

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

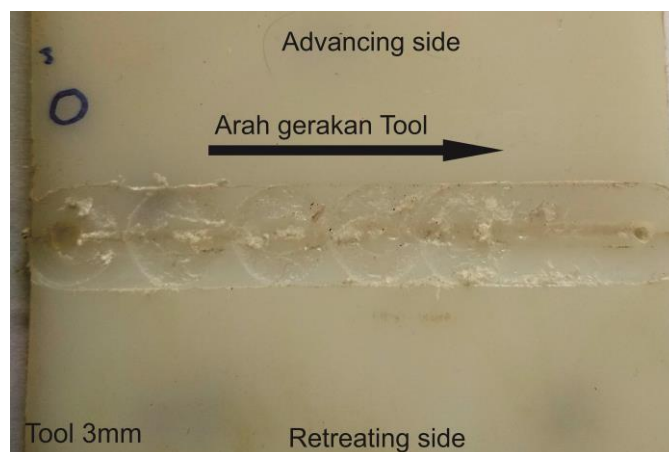
4.1 Hasil Pengelasan FSW

Sambungan dengan metode *friction stir welding* menggunakan variasi bentuk pin tool dan parameter pendukung yang dibuat sama seperti laju pengelasan dibuat 0,24-0,33 mm/s atau sekitar 14 mm/menit, kecepatan putar *tool* disetel pada nilai 1560 rpm dan *dept of plunge* dibuat 0,5 mm, menghasilkan sambungan yang berbeda-beda baik dari segi visual ataupun dari segi keekuatan material saambungan itu. Hasil dari pengelasan dibagi menjadi dua bentuk perbedaan diameter pin yaitu diameter 3mm dan 4mm. Adapun pembagiannya dijelaskan di bawah ini.

4.1.1 Hasil Pengelasan dengan Diameter Pin 3 mm

Pengelasan dengan menggunakan pin diameter 3 mm dibedakan menjadi tiga bentuk pin tool (silinder, silinder ulir dan segitiga) yang akan dipaparkan dibawah ini.

1. Hasil Las Pin Bentuk Silinder

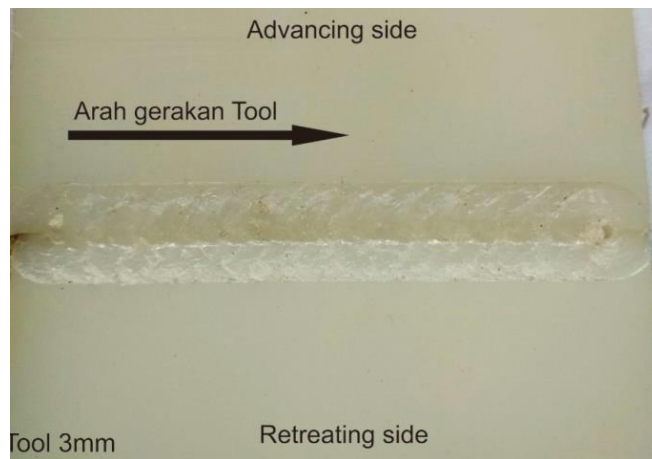


Gambar 4.1 Hasil pengelasan pin silinder 3mm

Hasil pengelasan dengan menggunakan pin silinder seperti pada Gambar 4.1 diatas menunjukkan hasil visual lasan yang kurang bagus dikarenakan terlihat seperti ada gelombang bekas gesekan *shoulder* yang tidak konstan pada

permukaan lasan. Hal itu terjadi kemungkinan karena kurangnya panas yang terjadi pada gesekan shoulder, hal ini dikuatkan karena pada saat akhir proses hasil lasan terlihat bagus, dan panas yang dihasilkan dari awal proses 28°C- sekitar 35°C.

2. Hasil Las Pin Bentuk Silinder Ulir

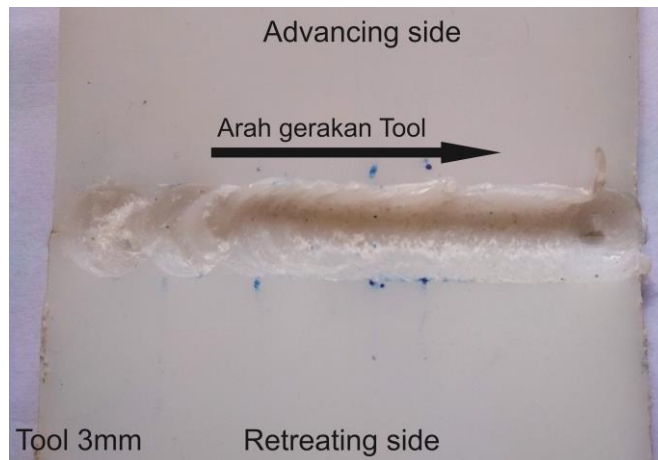


Gambar 4.2 Hasil pengelasan pin silinder ulir 3mm

Hasil pengelasan menggunakan pin bentuk silinder ulir seperti yang terlihat pada Gambar 4.2 terlihat bagus. Karena dari awal proses pengelasan sampai akhir terlihat rapih dan konstan, hal ini dibuktikan dengan percobaan yang lainnya dengan hasil yang sama. Panas yang didapat dari penggunaan pintool ini samapai sekitar 40°C.

3. Hasil Las Pin Bentuk Segitiga

Hasil dari pengelasan dengan menggunakan pin bentuk segitiga memiliki bentuk visual yang bisa dikatakan buruk, karena permukaan lasan tidak rata seakan-akan pergerakan dari tool semakin kedalam, material lelehan terlempar keluar dari garis lasan seperti yang terlihat pada Gambar 4.3. Mungkin hal ini dikarenakan bentuk pin yang segitiga sehingga setiap sisinya melempar lelehan hasil pengadukan dari pin. Ketika panas bertambah atau pengelasan mendekati akhir proses hasil dari penggunaan pin ini semakin kacau dan panas yang dihasilkan oleh pin pun tinggi mencapai angka 45°C.



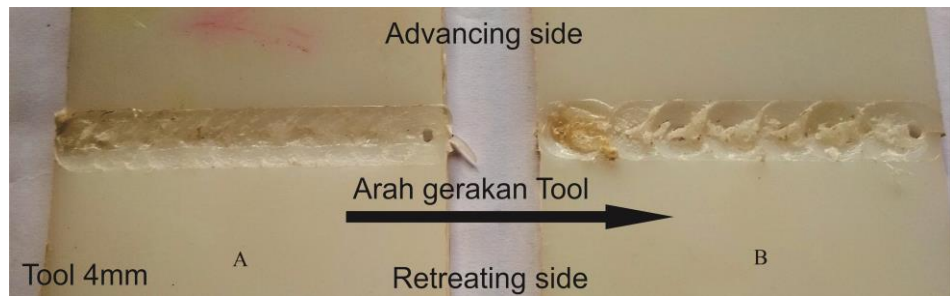
Gambar 4.3 Hasil Pengelasan Pin Segitiga 3mm

4.1.2 Hasil Pengelasan dengan Diameter Pin 4 mm

Pada pengelasan dengan menggunakan pin yang berdiameter 4 mm menghasilkan bentuk visual yang sangat berbeda dari setiap toolnya dan panas yang dihasilkan pun sangat berbeda, pada pengelasan dengan menggunakan *tool* diameter 4 mm ini memiliki panas yang lebih dari pin yang berdiameter 3 mm dan hasil lasan cenderung tidak konstan. Lebih jelasnya akan dijelaskan dibawah ini.

1. Hasil Las Pin Bentuk Silinder

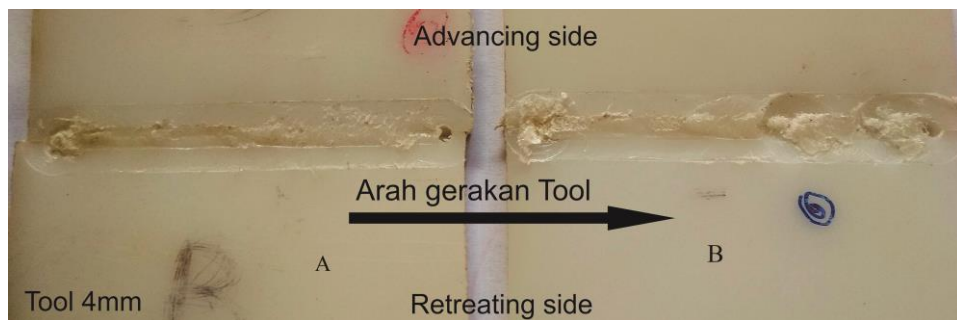
Hasil dari pengelasan dengan menggunakan pin berbentuk silinder mempunyai bentuk visual yang cukup bagus, tapi dalam kesempatan yang lain terlihat kurang bagus. Pada Gambar A pada Gambar 4.4 memiliki bentuk visual yang hampir mirip dengan hasil pengelasan dengan menggunakan pin berdiameter 3 mm dengan bentuk silinder ulir, hasil gesekan dari *shoulder* terlihat konstan walau *flasnya* masih terlihat agak kasar dari hasil pin diameter 3mm. Sedangkan gambar B terlihat berlubang dan membentuk gelombang secara kontinyu dan banyak flash yang terbuang keluar. Panas yang dihasilkan oleh pin tool sampai kahir proses sebesar 40-45°C.



Gambar 4.4 Hasil pengelasan pin silinder 4mm

2. Hasil Las Pin Bentuk Silinder Ulir

Pada pengelasan dengan menggunakan pin berbentuk silinder ulir memiliki bentuk visual yang sedikit berbeda dari yang lainnya karena pada pengelasan ini lelehan hasil adukan dari pin membentuk seperti hasil lasan material logam pada umumnya sangat rapi dan tidak menghasilkan flas dan hasil lasan pun terlihat konstan pada percobaan lainnya, seperti yang terlihat pada Gambar A 4.5. Adapun pada Gambar B pada saat akhir proses menunjukkan adanya gelombang itu terjadi karena adanya gangguan dari gerak meja mesin milling. Panas yang dihasilkan sekitar 30-35°C.

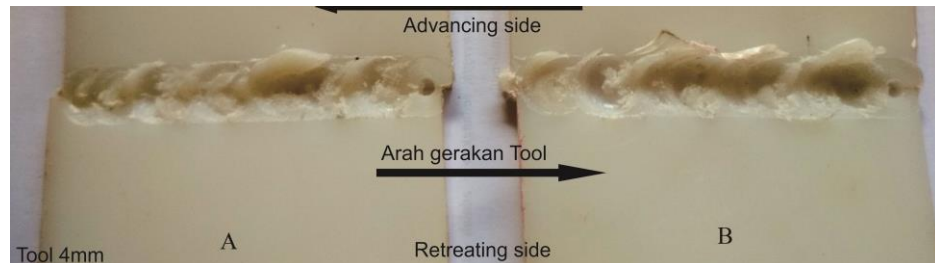


Gambar 4.5 Hasil pengelasan pin silinder ulir 4mm

3. Hasil Las Pin Bentuk Segitiga

Pada pengelasan dengan menggunakan pin berbentuk segitiga menghasilkan bentuk visual yang tidak jauh berbeda dengan hasil pengelasan menggunakan bentuk segitiga yang berdiameter 3 mm seperti pada Gambar 4.6. Banyak flash yang terbuang dan hasil lelehan material terlempar keluar. Hanya saja panas yang dihasilkan pada penggunaan pin

ini lebih panas dari yang berdiameter 3 mm yakni mencapai 78°C sampai akhir proses pengelasan.



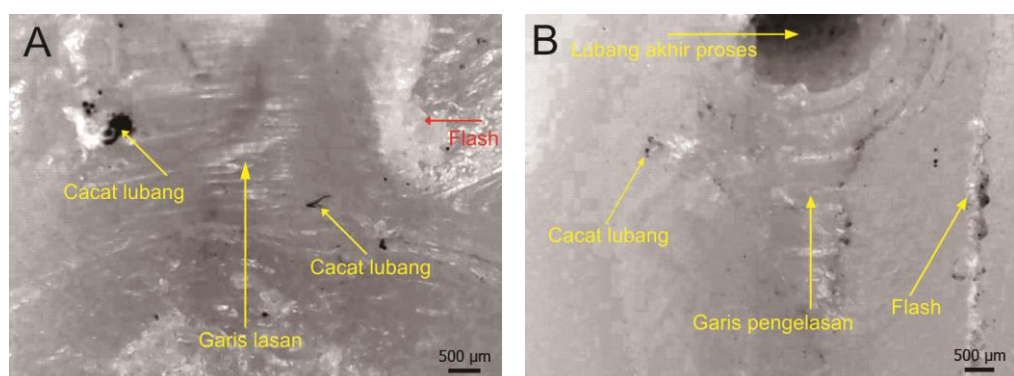
Gambar 4.6 Hasil pengelasan pin segitiga 4mm

4.2 Hasil Penelitian Struktur Makro

Hasil dari penelitian ini merupakan keterangan dari bentuk struktur makro pada hasil pengelasan friction stir welding dengan variasi bentuk pin tool dengan menggunakan material high density polyethylene (HDPE). Adapun hasilnya sebagai berikut :

1. Penggunaan Pin Silinder Berdiameter 3mm

Pada percobaan penggunaan tool silinder yang berukuran 3 mm, menghasilkan bentuk struktur lasan seperti yang terlihat pada Gambar 4.7 A dan B dimana pada Gambar A menunjukkan hasil awal proses pengelasan dan Gambar B menunjukkan hasil pengelasan di akhir proses pengelasan.



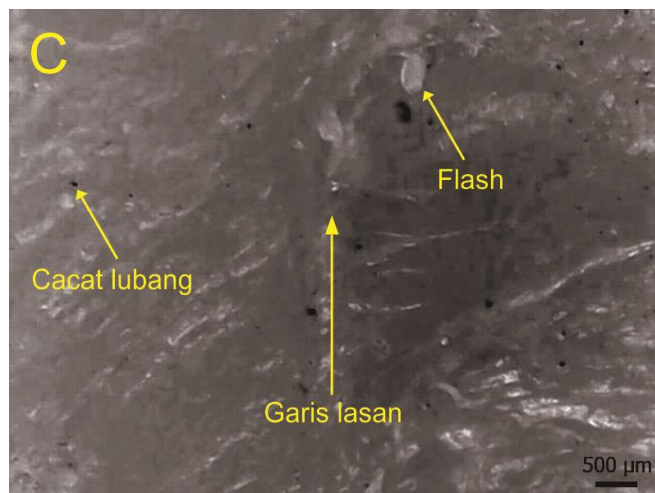
Gambar 4.7 Struktur makro hasil lasan pin silinder berukuran 3mm

Seperti yang terlihat pada Gambar 4.7(A) dimana merupakan hasil lasan di daerah awal pengelasan yang menunjukkan adanya beberapa lubang dan material lelehan belum sempat menempel pada bahan dasar sudah membeku. Hal ini kemungkinan terjadi karena terlalu cepatnya gerakan tool mesin atau kurangnya panas dari pin itu sendiri karena baru berjalan.

Pada Gambar 4.7(B) menunjukkan bahwa hasil lasan terlihat bagus tidak terdapat cacat, yang terlihat adalah material lelehan terbentuk seperti dilakukan pengelasan dengan bahan tambah dan hampir tidak adanya flas yang terbang. Kemungkinan terjadi demikian karena tool yang sudah memanaskan sehingga menghasilkan lelehan yang baik.

2. Penggunaan Pin Silinder Ulir Berdiameter 3mm

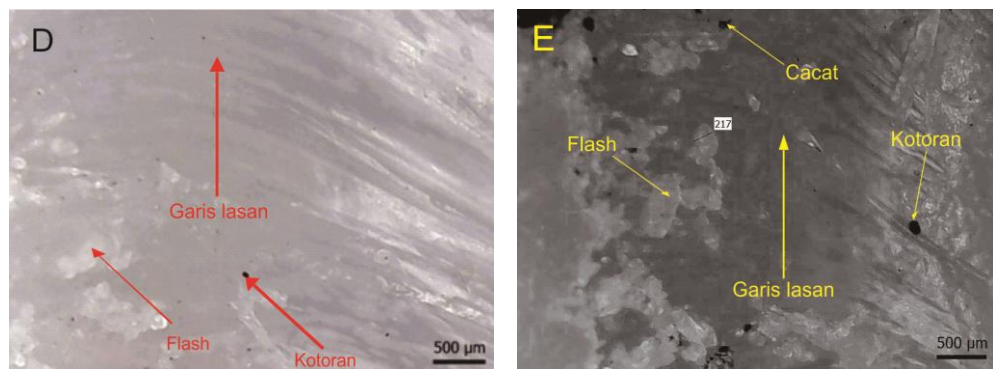
Dari hasil lasan yang didapat dari penggunaan pin tool silinder ulir yang berdiameter 3mm menghasilkan bentuk lasan yang konstan, dari awal proses sampe akhir proses pengelasan yang terlihat seperti pada Gambar 4.8 dimana menunjukkan hasil lasan yang cukup bagus tidak terdapat cacat, hanya sedikit *flash* yang dihasilkan oleh proses penyambungan. Ini terjadi kemungkinan karena pada penggunaan pin tool silinder ulir berdiameter 3mm ini mendapatkan hasil panas yang sesuai dengan kecepatan gerak meja.



Gambar 4.8 Struktur makro hasil lasan pin silinder ulir 3mm

3. Penggunaan Pin Segitiga Bersisi 3mm

Hasil pengelasan dari percobaan penggunaan bentuk pin tool segitiga yang berukuran 3mm terbilang mendapat hasil lasan yang paling buruk, dari awal proses pun hasil proses penyambungan sudah membentuk lelehan yang terbuang keluar dari area penyambungan dan membentuk flash berupa gumpalan-gumpalan seperti yang terlihat pada Gambar 4.9.D dan semakin lama proses ini diteruskan maka akan menghasilkan lasan yang buruk seperti yang terlihat pada Gambar 4.9.E yang merupakan gambar hasil proses akhir pengelasan.



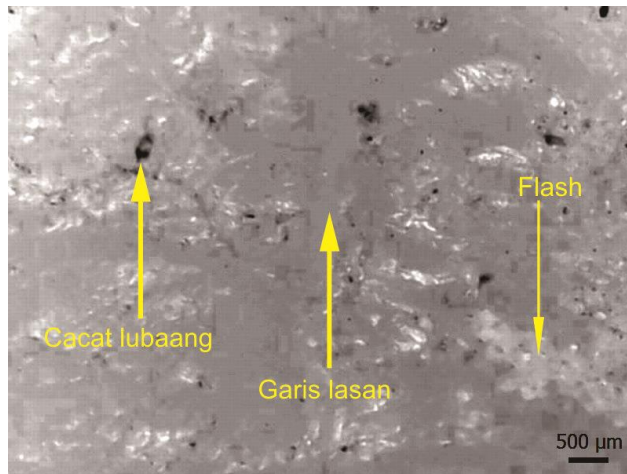
Gambar 4.9 Struktur makro hasil lasan pin segitiga 3mm

Pada Gambar 4.9.E terlihat semakin banyaknya flash yang terbuang keluar dari dapur pengelasan dan membentuk serpihan atau gumpalan yang merusak lelehan dalam dapur pengelasan dan membawa lelehan keluar dari area penyambungan. Di akhir proses pengelasan juga nampak seperti adanya gerakan semakin menekannya tool dalam mengaduk bahan dasar yang ditunjukkan dengan semakin dalamnya dan semakin banyaknya material yang terbuang keluar. Hal ini terjadi kemungkinan karena panas yang dihasilkan oleh tool segitiga sangat tinggi dan dengan pinnya yang berbentuk segitiga memungkinkan setiap sisinya mendorong keuar *molten* dari hasil pengadukan.

4. Penggunaan Pin Silinder Berdiameter 4mm

Pada percobaan bentuk pin tool silinder yang berdiameter 4mm menghasilkan bentuk permukaan yang konstan seperti yang terlihat pada

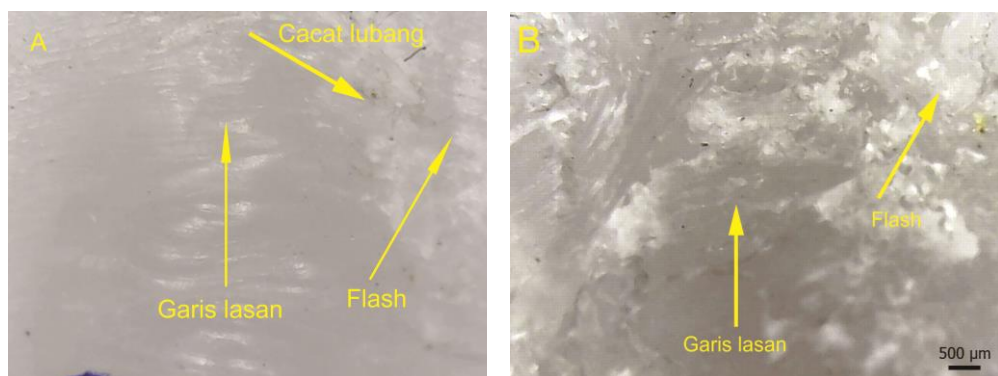
Gambar 4.10 dimana menunjukkan garis lasan yang hampir tertutup oleh semua material lelehan hasil pengadukan dan terdapat sedikit cacat yang berupa lubang yang tidak sampe dalam alias hanya dipermukaan saja. Ini terjadi kemungkinan karena terlalu cepatnya gerak lintas tool dan panas yang dihasilkan oleh pin berbentuk silinder ini relatif kecil.



Gambar 4.10 Struktur makro hasil lasan pin silinder 4mm

5. Penggunaan Pin Silinder Ulir Berdiameter 4mm

Dari hasil lasan yang didapat dari penggunaan bentuk pin tool silinder ulir yang berdiameter 4mm menghasilkan bentuk permukaan lasan yang tidak konstan tetapi mendapat lasan yang cukup baik terlihat pada Gambar 4.11



Gambar 4.11 Struktur makro hasil lasan pin silinder ulir 4mm

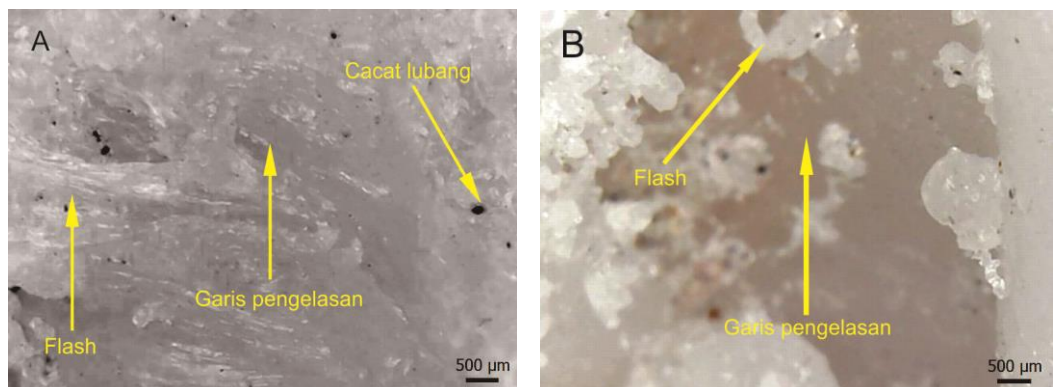
Dimana pada Gambar 4.11 (A) menunjukkan hasil lasan yang terdapat lelehan yang kurang menempel pada bahan dasar dan terlihat adanya

gelombang material lelehan. Hal ini terjadi kemungkinan karena belum panasnya tool pada saat awal proses pengelasan. Sedangkan pada Gambar 4.11(B) terlihat membentuk ketidak aturan lelehan tapi tidak menghasilkan banyak flas yang terbang sehingga hasil lelehan seutuhnya diaduk dan diratakan oleh tool yang berputar.

Pada penggunaan pin berbentuk silinder ulir ini keseluruhan memang menghasilkan lasan yang cukup baik hanya saja tidak bertahan sampai kahir, di bagian akhir proses, sangat mendekati ujung tepatnya menunjukkan hasil yang sangat berbeda dari proses awal. Hal ini terjadi kemungkinan karena pada akhir proses bahan dasar menerima panas yang cukup tinggi dari pada awal proses pengelasan.

6. Penggunaan Pin Segitiga Berukuran 4mm

Hasil pengelasan dari percobaan penggunaan variasi bentuk pin tool segitiga yang berukuran 4mm tidak jauh berbeda dengan hasil penggunaan pin tool segitiga yang berukuran 3mm, pada hasil dari penggunaan pin segitiga yang berukuran 4mm malah jauh lebih parah dimana dari proses awal sudah menunjukkan hasil adukan yang kurang baik seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.12(A) yang menunjukkan permukaan yang tidak rata.



Gambar 4.12 Struktur makro hasil lasan pin segitiga 4mm

Pada akhir proses pengelasan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12(B) menunjukkan hasil pengelasan yang sangat buruk dimana hampir semua material hasil aduk terlempar keluar yang mengakibatkan hasil sambungan

seperti hasil pemotongan dan menghasilkan gumpalan-gumpalan yang besar sehingga mengakibatkan lelehan tidak diam di area penyambungan selain itu bentuknya yang segitiga juga yang memungkinkan setiap sisinya mendorong lelehan keluar dari daerah penyambungan.

Dari semua hasil penelitian struktur makro diatas dapat diketahui bahwa penggunaan variasi bentuk *pin tool* sangat mempengaruhi hasil dari permukaan sambungan. Hasil dari penggunaan bentuk pin tool silinder ulir yang berukuran 3mm mendapatkan hasil permukaan yang rata dimana pada hasil lasan struktur makronya terlihat tidak terdapat cacat dan menghasilkan permukaan yang rata serta hasil yang konstan pada semua daerah proses pengelasan. Sedangkan hasil yang tidak rata didapat dari penggunaan bentuk pin tool segitiga baik yang 3mm ataupun 4mm keduanya memiliki banyak cacat dan membentuk gumpalan-gumpalan seperti kristal, rongga-rongga atau lubang dan membuang material keluar dari daerah sambungan yang disebabkan panas yang berlebih yang dihasilkan oleh bentuk pin tool segitiga. 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.

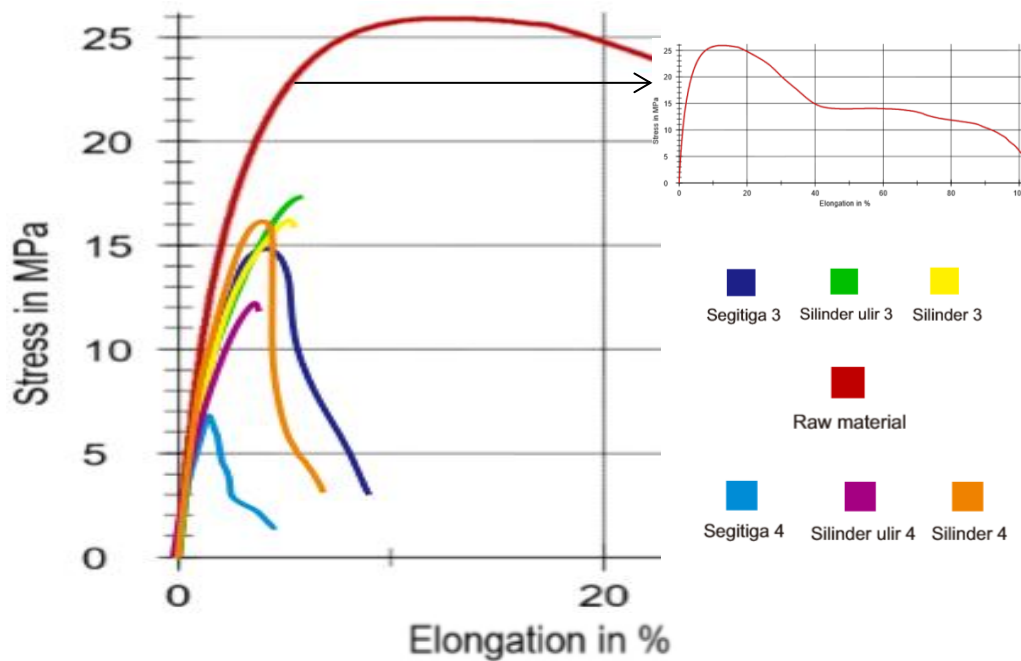
Putaran tool yang terlalu tinggi serta penambahan pemanas akan meningkatkan panas material akibat gesekan antara material dengan *pin tool* sehingga material menjadi terlalu lunak. Material yang terlalu lunak mengakibatkan banyak lelehan material yang terlempar keluar dari zona las pada saat proses pengadukan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

cacat, sehingga kekuatan sambungan akan semakin meningkat (Triyono dkk. 2015).

4.3 Hasil Pengujian Tarik

Hasil pengujian tarik pada penelitian ini menunjukkan kelakuan tarikan dari sambungan HDPE dengan metode FSW dalam bentuk kurva atau grafik tegangan-regangan berdasarkan sifat-sifatnya. Pada Gambar 4.13 menunjukkan bentuk kurva dari nilai tegangan tertinggi dari setiap pengujian tarik pada variasi bentuk *pin tool*. Dilihat dari kelakuan mulurnya ada tiga jenis kurva tegangan – regangan yang terlihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Kurva hasil uji tarik dengan nilai tegangan tertinggi dari setiap variasi bentuk Pin Tool

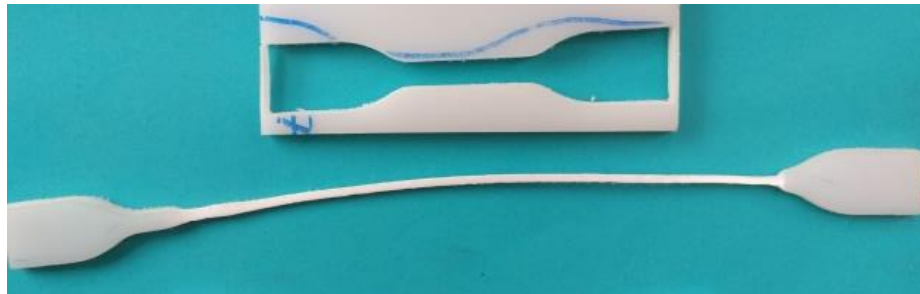
Adapun jenis kelakuan mulur atau patahannya sebagai berikut :

- Jenis patahan keras dan getas yang ditunjukkan pada kurva warna hijau yang didapat dari hasil pengelasan penggunaan pin silinder ulir berdiameter 3mm dimana laju perpanjangan sedikit rendah dan meningkat sampai 0,5-2% pada saat patah menunjukkan hubungan lurus.

- Pada jenis keras dan kuat ditunjukkan pada kurva warna kuning dan ungu yang didapat dari penggunaan pin silinder berdiameter 3mm dan silinder ulir berdiameter 4mm dimana tidak menunjukkan penurunan beban setelah titik mulur seperti yang ditunjukkan pada jenis keras dan ulet tetapi hanya satu titik infleksi, yang berakibat patah ketika beban meningkat.
- Jenis keras dan ulet yang didapat dari raw material dan penggunaan pin segitiga baik yang berukuran mm ataupun 4mm dan silinder berdiameter 4mm dimana kurva lurus sampai titik mulur pada Y, tetapi setelah itu memberikan perpanjangan yang besar sekitar 100-1000%, dan sebelum patah tegangan tarik meningkat dengan cepat. Terkadang peningkatan terakhir ini tidak dapat teramati. Namun pada penggunaan pin segitiga nilai perpanjangan relatif kecil.

1. Raw material

Raw material atau bahan dasar diuji bertujuan sebagai pembanding hasil uji pada hasil lasan dengan metode *friction stir welding*.



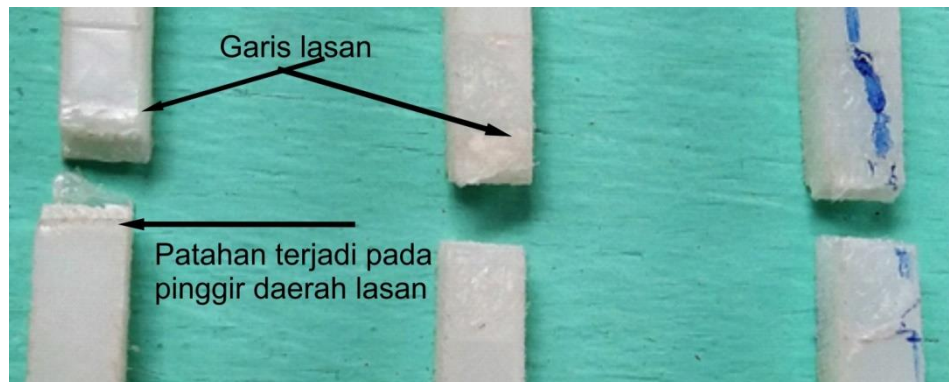
Gambar 4.14 Material dasar setelah diuji tarik

Pada Gambar 4.14 terlihat bahwa benda uji bisa memanjang tanpa putus sampai akhir proses pengujian sedangkan mesin uji sudah menganggapnya sudah patah. Jenis patahan yang terjadi adalah patahan keras dan ulet dimana terlihat lurus sampai titik mulur pada Y, tetapi setelah itu memberikan perpanjangan yang besar sekitar 100-1000%, dan sebelum patah tegangan tarik meningkat dengan cepat. Terkadang peningkatan

terakhir ini tidak dapat teramati. Hal ini terjadi karena kondisi bahan masih solid tidak ada cacat. Pada hasil pengujian *raw material* ini diambil satu spesimen karena nilai hasil pengukuran sudah dianggap mewakili dari setiap spesimen uji. Hasil dari pengujian bisa dilihat pada Gambar 4.13, terlihat bahwa material memiliki sifat keuletan yang cukup tinggi. Dimana pergerakan grafik mula-mula lurus sampai titik mulur 13% pada tegangan maksimum mencapai 25,9 MPa tetapi setelah itu memberikan perpanjangan yang besar sampai 100% kemudian patah pada nilai tegangan 5,18 MPa.

2. Hasil Penggunaan Bentuk Pin Silinder Diameter 3mm

Pada pengujian tarik hasil pengelasan dengan menggunakan *pin tool* berbentuk silinder berdiameter 3 mm yang terlihat pada Gambar 4.15 dibawah terdapat jenis patahan yang getas atau keras dan kuat dimana pada jenis ini tidak menunjukkan penurunan beban setelah titik mulur seperti yang ditunjukkan pada *raw material* tetapi hanya satu titik infleksi, yang berakibat patah ketika beban meningkat.



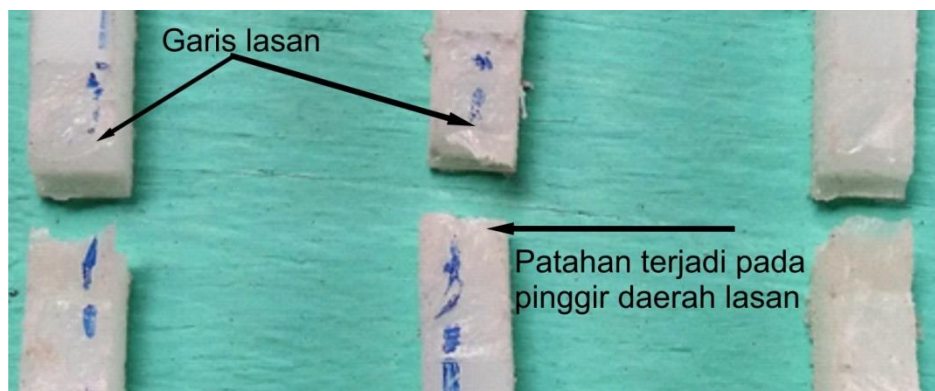
Gambar 4.15 Patahan setelah uji tarik hasil pengelasan FSW dengan bentuk pin silinder diameter 3mm

Secara kasat mata memang patahan yang terjadi pada Gambar 4.15 terjadi patahan getas dan patahan terjadi di area pinggir pengelasan atau *heat affected zone (HAZ)*. Hasil pengujian yang didapat memang terjadi patahan getas dimana laju perpanjangan agak rendah dengan nilai rata-rata sekitar 3,7% dan pada saat patah menunjukkan hubungan lurus dengan nilai tegangan maksimum rata-rata mencapai 14,5 MPa. Pada pengujian kuat

tarik percobaan yang kedua memiliki nilai tertinggi dengan nilai tegangan maksimum 16,6 MPa dan regangan maksimum mencapai 5,1%.

3. Hasil Penggunaan Bentuk Pin Silinder ulir Berdiameter 3mm

Tidak jauh berbeda dengan pengujian sebelumnya pada hasil pengelasan dengan menggunakan *pin tool* berbentuk silinder ulir yang berdiameter 3mm terlihat mengalami patahan getas atau jenis patahan keras dan getas dimana laju perpanjangan sedikit rendah dan meningkat sampai 0,5-2% pada saat patah menunjukkan hubungan lurus. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.16, patahan yang terjadi sama dengan pengujian sebelumnya yaitu di daerah pinggir pengelasan kemudian merambat ke bagian bawah pengelasan. Hal ini dikarenakan di bagian samping dari jalur pengelasan tergesek dan sebagian ada yang terbuang karena efek *dept of plunge* yang terjadi pada proses pengelasan.



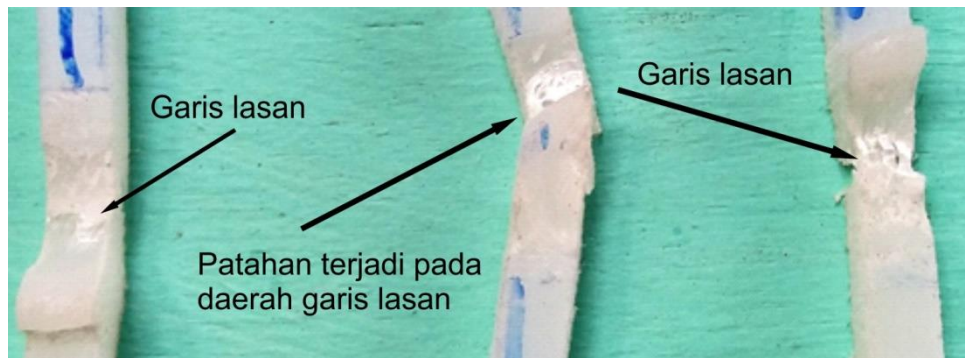
Gambar 4.16 Patahan setelah uji tarik hasil pengelasan FSW dengan bentuk pin silinder ulir diameter 3mm

Hasil pengujian sedikit konstan atau seragam dengan nilai tegangan yang selisih sekitar 1 MPa pada setiap pengujiannya, dengan nilai rata-rata tegangan maksimum 16,4 MPa dan regangan maksimum mencapai 4,2% dan terjadi patahan getas seperti pengujian sebelumnya. Pada pengujian ini terlihat bahwa percobaan kedua memiliki nilai tertinggi dengan nilai tegangan maksimum 17,3 MPa dan regangan maksimum mencapai 5,8%.

4. Hasil Penggunaan Bentuk Pin Segitiga 3mm

Pada pengujian tarik hasil pengelasan dengan menggunakan *pin tool* berbentuk segitiga berukuran 3 mm yang terlihat pada Gambar 4.17

dibawah terdapat patahan yang tidak getas atau sama dengan patahan yang terjadi pada raw material yaitu keras dan ulet, hanya saja pada penggunaan pin ini memberikan perpanjangan yang kecil dan patahan terjadi pada daerah garis lasan.



Gambar 4.17 Patahan hasil pengelasan FSW dengan pin segitiga 3mm

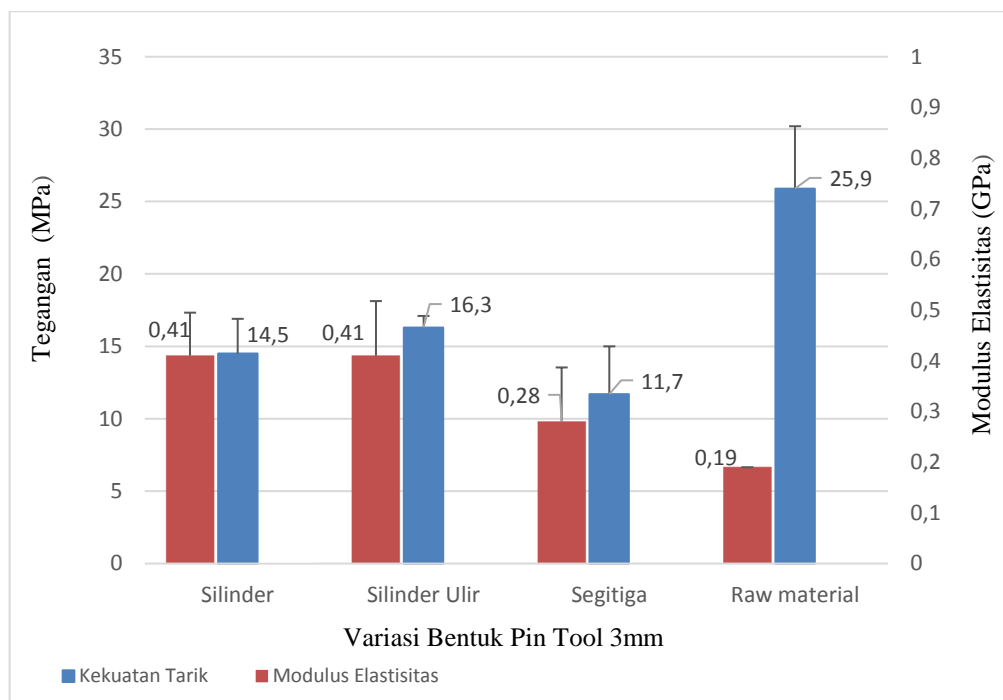
Pada saat pengujian berlangsung memang spesimen ini tidak benar-benar putus tetapi mesin uji sudah menganggap putus. Pada variasi ini hasil lasan terbilang cukup ulet. Hal ini dikarenakan proses pengadukan dengan menggunakan pin ini menghasilkan panas yang lebih tinggi dari pengelasan sebelumnya.

Kurva yang terbentuk pada hasil pengujian terlihat mirip dengan bahan dasar yang memiliki nilai perpanjangan walaupun terbilang kecil dengan nilai rata-rata regangan break (pas patah) sebesar 8,1% dengan nilai tegangan maksimum rata-rata mencapai 11,7 MPa dan regangan maksimum rata-rata seharga 4,2%.

Tabel 4.1 Hasil pengujian tarik pada pengelasan FSW pada variasi *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

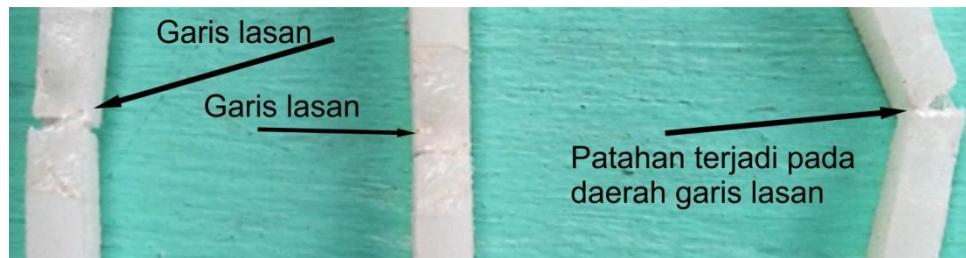
Pada Tabel 4.1 terlihat bahwa variasi bentuk *pin tool* yang memiliki nilai kekuatan tarik atau tegangan rata-rata yang paling tinggi dalam lingkup pin berukuran 3 mm adalah bentuk silinder ulir dengan nilai tegangan rata-rata sebesar 16,3 MPa dengan standar deviasi senilai 0,8 yang berarti sebaran data pada hasil uji tidak memiliki interval yang jauh atau mendekati konstan. Sedangkan bentuk pin segitiga memiliki nilai tegangan terendah dengan nilai rata-rata 11,7 MPa dengan standar deviasi 3,3 dan lebih jelasnya terlihat pada Gambar 4.18 dibawah,



Gambar 4. 18 Grafik tegangan (MPa) dan modulus elastisitas (GPa) pada pengelasan FSW dengan *Pin tool* berdiameter 3 mm

5. Hasil Penggunaan Bentuk Pin Silinder Berdiameter 4mm

Pada hasil pengujian tarik pada pengelasan menggunakan *pin tool* berbentuk silinder berukuran 4 mm secara visual seperti pada Gambar 4.19 memiliki patahan getas namun pada hasil uji menunjukkan jenis patahan keras dan ulet sama seperti pada raw material namun memiliki nilai perpanjangan yang lebih kecil.



Gambar 4.19 Patahan setelah uji tarik hasil pengelasan FSW dengan bentuk pin silinder diameter 4mm

Patahan yang terjadi dari ketiga spesimen uji semuanya terjadi pada daerah pinggir lasan (HAZ). Perlu diketahui bahwa spesimen sampai akhir belum putus tetapi mesin uji sudah menganggap putus. Hal ini seperti kasus raw material.

Hasil bentuk kurva sedikit mirip dengan bentuk kurva raw material dimana dari garis awal lurus sampai titik mulur tetapi setelah itu menunjukkan perpanjangan yang agak besar dan sebelum patah tegangan tarik meningkat dengan cepat walau terkadang peningkatan terakhir ini tidak dapat teramati. Tegangan maksimum yang tertinggi didapat pada percobaan pertama dengan nilai 16,3 MPa serta regangan maksimum mencapai 4%, sedangkan nilai tegangan maksimum rata-rata seharga 13,9 MPa dan regangan maksimum rata-rata sebesar 3,5%.

6. Hasil Penggunaan Bentuk Pin Silinder Ulir Berdiameter 4mm

Hasil patahan pengelasan dengan menggunakan *pin tool* berbentuk silinder ulir yang berukuran 4 mm setelah diuji tarik terlihat pada Gambar 4.20 dimana memiliki bentuk visual terjadi patahan getas dan berjenis patahan keras dan kuat dimana tidak menunjukkan penurunan beban setelah titik mulur seperti yang ditunjukkan pada raw material tetapi hanya satu titik infleksi, yang berakibat patah ketika beban meningkat.

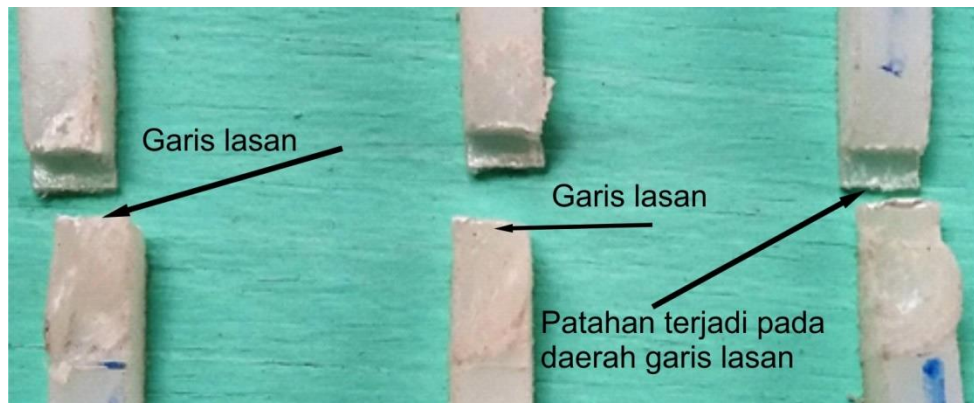


Gambar 4.20 Patahan setelah uji tarik hasil pengelasan FSW dengan bentuk pin silinder ulir diameter 4mm

Patahan yang terjadi pada daerah pinggir pengelasan dan terjadi patahan yang cepat pada proses pengujian. Hasilnya terlihat jelas pada kurva yang dihasilkan yang memperlihatkan bagaimana patahan terjadi tidak menunjukkan penurunan setelah titik mulur tetapi hanya satu titik defleksi, jadi ketika beban meningkat yang akhirnya mengakibatkan patah. Pada Hasil tes terlihat bahwa tegangan maksimum yang terbesar terdapat pada spesimen pertama dengan nilai sebesar 12,7 MPa dan regangan maksimum sekitar 3,2%. Rata-rata tegangan maksimum yang terjadi adalah 10,3 MPa dan 2,2 untuk rata-rata regangan maksimum.

7. Hasil Penggunaan Bentuk Pin Segitiga 4mm

Pada penggunaan pin tool segitiga yang berukuran 4 mm ini menghasilkan patahan yang getas seperti yang terlihat pada Gambar 4.21 dibawah. Patahan yang terjadi dari ketiga spesimen keduanya terjadi pada daerah lasan dan jenis patahan yakni lunak dan lemah dimana lurus sampai titik mulur pada Y, tetapi setelah itu memberikan perpanjangan yang kecil dan sebelum patah tegangan tarik meningkat dengan cepat. Terkadang peningkatan terakhir ini tidak dapat teramati.

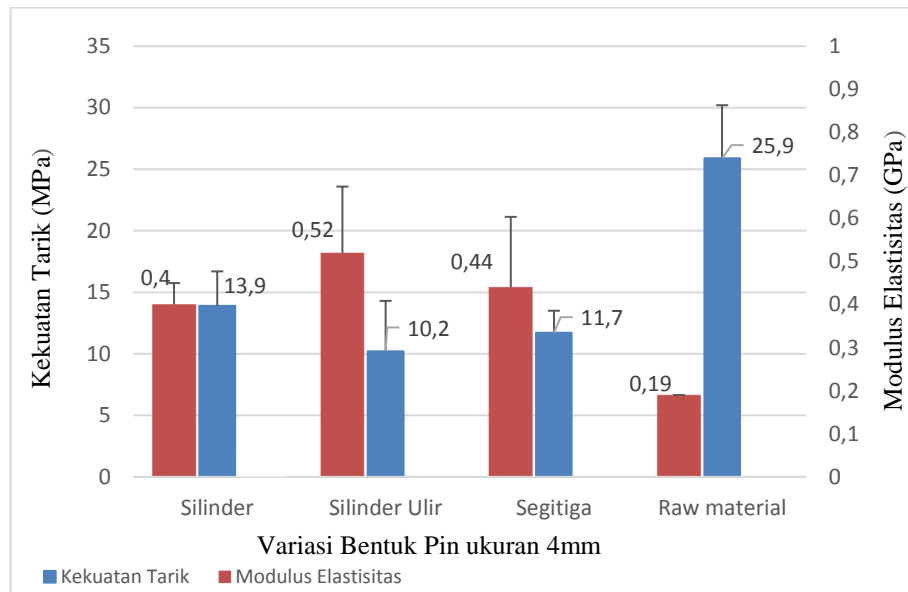


Gambar 4.21 Patahan setelah uji tarik hasil pengelasan FSW dengan bentuk pin segitiga berukuran 4mm

Bentuk kurva yang didapat terlihat seperti bentuk kurva penggunaan bentuk pin tool segitiga berukuran 3 mm hanya saja pada penggunaan pin segitiga berukuran 4 mm memiliki hasil tes yang lebih kecil dengan tegangan maksimum rata-rata mencapai 4,8 MPa dan rata-rata regangan senilai 1,2%. Tegangan maksimum terbesar pada spesimen ketiga dengan tegangan maksimum sebesar 6,8 dan regangan dengan nilai 1,7%. Hal ini sekaligus menandai bahwa penggunaan pin tool dengan segitiga berukuran 4 mm memiliki nilai rata-rata kekuatan tarik terkecil dalam lingkup pin berukuran 4 mm seperti yang terlihat pada Tabel 4.2

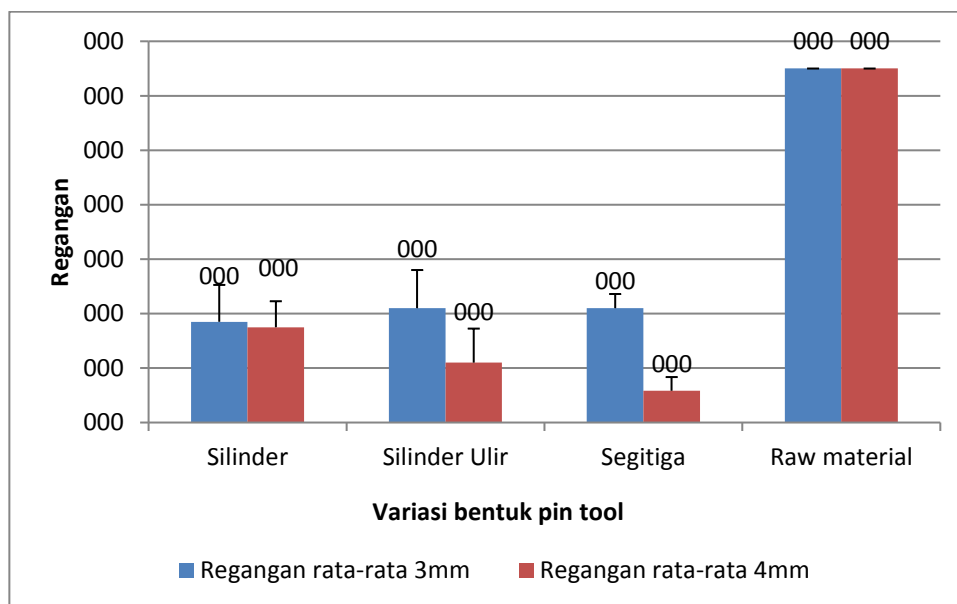
Tabel 4.2 Hasil pengujian tarik pada pengelasan FSW dengan *pin tool* berukuran 4mm

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 4.22 Grafik tegangan dan modulus elastisitas pada pengelasan FSW dengan *pin tool* diameter 4 mm

Pada grafik yang terdapat pada Gambar 4.22 menunjukkan bahwa penggunaan bentuk pin berukuran 4 mm ini sangat cocok menggunakan bentuk pin tool silinder dimana memiliki tegangan yang tinggi yaitu sekitar 13,9 dan memiliki modulus elastisitas yang cukup kecil seharga 0,4 GPa.



Gambar 4.23 Grafik regangan pada hasil pengelasan FSW dengan variasi bentuk pin tool

Regangan yang terjadi pada hasil pengelasan FSW dengan variasi bentuk pin (silinder, silinder ulir dan segitiga) yang masing-masing dibagi dalam dua ukuran (3mm dan 4mm) seperti pada Gambar 4.23 setelah diuji tarik menunjukkan bahwa nilai regangan yang terjadi pada penggunaan bentuk pin tool berukuran 3mm menghasilkan nilai regangan yang konstan dengan nilai 4% sedangkan pada bentuk pin tool yang berukuran 4mm menunjukkan hasil yang tidak konstan dengan nilai regangan terkecil sebesar 1%. Hal ini kemungkinan terjadi karena pada penggunaan bentuk pin tool berukuran 4mm, menghasilkan penyambungan yang banyak membuang benda kerja pada saat pengadukan berlangsung sehingga mengurangi keuletan dari hasil lasan tersebut.

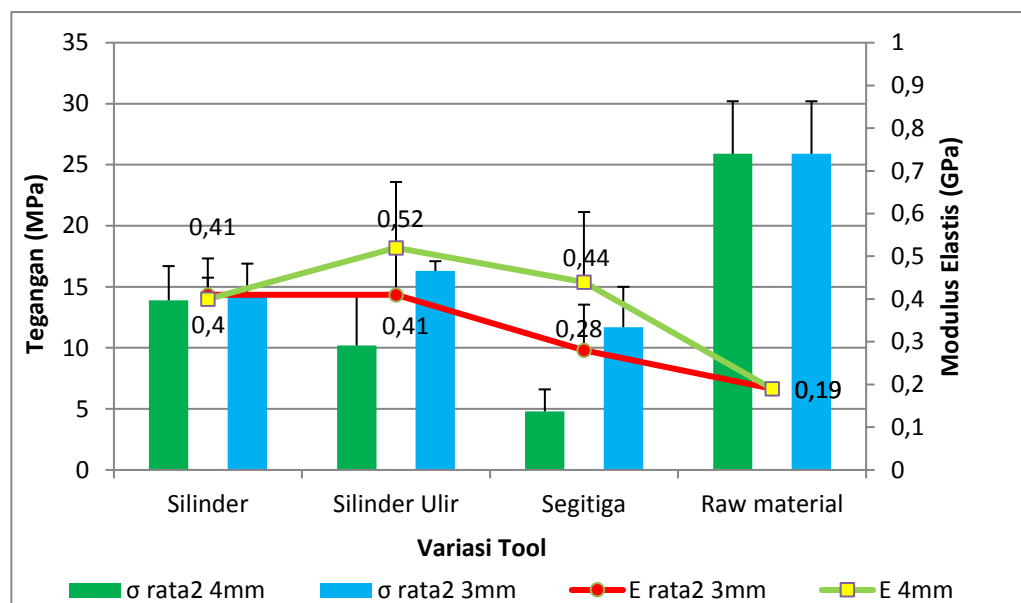
Pembahasan : Penelitian tentang pengujian tarik pada hasil lasan friction stir welding dengan menggunakan lembaran HDPE sebelumnya telah dilakukan oleh Squeo dkk. (2009) Dalam proses set upnya jarak minimum sekitar 0,2 mm antara permukaan pin dan permukaan bawah sempelnya (dept of plunge), kecepatan 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 4.24 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.

Pada Gambar 4.13 juga menunjukkan nilai perpanjangan terbesar terjadi pada pin yang berukuran 3 mm tepatnya pada penggunaan variasi bentuk segitiga dimana nilai perpanjangan sampai patah mencapai 9,7%. Hal ini semakin menguatkan bahwa penggunaan bentuk pin tool yang lebih kecil baik digunakan pada proses pengelasan *friction stir welding*.



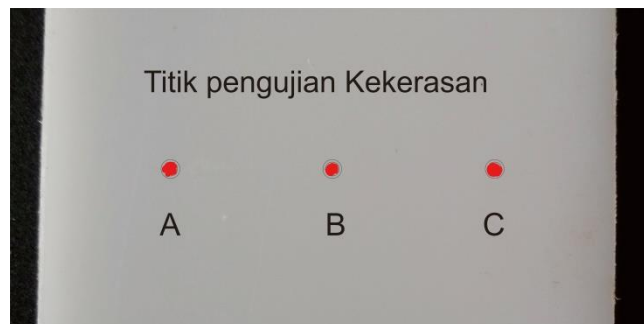
Gambar 4.24 Grafik tegangan dan modulus elastisitas dari semua variasi bentuk *Pin tool* pada pengelasan FSW

Penelitian lain seperti yang dilakukan oleh Shaikh dkk. (2012) tentang sifat mekanik pada pengealasan FSW dengan menggunakan high density polyethylene (HDPE) dengan ketebalan 6mm dan kecepatan peengujian tarik yang sama dengan penelitian ini yakni 5mm/menit menghasilkan kuat tarik sekitar 85% dari kekuatan tarik bahan dasarnya. Sedangkan pada penelitian ini kekuatan tarik tertinggi didapat sekitar 67% dari kekuatan raw material dengan nilai tegangan 17,3 MPa. Perbedaan hasil yang cukup jauh terjadi karena ada beberapa parameter proses yang berbeda.

4.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada lima benda uji yakni raw material sebagai pembanding dan empat spesimen dari hasil pengelasan menggunakan variasi bentuk pin tool diantaranya silinder 3mm, silinder ulir 3mm, silinder 4mm dan silinder ulir 4mm. Pada variasi bentuk pin segitiga baik yang berukuran 3mm atau 4mm keduanya tidak dapat diuji kekerasan karena hasil permukaan las yang terlalu buruk. Titik pengujian berada pada sepanjang permukaan garis pengelasan dengan jarak tiap titik sekitar 25 mm dan tiap spesimen dikenai tiga titik uji seperti pada Gambar 25. Hasil pengujian kekerasan pada penelitian ini menunjukkan kelakuan kekerasan dari garis sambungan HDPE dengan metode FSW dalam bentuk kurva atau grafik kekerasan rockwell. Adapun hasilnya sebagai berikut :

1. Raw Material



Gambar 4.25 Posisi titik pengujian kekerasan raw material

Hasil dari pengujian kekerasan pada raw material menunjukkan tingkat kekerasan pada sepanjang spesimen dengan nilai kekerasan tertinggi terdapat pada bagian tengah atau di titik B benda uji dengan nilai 56 HRH dan nilai kekerasan terendah berada pada daerah ujung C benda uji sebesar 53,3 HRH. Raw material diuji bertujuan sebagai pembanding dengan hasil kekerasan yang didapat setelah pengelasan.

2. Silinder Diameter 3mm

Hasil pengujian kekerasan pada garis pengelasan menggunakan pin tool silinder berukuran 3 mm mendapatkan hasil tertinggi didapat pada daerah akhir pengelasan yaitu di titik C dengan nilai 43,2 HRH. Hal ini

kemungkinan dikarenakan pada bagian akhir menerima banyak panas sehingga mendapat pengadukan yang optimal dan mengalami pengerasan material yang mendekati bahan dasar.

3. Silinder Ulir Diameter 3mm

Pada hasil uji kekerasan jalur pengelasan menggunakan pin silinder ulir 3mm memiliki bentuk kurva yang turun seperti yang terlihat pada Gambar 4.33 dimana nilai kekerasan tertinggi diperoleh dari daerah awal pengelasan dengan nilai mencapai 36 HRH dan nilai terkecil seharga 25 HRH. Hal ini terjadi mungkin karena pada daerah akhir pengelasan terdapat lebih banyak flas dari pada daerah awal pengelasan karena temperatur dari pin tool emakin meningkat.

4. Silinder Diameter 4mm

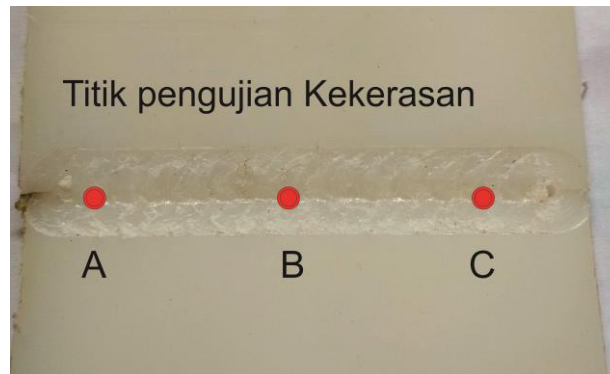
Hasil pengujian kekerasan pada pengelasan menggunakan pin tool silinder 4mm memiliki bentuk kurva yang sama seperti pada pengelasan menggunakan silinder ulir 3mm yaitu turun dimana nilai kekerasan tertinggi pada daerah awal pengelasan sebesar 27,9 HRH, sedangkan hasil terendah terdapat pada daerah akhir pengelasan dengan nilai sebesar 21,7 HRH. Hal ini kemungkinan terjadi karena pada hasil pengelasan dengan menggunakan pin tool silinder 4mm memiliki hasil permukaan yang hampir sama seperti pada penggunaan pin tool silinder ulir.

5. Silinder Ulir Diameter 4mm

Hasil uji kekerasan dengan menggunakan pin tool yang berbentuk silinder ulir berukuran 4mm memiliki nilai kekerasan tertinggi pada daerah tengah pengelasan sebesar 28,1 HRH dan nilai terkecil terdapat di akhir proses pengelasan yang hanya mencapai 19,1 HRH. Hal ini terjadi kemungkinan karena pada daerah tengah proses pengelasan mendapat temperatur yang optimal sehingga mendapatkan lasan yang bagus dalam hal ini pada pin tool berbentuk silinder ulir berukuran 4mm.

Pembahasan : Dari semua hasil pengujian kekerasan yang sudah dijelaskan diatas maka didapat nilai rata-rata kekerasan tiap variasi bentuk pin yang

ditunjukkan pada Tabel 4.3. Dan pada Gambar 4.26 menunjukkan letak tiap titik pengujian kekerasan pada hasil sambungan FSW.



Gambar 4.26 Posisi titik pada pengujian kekerasan pada hasil pengelasan FSW

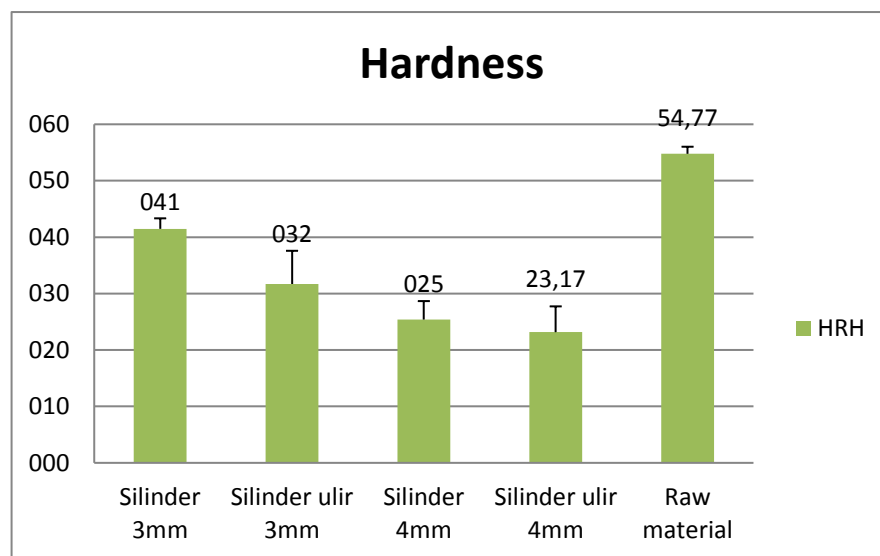
Tabel 4.3 Hasil pengujian kekerasan pada pengelasan FSW

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 Tabel 4.3 terlihat menunjukkan adanya sebaran data yang mempunyai interval yang agak jauh. Hal ini membuktikan bahwa pada daerah sambungan terjadi pengadukan yang tidak mencapai homogen sedangkan sifat dari material uji sendiri homogen. Hal lain yang mempengaruhi hasil pengelasan adalah fluktuasi temperatur, karena tiap variasi *pin tool* memiliki temperatur proses yang berbeda-beda. Fluktuasi temperatur ini memicu terjadinya cacat las permukaan yang berbentuk celah (lembah) dengan kedalaman bervariasi (Setiawan dkk. (2011)).

Pada Gambar 4.27 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 4.27 Grafik Hasil uji kekerasan rockwell pada lasan FSW

Pada kasus standar deviasi, terlihat bahwa pada bentuk pin tool silinder berukuran 3mm memiliki standar deviasi yang paling bagus dengan nilai 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.

4.5 Hasil Penyambungan dengan Perekat

Percobaan hasil sambungan dengan menggunakan perekat dilakukan sebagai metode pembandingan hasil sambungan dengan metode *friction stir welding* guna mengetahui seberapa efektif penyambungan dengan metode FSW dilakukan. Akan tetapi percobaan ini tidak dilakukan pengujian karena hasil

sambungan dianggap terlalu rapuh. Bentuk sudut kontak pada spesimen penyambungan dibuat miring dengan kemiringan sekitar 45 derajat seperti yang terlihat pada Gambar 4.28 dimana bentuk tersebut untuk sambungan beban geseran dan tegangan.

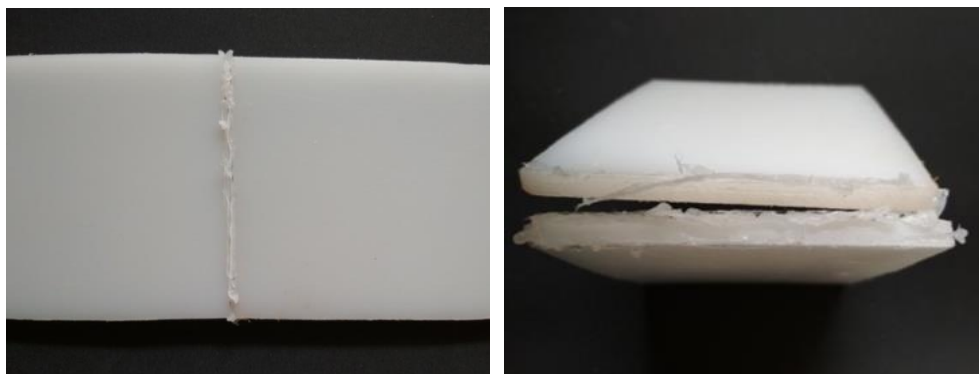


Gambar 4.28 Pembentukan sudut kontak spesimen penyambungan

Adapun perekat yang digunakan adalah lelehan HDPE dengan menggunakan alat *glue gun*, lem PVC, lem *plastic steel* dan lem G. Adapun uraiannya sebagai berikut :

1. Lem menggunakan lelehan HDPE

Pada percobaan penyambungan dengan menggunakan lelehan HDPE terlihat pada Gambar 4.29 (a), dimana sambungan tidak benar-benar tersambung karena pada saat cairan lelehan keluar dari alat *glue gun* lelehan tersebut akan cepat mengeras membentuk material seperti benang. Sambungan terlihat jelas tidak tersambung terlihat pada Gambar 4.29 (b).



(a) (b)
Gambar 4.29 Hasil sambungan dengan lelehan HDPE

2. Lem pipa PVC

Hasil dari percobaan penyambungan dengan menggunakan lem pipa PVC memiliki hasil permukaan sambungan yang rapih dan bagus, hal ini kemungkinan terjadi dikarenakan perekat PVC merupakan resin termoplastik. Namun pada saat kering perekat membentuk lapisan-lapisan yang mengelupas dan pada saat dikenai tekukan sedikit saja sambungan sudah patah seperti pada Gambar 4.30 di bawah ini.



Gambar 4.30 Patahan hasil sambungan lem pipa PVC



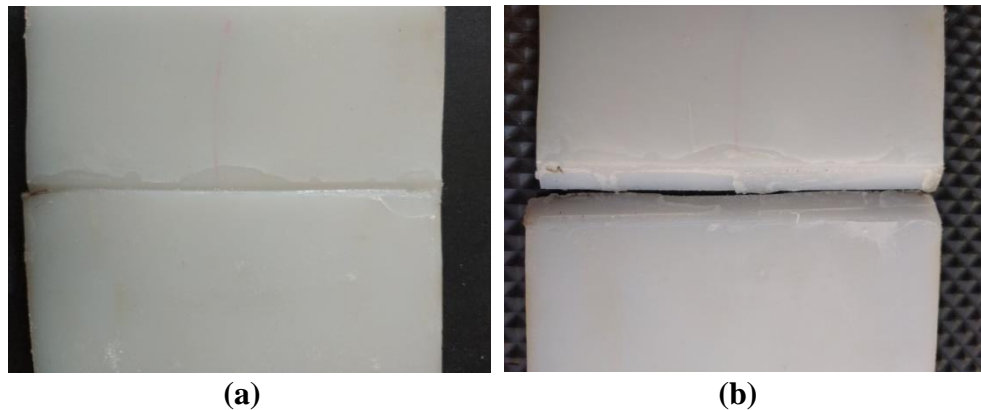
Gambar 4.31 Patahan hasil penyambungan dengan lem plastic steel

3. Lem plastic steel

Pada hasil penyambungan dengan menggunakan lem plastic steel kasusnya sama seperti pada sambungan dengan lem pipa PVC. Perekat cenderung tidak menyatu dengan bahan dasar dan menempel di satu sisi spesimen penyambungan seperti yang terlihat pada Gambar 4.31. Hal ini terjadi kemungkinan dikarenakan perbedaan bahan perekat dengan spesimen uji dimana perekat ini termasuk produk sintetik termoset dari reaksi poliepoksi, sedangkan spesimen uji termasuk polimer termoplastik. Oleh karena itu sambungan tidak dapat tersambung dengan baik.

4. Lem G

Pada hasil penyambungan dengan menggunakan lem G atau lem korea menghasilkan permukaan sambungan yang cukup bagus seperti yang terlihat pada Gambar 4.32(a) di bawah ini.



(a) (b)
Gambar 4.32 Sambungan dengan lem G

Pada percobaan penyambungan ini tidak memerlukan tekanan atau pemanasan. Bahan dari lem sendiri yaitu cyanoacrylates yang merupakan polimer sintesis yang tahan cuaca lembab tetapi melemah jika terkena air. Gambar 4.32(b) menunjukkan patahan pada penggunaan lem G.

Pada semua hasil percobaan penyambungan dengan menggunakan perekat di atas dapat diketahui bahwa penyambungan dengan perekat pada material high density polyethylene (HDPE) kurang cocok untuk diimplementasikan dalam lingkup penyambungan. Terlebih lagi perekat yang digunakan tidak cocok dengan bahan yang akan disambung, sebenarnya perekat yang cocok pada material HDPE ialah bahan dasarnya itu sendiri yakni PE (polietilen) cair, tetapi karena di Indonesia tidak tersedia lem tersebut, maka percobaan dilakukan dengan lem yang biasa dan sudah banyak digunakan di Indonesia. Dan semua hasil percobaan penyambungan dengan perekat menunjukkan ketidakcocokan dengan hasil yang diharapkan. Dengan demikian penyambungan dengan metode *friction stir welding* (FSW) ini bisa menjadi alternatif sebagai metode yang efektif khususnya pada material HDPE.