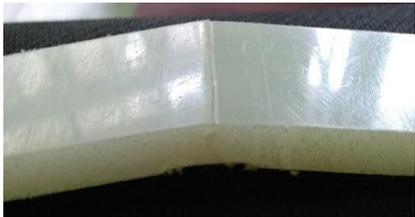
Tabel 4.3 Pengamatan Visual Spesimen Bending Face

Parameter	Pengamatan Visual
900 rpm	
1500 rpm	
2000 rpm	

Berdasarkan hasil pengamatan visual setelah dilakukan uji bending seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 pada sisi root nya bahwa semua variasi ketika diberi beban statik dari atas, pada bagian sisi root nya mengalami patah di setiap variasi. Hal ini disebabkan karena sisi permukaan root merupakan titik terlemah

pada pengelasan FSW dan tidak bisa menerima beban yang diberikan saat pengujian berlangsung.

Tabel 4.4 Pengamatan Visual dari samping dan bawah lasan (*root*)

Variasi	Root	Samping
900 rpm		
1500 rpm		
2000 rpm		

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.

