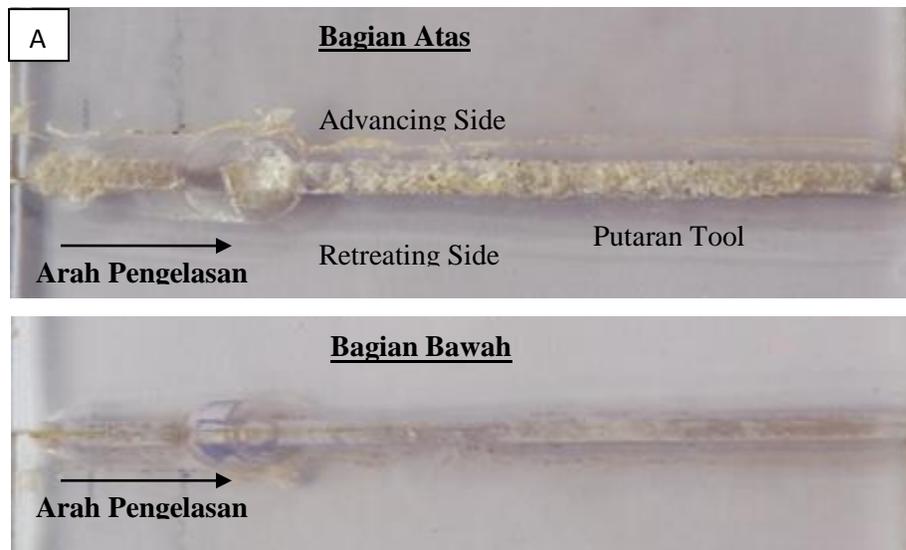


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengelasan FSW

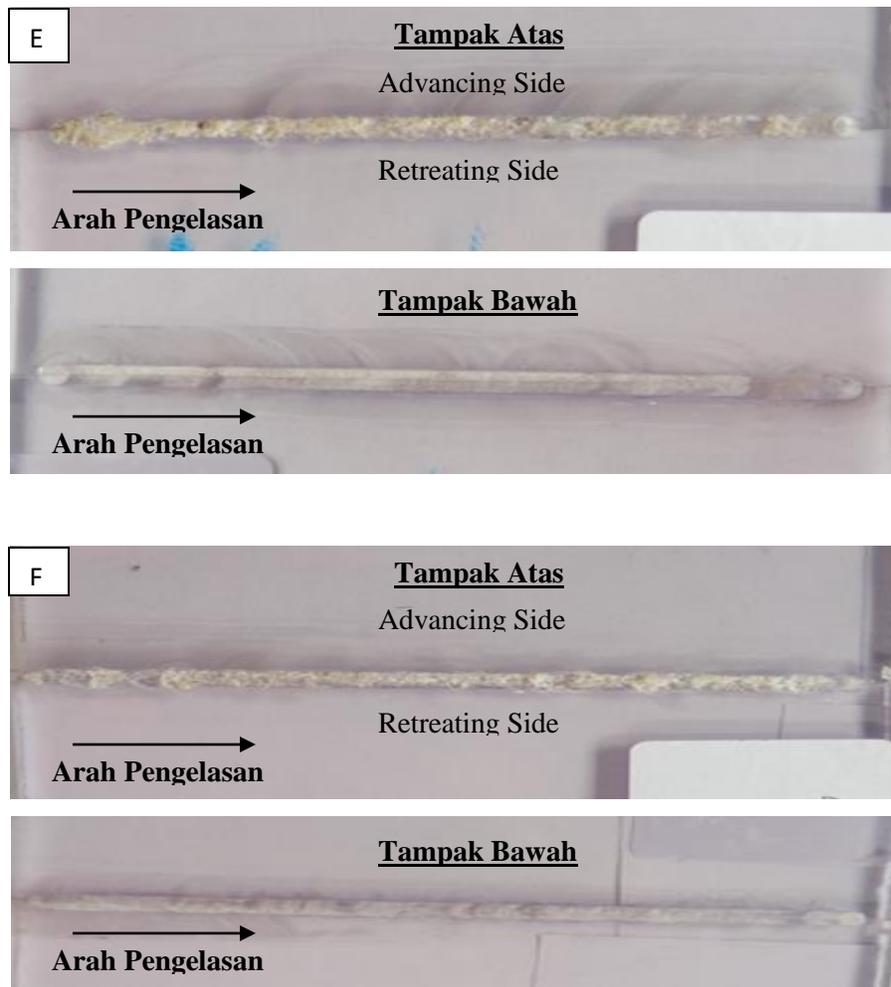
Hasil pengelasan lembaran *polycarbonate* menggunakan metode *friction stir welding* menggunakan variasi rasio diameter *shoulder* dan kedalaman pembedaman *tool* (*depth plunge*) dengan parameter pendukung yang dibuat konstan seperti kecepatan putar *tool* dibuat pada 2350 Rpm, kecepatan pengelasan 14 mm/menit, bentuk pin *tool* yang digunakan yaitu silinder berulir, dan besar diameter pin 3 mm. Pada proses pengelasan didapatkan hasil pengelasan yang cukup baik, dimana lembaran *polycarbonate* dapat tersambung dengan baik walaupun masih terdapat kekurangan seperti cacat pada beberapa sisi permukaan sambungan dan cacat rongga pada spesimen benda kerja. Adapun hasil dari pengelasan dengan metode *friction stir welding* diuraikan sebagai berikut.



Gambar 4.1 Hasil pengelasan FSW dengan variasi rasio diameter *shoulder* dan pin *tool depth plunge* A. 10/3 mm/mm & 4.6 mm, B. 10/3 mm/mm & 4.8 mm C. 14/3 mm/mm & 4.6 mm, D. 14/3 mm/mm & 4.8 mm, E. 16/3 mm/mm & 4.6 mm, F. 16/3 mm/mm & 4.8 mm.



Gambar 4.1 Hasil pengelasan FSW dengan variasi rasio diameter *shoulder* dan pin *tool depth plunge* (Lanjutan).



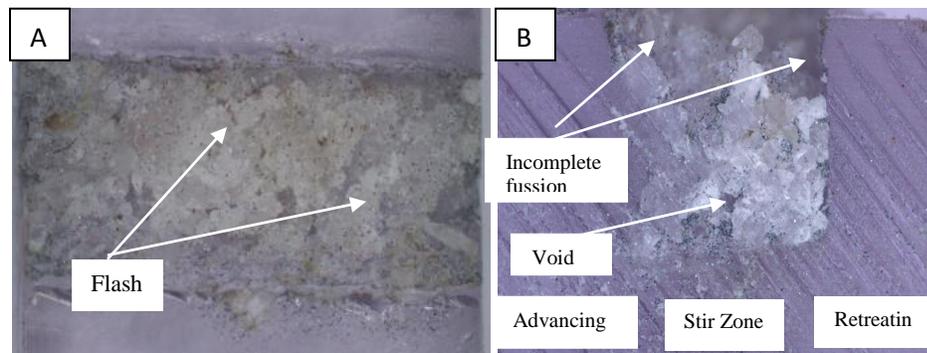
Gambar 4.1 Hasil pengelasan FSW dengan variasi rasio diameter *shoulder* dan pin *tool depth plunge* (Lanjutan).

Pada Gambar 4.1 dapat diketahui bahwa hasil tampilan pengelasan memiliki hasil yang berbeda-beda dari setiap variasi. Pada Gambar A yaitu variasi rasio diameter *shoulder* 10/3 mm/mm dengan pembenaman tool 4.6 mm mendapatkan hasil tampilan pengelasan yang tidak merata, dikarenakan terdapat banyak cacat berupa gumpalan-gumpalan putih (*flash*) pada tampak atas hasil pengelasan. Pada Gambar B, C, D, E, dan F mendapatkan hasil tampilan pengelasan yang cenderung merata, hal ini terjadi karena sedikitnya terdapat cacat (*flash*) pada tampak atas hasil pengelasan.

4.2. Hasil Pengujian Struktur Makro

Hasil dari pengamatan pengujian struktur makro pada hasil pengelasan metode *friction stir welding* menggunakan material polikarbonat dengan variasi rasio diameter *shoulder* dan kedalaman pembedaman pin *tool* (*depth plunge*). Hasil struktur makro lasan seperti yang terlihat pada Gambar 4.2 (A) menunjukkan hasil tampak atas dari pengelasan, dan (B) menunjukkan hasil tampak samping dari sebuah pengelasan. Adapun hasilnya di jelaskan sebagai berikut:

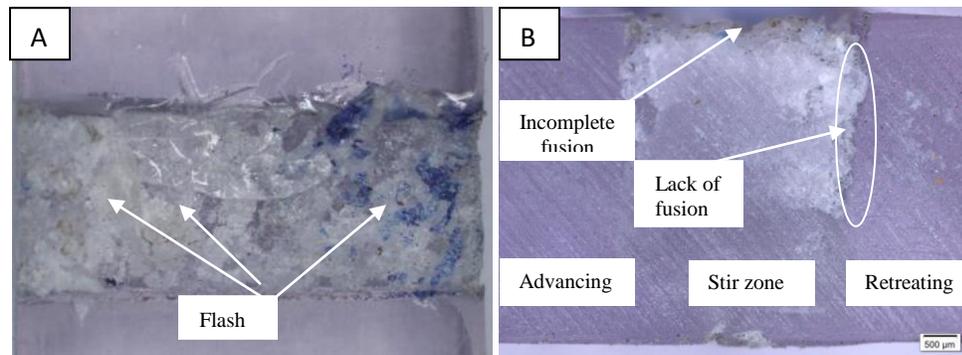
1. Penggunaan rasio diameter *shoulder* 10/3 mm/mm dan *depth plunge* 4,6 mm



Gambar 4.2 Hasil struktur makro variasi 10/3 mm/mm & 4.6 mm (A) Tampak atas, (B) tampak samping.

Pada Gambar 4.2 hasil struktur makro terdapat beberapa cacat, baik dilihat pada tampak atas maupun pada tampak samping pengelasan. Pada tampak atas terdapat banyak gumpalan-gumpalan putih (*flash*), hal ini disebabkan karena kurangnya tekanan dan gesekan *shoulder tool* terhadap benda kerja sehingga pengadukan material menjadi tidak sempurna. Pada tampak samping terlihat banyak cacat rongga (*void*) dan alur pengelasan tidak mengisi dengan sempurna (*incomplete fusion*). Hal ini disebabkan karena terperangkapnya gelembung udara pada alur pengelasan yang tidak sempat keluar sebelum material pada permukaan pengelasan mengeras.

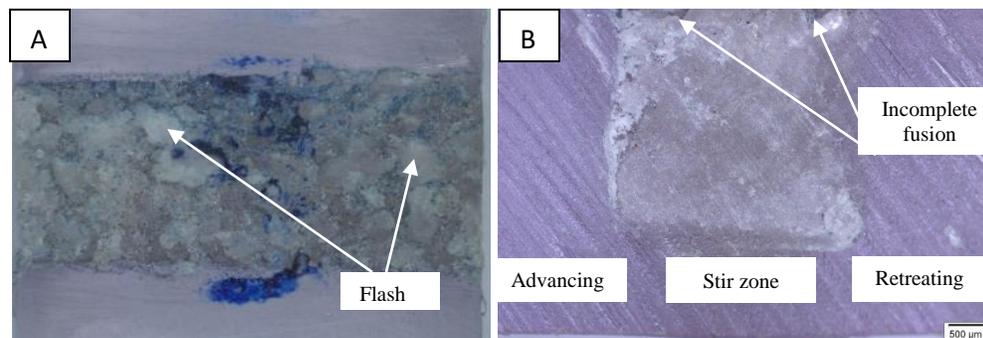
2. Penggunaan rasio diameter *shoulder* 10/3 mm/mm dan *depth plunge* 4,8 mm



Gambar 4.3 Hasil struktur makro variasi 10/3 mm/mm & 4.8 mm (A) tampak atas, (B) tampak samping.

Pada Gambar 4.3 hasil struktur makro spesimen ini menunjukkan hasil permukaan yang merata meski masih terdapat gumpalan-gumpalan putih pada tampak atas hasil pengelasan. Pada tampak samping (B) pengelasan terdapat cacat *Lack of fusion*, hal ini disebabkan karena panas yg dihasilkan oleh pin tool kurang mengenai satu sisi material induk sehingga adukan material menjadi tidak sempurna menempel dengan spesimen pengelasan.

3. Penggunaan rasio diameter shoulder 14/3 mm/mm dan *depth plunge* 4,6 mm

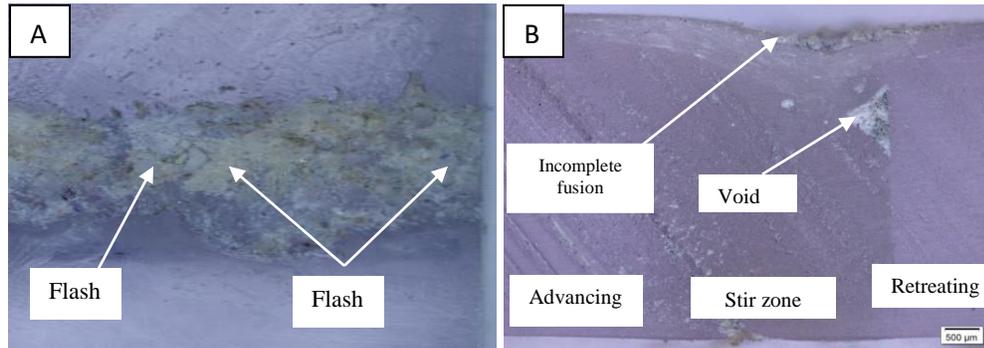


Gambar 4.4 Hasil struktur makro variasi 14/3 mm/mm & 4.6 mm (A) tampak atas, (B) tampak samping.

Pada Gambar 4.4 hasil struktur makro spesimen ini menunjukkan hasil permukaan yang merata meski masih terdapat gumpalan-gumpalan putih pada tampak atas (A) hasil pengelasan. Pada tampak samping (B) hasil struktur makro menunjukkan bahwa hasil pengelasan merata, hal ini disebabkan karena kombinasi antara gesekan shoulder dan tekanan pengelasan yang membuat heat input mampu

mengaduk material dengan merata. Sehingga dapat menghasilkan kekuatan mekanis yang baik.

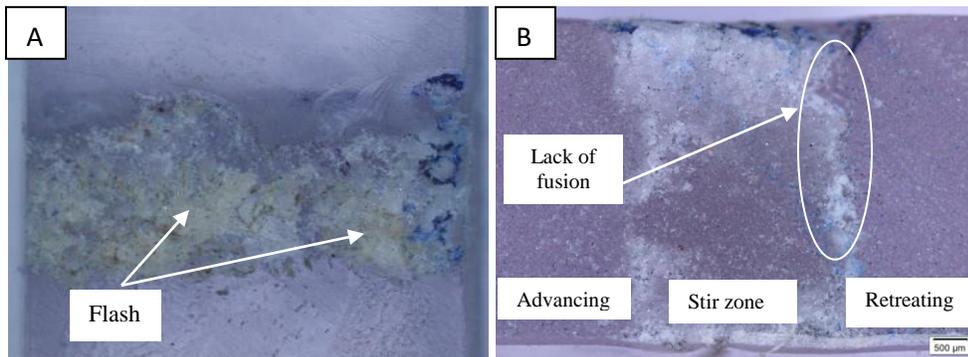
4. Penggunaan rasio diameter *shoulder* 14/3 mm/mm dan *depth plunge* 4,8 m



Gambar 4.5 Hasil struktur makro variasi 14/3 mm/mm & 4.8 mm (A) tampak atas, (B) tampak samping.

Pada Gambar 4.5 hasil struktur makro spesimen ini menunjukkan hasil permukaan yang merata meski masih terdapat gumpalan-gumpalan putih pada tampak atas (A) hasil pengelasan. Pada tampak samping (B) hasil struktur makro menunjukkan adanya cacat (void) yang pada daerah retreating side. Cacat ini terjadi karena terperangkapnya gelembung udara pada alur pengelasan yang tidak sempat keluar sebelum material pada permukaan lasan mengeras.

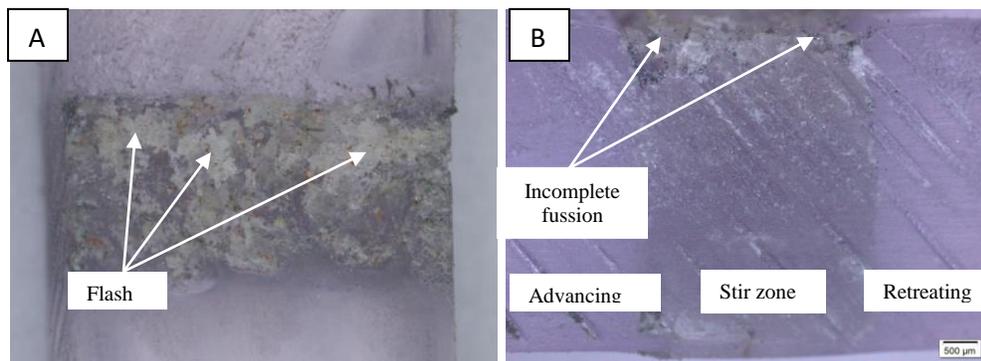
5. Penggunaan rasio diameter *shoulder* 16/3 mm/mm dan *depth plunge* 4,6 mm



Gambar 4.6 Hasil struktur makro variasi 16/3 mm/mm & 4.6 mm (A) tampak atas, (B) tampak samping.

Pada Gambar 4.6 hasil struktur makro spesimen ini menunjukkan hasil permukaan yang merata meski masih terdapat gumpalan-gumpalan putih pada tampak atas (A) hasil pengelasan. Pada tampak samping (B) pengelasan terdapat cacat *lack of fusion* pada daerah *retreating side*, hal ini disebabkan karena panas yg dihasilkan oleh pin tool kurang mengenai satu sisi material induk sehingga adukan material menjadi tidak sempurna menempel dengan spesimen pengelasan.

6. Penggunaan rasio diameter *shoulder* 16/3 mm/mm dan *depth plunge* 4,8 mm



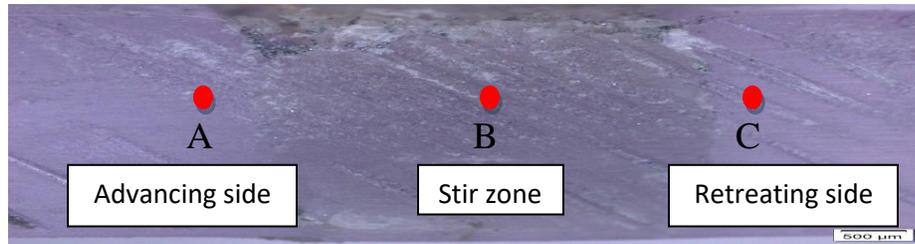
Gambar 4.7 Hasil struktur makro variasi 16/3 mm/mm & 4.8 mm (A) tampak atas, (B) tampak samping.

Pada Gambar 4.7 hasil struktur makro spesimen ini menunjukkan hasil permukaan yang merata meski masih terdapat gumpalan-gumpalan putih pada tampak atas (A) hasil pengelasan. Pada tampak (B) hasil struktur makro menunjukkan adanya cacat *incomplete fusion*. Hal ini terjadi karena pada saat proses pengadukan, geram-geram polikarbonat terlempar keluar dari alur pengelasan yang disebabkan oleh gerak putar tool.

4.3. Hasil Pengujian Kekerasan

Pada penelitian ini dilakukan pengujian kekerasan *shore durometer* tipe D pada enam spesimen uji yaitu; spesimen rasio diameter shoulder (10/3 mm/mm), (14/3 mm/mm), (16/3 mm/mm) dengan pembenaman tool 4,6 mm dan 4,8 mm. Letak titik pengujian pada sisi samping hasil pengelasan dengan tiga tempat yang berbeda yaitu; pada (A) *advancing side*, (B) *stir zone*, dan (C) *retreating side*

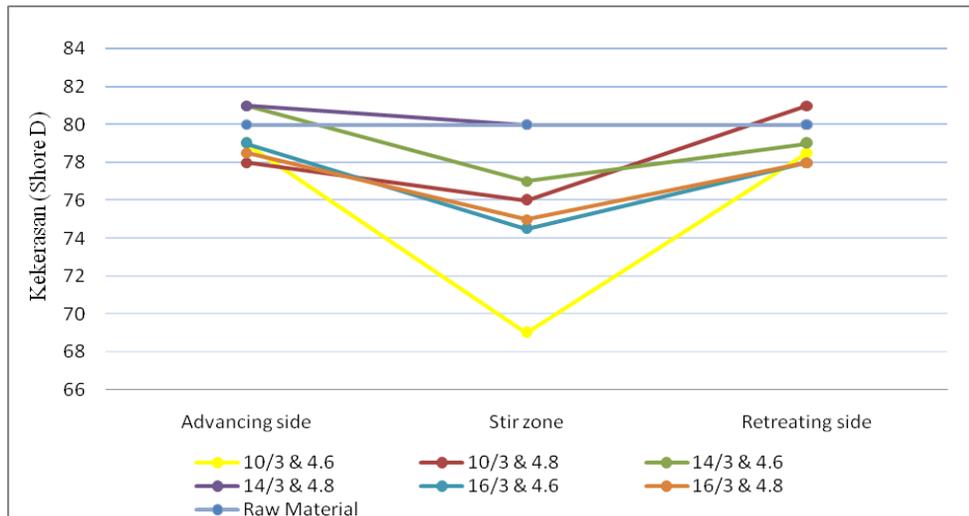
seperti pada Gambar 4.8 dan Tabel 4.1 hasil pengujian kekerasan FSW di bawah ini. Adapun hasil pengujian sebagai berikut:



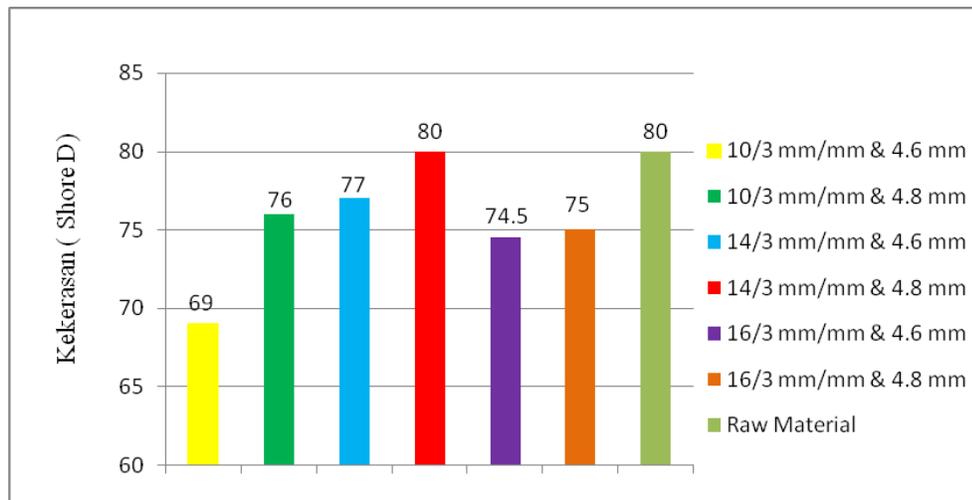
Gambar 4.8 Titik pengujian kekerasan.

Tabel 4.1 Hasil pengujian kekerasan FSW.

Variasi	Posisi titik pengujian		
	Advancing side	Stir zone	Retreating side
10/3 mm/mm & 4.6 mm	79	69	78,5
10/3 mm/mm & 4.6 mm	78	76	81
10/3 mm/mm & 4.6 mm	81	77	79
10/3 mm/mm & 4.6 mm	81	80	80
10/3 mm/mm & 4.6 mm	79	74,5	78
10/3 mm/mm & 4.6 mm	78,5	75	78
Raw Material	80		



Gambar 4.9 Grafik distribusi kekerasan pada titik pengujian.



Gambar 4.10 Kekerasan Shore D pada daerah *stir zone*.

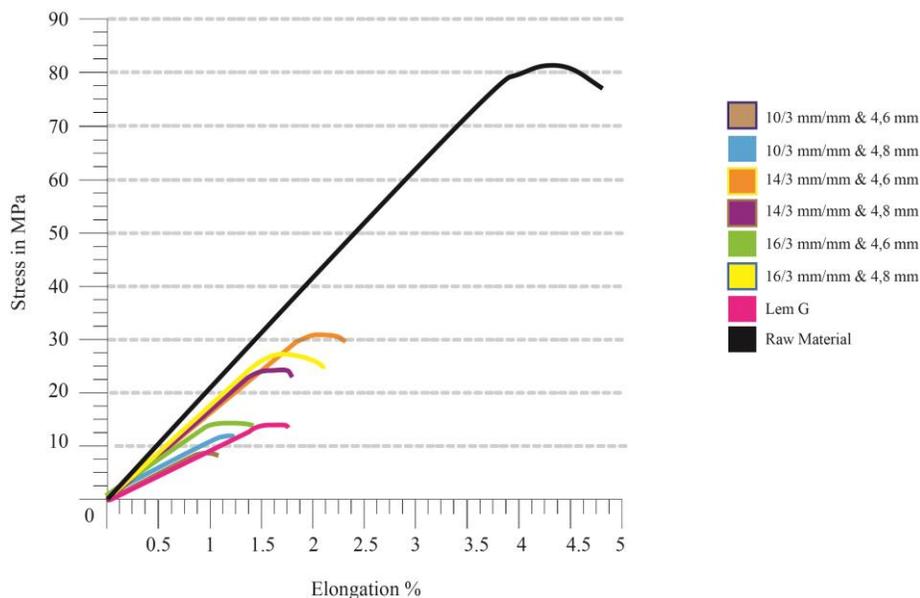
Dari grafik distribusi hasil pengujian kekerasan pada Gambar 4.9 diatas dapat diketahui bahwa pada daerah *advancing side* atau daerah material induk yang terkena gesekan *tool* arah maju memiliki nilai kekerasan tertinggi sebesar 81 Shore D didapatkan oleh variasi 14/3 mm/mm dan 4,8 mm. Hal ini dikarenakan pada daerah *advancing side* memiliki deformasi terbesar dari sifat mekanik dan termal sehingga material menjadi lebih padat dan lebih keras (Dudzik, 2014). Sedangkan pada daerah *retreating side* atau daerah material induk yang terkena gesekan *tool* arah mundur memiliki nilai kekerasan sebesar 80 Shore D pada variasi 14/3 mm/mm dan 4,8 mm lebih kecil dibandingkn dengan *advancing side*. Hal ini dikarenakan terjadi penyapuan material oleh putaran *shoulder tool* sehingga partikel material menjadi lebih renggang dan lunak.

Dari hasil pengujian kekerasan dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan tertinggi didapatkan pada daerah *advancing side*, sedangkan pada daerah *stir zone* selalu mendapatkan nilai kekerasan terendah dari setiap variasi pengelasan *friction stir welding*. Hal ini disebabkan karena pada daerah *stir zone* terjadi pengadukan oleh pin *tool* yang membuat butiran-butiran material polikarbonat tidak menyatu dengan sempurna seperti pada raw material.

Dari Gambar 4.10 diatas dapat diketahui bahwa hasil pengelasan di daerah *stir zone* dengan nilai kekerasan terendah terdapat pada variasi rasio diameter shoulder (10/3 mm/mm) dengan pembenaman pin tool 4,6 mm sebesar 69 Shore D. Hal ini dikarenakan panas yang dihasilkan oleh gesekan shoulder tool 10/3 mm/mm terlalu rendah karena luas bidang gesek shoulder nya yang kecil sehingga mengakibatkan lelehan material menjadi kurang efisien dan menghasilkan sambungan yang kurang homogen. Sedangkan nilai kekerasan tertinggi terdapat pada variasi rasio diameter shoulder (14/3 mm/mm) dengan pembenaman pin tool 4,8 mm yaitu sebesar 80 Shore D. Hal ini dikarenakan panas yang dihasilkan oleh gesekan shoulder tool 14/3 mm/mm yang cukup baik karena bidang geseknya lebih besar dari pada 10/3 mm/mm yang mengakibatkan lelehan material menjadi efisien dan menghasilkan sambungan las yang homogen.

4.4. Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik pada penelitian ini dilakukan pada material polimer jenis *polycarbonate* menggunakan standar ASTM D 638 tipe IV dengan kecepatan tarik sebesar 5 mm/menit.

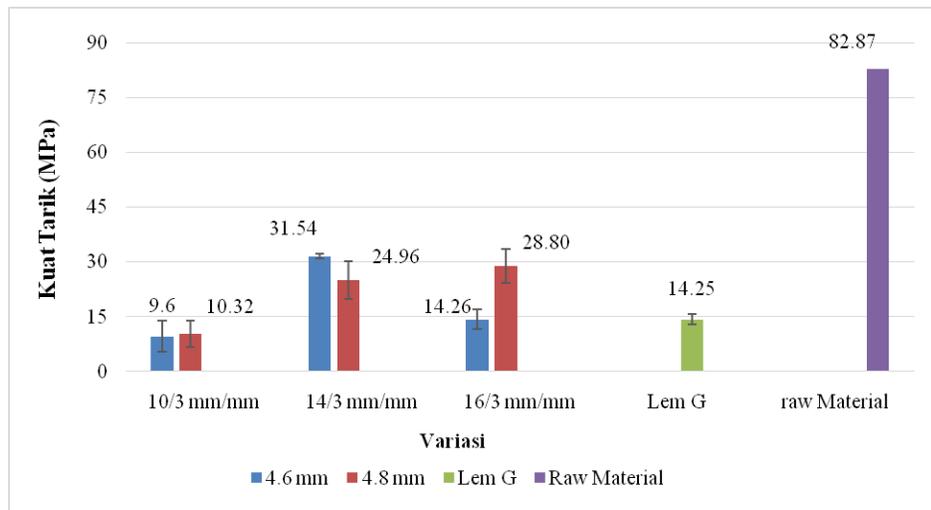


Gambar 4.11 Grafik tegangan-regangan hasil pengujian tarik.

Pada Gambar 4.11 menunjukkan bahwa pengujian tarik dilakukan pada tujuh variasi sambungan yaitu pada sambungan *polycarbonate*, sambungan menggunakan lem G sebagai pembanding dan *raw material*. Dari gambar diatas dapat diketahui sifat tarik sambungan *polycarbonate* dengan metode *friction stir welding*, *raw material*, dan perekat. *Raw material* ditunjukkan oleh garis hitam, material ini memiliki kuat tarik dan regangan yang tinggi karena tidak mendapat perlakuan apapun. Pada sambungan FSW tegangan tarik tertinggi di dapat pada hasil sambungan polikarbonat variasi 14/3 mm & 4.6 mm sebesar 31,543 MPa dengan nilai regangan sebesar 2,315 (%) ditunjukkan oleh garis orange, dan hasil tegangan tarik paling rendah didapatkan pada variasi sambungan 10/3 mm/mm & 4.6 mm sebesar 9,595 MPa dengan nilai regangan sebesar 1,09 % ditunjukkan oleh garis cokelat. Sedangkan nilai tegangan tarik yang didapat pada sambungan lem G yaitu sebesar 14,25 (MPa) dengan nilai regangan sebesar 1,7 % ditunjukkan oleh garis pink.

Tabel 4.2 Kekuatan tarik dari pengelasan *stir welding*.

Variasi (mm/mm & mm)	Spesimen 1 (MPa)	Spesimen 2 (MPa)	Rata- rata (MPa)	SD	Daerah putus
10/3 & 4.6	12.67	6.53	9.60	4.34	Interface stir & Retreating side
10/3 & 4.8	7.58	12.80	10.32	3.69	Interface stir & Retreating side
14/3 & 4.6	31.14	31.95	31.54	0.58	Interface stir & Retreating side
14/3 & 4.8	21.28	28.63	24.96	5.20	Interface stir & Retreating side
16/3 & 4.6	12.32	16.20	14.26	2.75	Interface stir & Retreating side
16/3 & 4.8	32.1	25.49	28.80	4.67	Interface stir & Retreating side
Lem G	13.19	15.31	14.25	1.50	Sambungan lem
Raw Material	82.87		82.87		Tengah spesimen



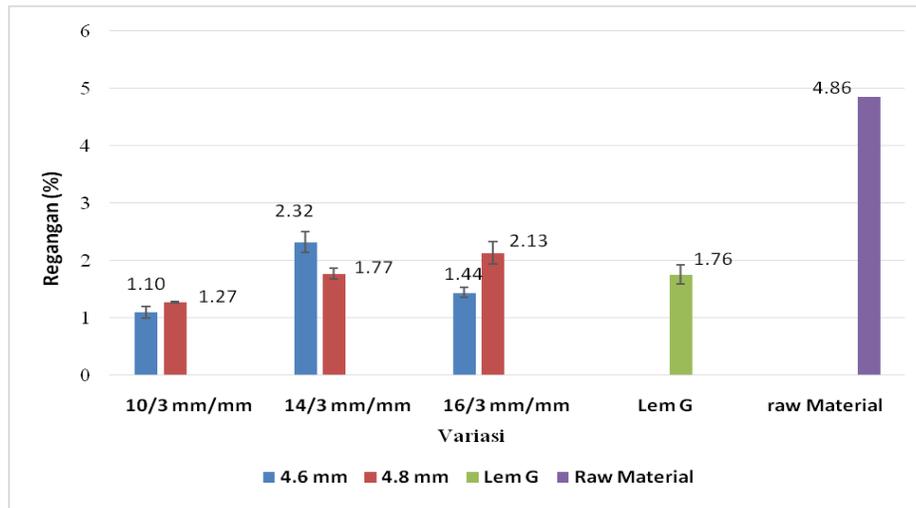
Gambar 4.12 Grafik tegangan pada pengujian tarik.

Dari tabel 4.2 diketahui bahwa nilai standar deviasi terbesar dimiliki oleh variasi rasio diameter *shoulder* 14/3 mm/mm dengan *depth plunge* 4,8 mm sebesar 5,59 MPa sedangkan nilai standar deviasi terendah yaitu dimiliki oleh variasi diameter *shoulder* 14/3 mm/mm dengan *depth plunge* 4,6 mm sebesar 0,57 MPa.

Pada Gambar 4.12 menunjukkan nilai kuat tarik pada kedalaman pembedaman pin 4,8 mm semakin meningkat dari *shoulder* 10 mm hingga *shoulder* 16 mm. Hal ini sesuai dengan penelitian (Triyono, 2015) yang mengatakan semakin dalam kedalaman pembedaman pin tool maka semakin besar pula panas penetrasi yang dihasilkan, sehingga mengakibatkan produksi *friction heat* meningkat. Peningkatan *friction heat* akan menghasilkan material leleh semakin banyak sehingga pengadukan material dapat menghasilkan permukaan yang merata.

Tabel 4.3 Hasil pengujian tarik terhadap regangan.

Variasi (mm/mm & mm)	Spesimen 1 (%)	Spesimen 2 (%)	Rata-rata (%)	SD	Daerah putus
10/3 & 4.6	1.17	1.03	1.10	0.10	Interface stir & Retreating side
10/3 & 4.8	1.28	1.25	1.27	0.02	Interface stir & Retreating side
14/3 & 4.6	2.44	2.19	2.32	0.18	Interface stir & Retreating side
14/3 & 4.8	1.70	1.84	1.77	0.10	Interface stir & Retreating side
16/3 & 4.6	1.37	1.50	1.44	0.09	Interface stir & Retreating side
16/3 & 4.8	2.28	1.99	2.13	0.20	Interface stir & Retreating side
Lem G	1.64	1.88	1.76	0.17	Sambungan lem
Raw Material	4.86		4.86		Tengah spesimen



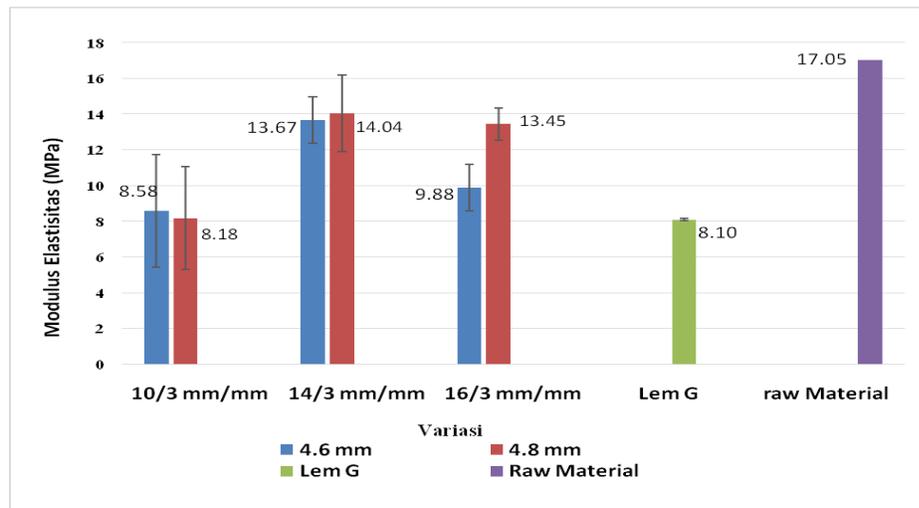
Gambar 4.13 Grafik regangan pada pengujian tarik.

Dari tabel 4.3 diketahui bahwa nilai standar deviasi terbesar dimiliki oleh variasi rasio diameter *shoulder* 14/3 mm/mm dengan *depth plunge* 4,8 mm sebesar 0,2 %, sedangkan nilai standar deviasi terendah yaitu dimiliki oleh variasi diameter *shoulder* 10/3 mm/mm dengan *depth plunge* 4,8 mm sebesar 0,01 %.

Pada Gambar 4.13 regangan rata-rata tertinggi pada hasil pengujian tarik terdapat pada variasi rasio diameter *shoulder* 14/3 mm/mm dan *depth plunge* 4,6 mm sebesar 2,31 % dengan nilai standar deviasi sebesar 0.17 %, dan nilai regangan terendah dihasilkan oleh variasi rasio diameter *shoulder* 10/3 mm/mm dan *depth plunge* 4,6 mm sebesar 1,09 % dengan nilai standar deviasi sebesar 0,1%. Hasil regangan dan tegangan rata-rata tertinggi dihasilkan oleh variasi rasio diameter *shoulder* 14/3 mm/mm dan *depth plunge* 4,6 mm Hal ini dapat disimpulkan bahwa regangan berbanding lurus dengan tegangan dan begitu pula sebaliknya.

Tabel 4.4 Hasil pengujian tarik terhadap modulus elastisitas.

Variasi (mm/mm & mm)	Spesimen 1 (MPa)	Spesimen 2 (MPa)	Rata- rata (MPa)	SD	Daerah putus
10/3 & 4.6	10.80	6.4	8.58	3.14	Interface stir & Retreating side
10/3 & 4.8	6.14	10.2	8.18	2.88	Interface stir & Retreating side
14/3 & 4.6	12.76	14.6	13.67	1.29	Interface stir & Retreating side
14/3 & 4.8	12.52	15.6	14.04	2.15	Interface stir & Retreating side
16/3 & 4.6	8.97	10.8	9.88	1.29	Interface stir & Retreating side
16/3 & 4.8	14.09	12.8	13.45	0.91	Interface stir & Retreating side
Lem G	8.04	8.2	8.10	0.08	Sambungan lem
<i>Raw Material</i>	17.05		17.05		Tengah spesimen



Gambar 4.14 Grafik modulus elastisitas pada pengujian tarik.

Dari tabel 4.4 diketahui bahwa standar deviasi tertinggi terdapat pada variasi rasio diameter shoulder 10/3 mm/mm dengan depth plunge 4,6 mm sebesar 3,13 MPa dan standar deviasi terendah terdapat pada sambungan lem G sebesar 0,07 MPa.

Pada Gambar 4.14 hasil pengujian tarik terhadap modulus elastisitas diatas diketahui bahwa nilai modulus elastisitas tertinggi terdapat pada variasi sambungan polikarbonat 14/3 mm/mm & 4,8 mm sebesar 14,03 MPa dan nilai modulus elastisitas terendah terdapat pada variasi sambungan polikarbonat 10/3 mm/mm & 4,8 mm sebesar 8,18 MPa. Hal ini terjadi karena semakin besar nilai modulus elastisitas maka semakin besar juga tegangan yang dibutuhkan untuk regangan tertentu dan sebaliknya.

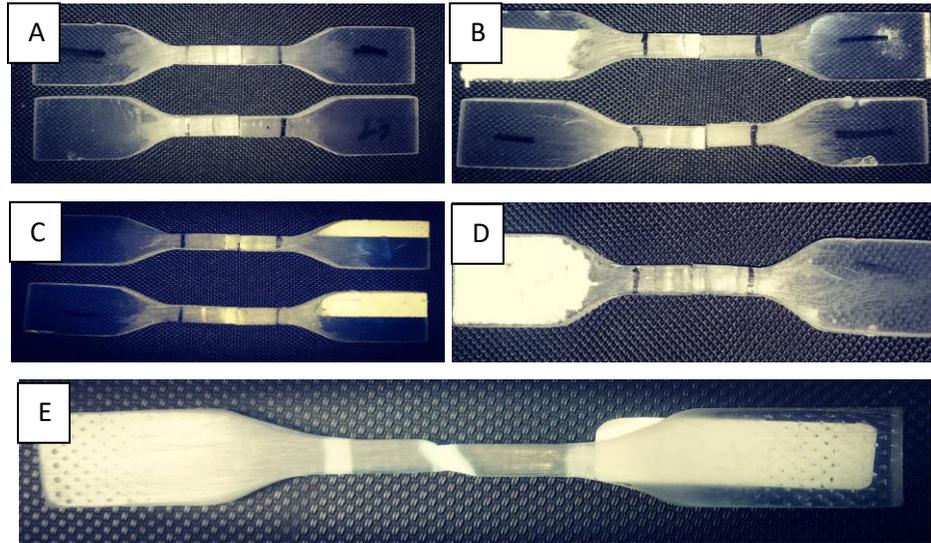
Tabel. 4.5 Perbandingan hasil tegangan regangan pada penelitian terdahulu dengan sekarang.

Penelitian Terdahulu (Shazly dkk, 2014)				Penelitian Sekarang		
Material <i>Polycarbonate</i>				Material <i>Polycarbonate</i>		
Putaran <i>Spindle</i> (Rpm)	Feed rate (mm/min)	Sudut kemiringan (°)	Kuat Tarik (MPa)	Rasio diameter shoulder	<i>Depth Plunge</i> (mm)	Kuat Tarik (MPa)
1000	20	1°	6.8	10/3 mm/mm	4.6	9.59
		3°	13.4			
	40	1°	12		4.8	10.32
		3°	17.6			
1220	20	1°	17.7	14/3 mm/mm	4.6	31.54
		3°	13.2			
	40	1°	17.7		4.8	24.95
		3°	15.2			
1850	20	1°	9.4	16/3 mm/mm	4.6	14.25
		3°	13.2			
	40	1°	16		4.8	28.79
		3°	15.2			
				Lem G		14.25
				Raw Material		82.87

Pada Tabel 4.5 menunjukkan perbandingan hasil penelitian pengujian tarik menggunakan material polycarbonate yang dilakukan oleh (Shazly dkk 2014) dengan penelitian sekarang. Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa pada penelitian sekarang memiliki hasil yang lebih tinggi dari pada penelitian sebelumnya. Nilai kuat tarik tertinggi pada penelitian sekarang sebesar 31,54 (MPa) atau 38,05 % dari kuat tarik raw material, didapatkan oleh variasi diameter *shoulder* 14/3 mm/mm dan pin tool *depth plunge* 4,6 mm, sedangkan nilai kuat tarik tertinggi pada penelitian sebelumnya 17,7 (MPa) atau 21,5 % dari kuat tarik raw material, didapatkan oleh variasi putaran tool 1220 Rpm. Hasil tersebut disebabkan oleh penggunaan variasi pengelasan yang berbeda-beda, rasio diameter shoulder yang lebih besar pada penelitian sekarang 14/3 mm/mm lebih optimal dalam mengaduk material dari pada 25/7 mm/mm pada penelitian sebelumnya.

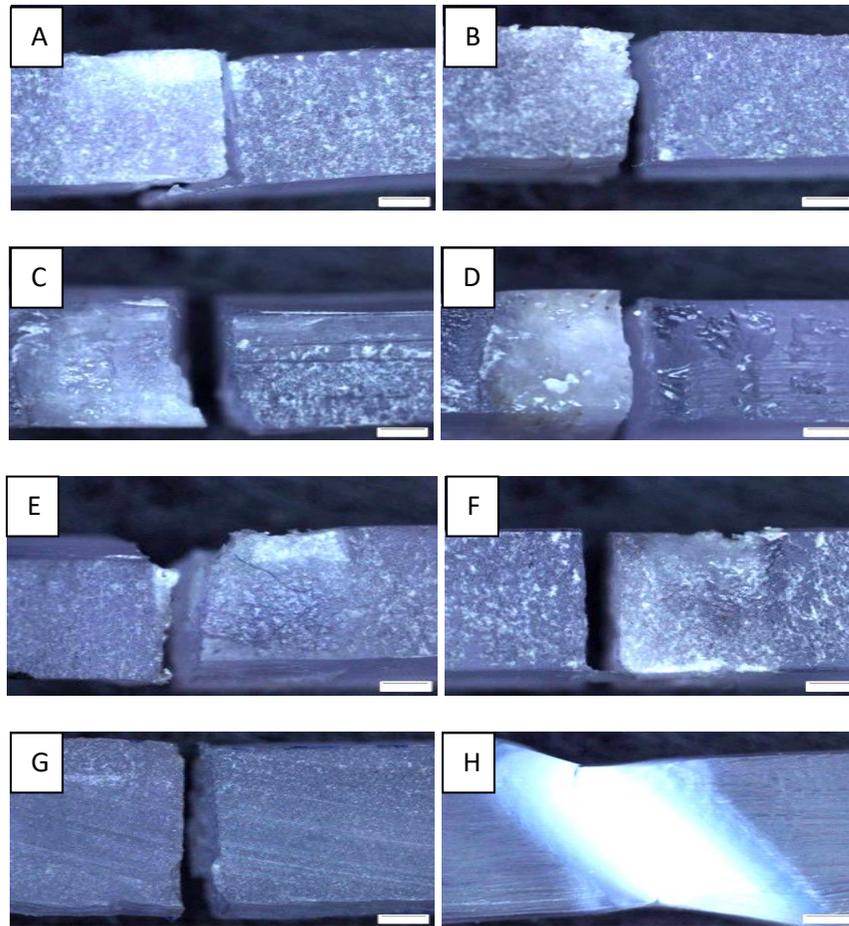
4.5. Fraktografi

Fraktografi adalah gambar hasil patahan benda uji setelah proses pengujian tarik. Hasil patahan biasanya diambil dengan menggunakan mikroskop supaya terlihat lebih jelas dan dapat mengetahui posisi patah spesimen pengujian.



Gambar 4.15 Spesimen setelah pengujian tarik variasi rasio diameter shoulder dan kedalaman pembedaman pin (depth plunge), A. 10/3 mm/mm, B. 14/3 mm/mm, C. 16/3 mm/mm, D. lem G, & E. *raw material*.

Pada Gambar 4.16 dapat dilihat hasil gambar patahan yang terjadi pada variasi sambungan dengan metode FSW mengalami patah getas yang ditunjukkan oleh gambar (A, B, C, D, E dan F). Hal ini terjadi karena pada hasil sambungan pengelasan FSW mendapat perlakuan yang menyebabkan luas daerah yang mampu menahan beban tarik lebih kecil sehingga dapat terjadinya cacat yang mengakibatkan terjadinya patah getas. Pada sambungan Lem G, ditunjukkan oleh gambar (G) patahan yang terjadi yaitu patah getas, ini dikarenakan lem hanya merekatkan dua bagian polycarbonate, tidak seperti pengelasan FSW yang prosesnya mengaduk benda kerja hingga lelehan menyatu satu sama lain. Sedangkan pada raw material patahan yang terjadi yaitu patah ulet, hal ini terjadi karena pada raw material tidak mendapat perlakuan apapun, ditunjukkan oleh gambar (H).



Gambar 4.16 Hasil Patahan spesimen pengujian tarik dengan variasi A. 10/3 mm/mm & 4,6 mm/mm, B. 10/3 mm/mm & 4,8 mm/mm, C. 14/3 mm/mm & 4,6 mm/mm, D. 14/3 mm/mm & 4,8 mm/mm, E. 16/3 mm/mm & 4,6 mm/mm, F. 16/3 mm/mm & 4,8 mm/mm, G. Lem G, dan, H. raw material.

Hasil uji tarik pada raw material patahan terletak di gage length, pada sambungan lem G patahan terletak di tengah sambungan lem, sedangkan pada sambungan FSW patahan terletak di *interface* antara *stir zone* dengan *retreating side*. Hal ini disebabkan karena pada daerah tersebut tidak terjadi pepadatan butiran, sehingga memicu struktur yang lunak. Hal tersebut sesuai dengan apa yang di tunjukan pada hasil foto makro dimana pada daerah *interface* antara *stir zone* dengan *retreating side* terindikasi adanya cacat *incomplete fussion*.