

ANALISA SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO HASIL PENGELASAN GESEK PIPA *STAINLESS STEEL AISI 304L*

Muh. Iswar, Abdul Salam¹⁾, Aminuddin, Fahrudin²⁾

Abstract: Friction welding is a metal connection that occurs due to heat caused by pressure/friction force due to rotation of metal one to other metal axis. In addition, spindle shaft with this process can minimize the shift axis of the welded material. The purpose of this research is to know the effect of variation of rotation speed and wrought time on mechanical properties (tensile strength, flexural and hardness) and microstructure of AISI 304L Stainless Steel pipe of friction welding. The experiment was carried out by stages of friction welding process on Pindad type lathes by varying the rotation (550 rpm, 1020 rpm and 1800 rpm) and wrought time (25 seconds, 35 seconds, 45 seconds) using stopwatch. The axial force is obtained through a power screw mechanism on the tail-stock with a forging pressure of ($P_u = 28.02$ MPa). Welding temperature is 1050°C . The friction welding results are then formed into specimens for mechanical testing of tensile test specimens and standard ISO 82-1974 (E) test, DP8 size and hardness test using the Rockwell method. The test result showed that the tensile strength of the friction welding result with the highest σ max value in 1800 rpm/45 second specimen was $446,22$ N/mm² decreased when compared with raw material that is $788,62$ N/mm². the bending strength of the friction welding result with the highest σ max value in the 1800 rpm / 45 second specimen is 1470 N / mm² decreased when compared with the raw material ie 1950 N/mm². The highest hardness value is located in the part of the welded joint of specimen with variation of 1800 rpm / 45 second rotation of $77,5$ HRA decrease from hard raw material value is $81,0$ HRA. Rotation variations affect the mechanical properties of the material, the higher the engine rotation the value of its strength increases. Similarly, if the wrought time longer then the value of strength will also increase. Observations on microstructure with the variation of rotation speed and time of wrought there is a noticeable change is in the weld metal there are many austenite so that the strength and hardness value almost closer to Raw material hardness value. As for the HAZ area that there are many ferrit so that the strength and hardness value close to hardness value Raw material.

Keywords: Friction Welding, Stainless Steel AISI 304L, Engine Ranges, Forging Time, Tensile Strength, Bending Strength, Violence Value and Micro Structure.

I. PENDAHULUAN

Pengelasan adalah proses penyambungan setempat antara dua bagian logam dengan cara memanaskannya hingga mencapai titik leleh dari logam tersebut dengan memanfaatkan energi panas yang berasal dari nyala busur ataupun gesekan. Pengelasan merupakan suatu proses penting di dalam dunia industri dan merupakan bagian yang tak terpisahkan dari pertumbuhan industri, karena memegang peranan utama dalam rekayasa dan reparasi produksi logam (Budi Santoso. 2014).

Penyambungan poros dengan cara ini biasanya sangat sulit untuk mempertahankan kesatusumbuan dari benda kerja yang akan dilas. Proses pengelasan produk bentuk pipa akan sedikit mengalami kesulitan karena

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

² Alumni Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

selama proses pengelasan maka diperlukan suatu gerakan berputar dari pipa supaya operator pengelasan akan mudah dalam proses penyambungan. Namun kesulitan tersebut dapat diatasi dengan penerapan teknologi las gesek (*friction welding*). Metode ini sangat dipengaruhi oleh durasi gesekan, temperatur, kecepatan rotasi dan waktu tempa. Pengelasan gesek (*friction welding*) merupakan pengelasan tanpa menggunakan kawat las/elektroda sehingga bisa dipastikan bahwa sambungan yang diperoleh antara kedua material yang dilas adalah sambungan yang homogen. Selain itu penyambungan poros dengan proses ini dapat meminimalisir bergesernya sumbu dari material yang dilas. Kualitas hasil pengelasan *friction welding* memiliki permukaan yang lebih halus dan rata dari hasil pengelasan tradisional lain, kuat dan tidak ada pori-pori yang timbul. Proses ini ramah terhadap lingkungan karena tidak ada uap atau percikan dan tidak ada silauan busur nyala pada *fusion*.

Dalam proses pengelasan gesek, kecepatan putaran merupakan variabel yang sensitif dan dalam hal ini dapat divariasikan jika waktu dan temperatur pemanasan serta tekanan dikontrol dengan baik. Secara umum, kecepatan putaran yang lebih tinggi dapat digunakan untuk mengelas bahan peka panas seperti *Stainless Steel*. Berbeda halnya dengan penelitian sebelumnya yaitu menggunakan *Stainless steel* poros pejal (Ishak, 2015), menjelaskan tentang pengaruh variasi putaran dan waktu tempa pada pengelasan gesek *Stainless Steel* AISI 301 terhadap sifat mekanik. Dimana hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa kekuatan tarik dari hasil las gesek dengan nilai maksimal tertinggi pada spesimen 1800 rpm/ 45 detik yaitu 706,61 N/mm² mengalami penurunan jika dibandingkan dengan raw material yaitu 780,25 N/mm². Nilai kekerasan paling tinggi terletak di bagian sambungan las spesimen dengan variasi putaran 550 rpm dan waktu tempa 25 detik sebesar 61,5 HRA sedangkan nilai kekerasan logam induk yaitu 69,45 HRA.

Tabel 1. Komposisi kimia *stainless steel* AISI 304L

Sifat	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Fe
Nilai	0.03	2	0.045	2	0.75	18.00-20.00	8.00-12.00	0.1	Balance

Kadar kromium yang cukup tinggi protektif untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Komposisi karbon rendah untuk meminimalisasi sensitisasi akibat proses pengelasan. Titik lebur (*melting point*) dikisaran 1399 - 1454 °C.

Suhu pengelasan gesek diperoleh berdasarkan temperatur rekristalisasi. Temperatur rekristalisasi adalah perubahan struktur Kristal akibat pemanasan pada suhu kritis dimana untuk suhu kritis pada baja karbon adalah pada 723°C, sehingga dapat diartikan lebih lanjut bahwa temperatur rekristalisasi adalah suatu proses dimana butir logam yang terdeformasi digantikan oleh butiran baru yang tidak terdeformasi yang intinya tumbuh sampai butiran asli termasuk didalamnya.

Tabel 2. Temperatur rekristalisasi dan temperature lebur

Logam	Temperatur rekristalisasi		Temperatur Lebur	
	°C	°F	°C	°F
Lead	-4	25	327	620
Tin	-4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminium (99,999 wt%)	80	176	660	1220
Copper (99,999 wt%)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu – 40 Zn)	475	887	900	1652
Nikel (99,999 wt%)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

Proses rekristalisasi pada logam murni terjadi lebih cepat dibandingkan paduan. Untuk logam murni, temperatur rekristalisasi (T_r) umumnya adalah $0.3T_m$ dimana T_m merupakan temperatur lebur. Untuk beberapa paduan temperature rekristalisasi adalah $0.7T_m$. Berdasarkan data temperatur titik lebur (*melting point*, T_m) pipa *stainless steel* AISI 304L sebesar 1399 – 1454 °C, maka suhu pengelasan gesek/suhu rekristalisasi yaitu: $0,7 \times T_m$; $0,7 \times 1500 = 1050^\circ\text{C}$.

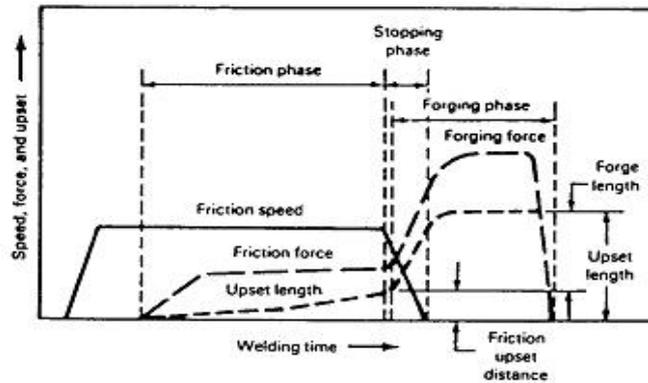
II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan selama ± 6 bulan dan bertempat di Bengkel Mekanik, Bengkel Las dan Laboratorium Mekanik Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Pipa *stainless steel* AISI 304L diameter 42,2 mm. Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri darimesin bubut manual, mesin uji tarik, mesin uji kekerasan, mesin gergaji besi, mesin gerinda, mesin pengamplas (polish), amplas, kikir, jangka sorong, *stopwatch*, *microskop*, *dial indicator* dan berbagai alat ukur dimensi lainnya.

Pada pengelasan gesek, penyambungan terjadi oleh adanya panas yang ditimbulkan oleh gesekan akibat perputaran satu dengan yang lain antara logam-logam induk dibawah pengaruh gaya aksial. Kemudian salah satu diputar sehingga pada permukaan kontak akan timbul panas, bahkan mendekati titik didih logamnya, sehingga permukaan logam didaerah tersebut menjadi plastis. Dalam kondisi panas tersebut, pergerakan atau gesekan yang terjadi antar kedua logam dihentikan, kemudian diaplikasikan gaya tekan arah aksial, sehingga terjadi sambungan las gesek. Proses las gesek ini juga telah dilakukan oleh Nur et al. (2017) untuk menyambung bahan aluminium alloy 5052 dengan metode FSW (Friction Stir Welding).

- a. Fase awal : satu benda kerja diputar dan benda lain dalam keadaan diam.
- b. Fase gesekan : kedua benda kerja saling disentuhkan permukaannya dan gaya aksial diberikan untuk memulai proses pengelasan.
- c. Fase *forging* : rotasi benda kerja dihentikan kemudian beban diberikan untuk memberikan tekanan akhir dan proses pengelasan selesai.

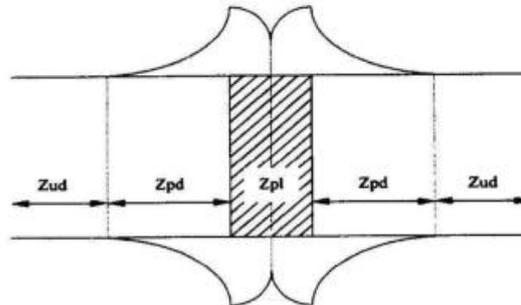
Kecepatan rotasi, tekanan aksial, dan waktu pengelasan serta suhu permukaan merupakan parameter pengelasan yang digunakan untuk memberikan kombinasi yang diperlukan dalam membentuk pengelasan. Parameter tersebut disesuaikan sehingga kedua permukaan yang dipanaskan berada dalam kisaran suhu di mana pengelasan dapat berlangsung. Setelah kedua permukaan dipanaskan, tekanan aksial digunakan untuk menyambung kedua permukaan logam yang bergesekan. Selama tahap terakhir dari proses pengelasan, difusi atom terjadi sementara permukaan yang bersentuhan memungkinkan untuk membentuk ikatan metalurgi diantara kedua bahan. Hubungan diantara variabel-variabel proses pengelasan ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Hubungan antara variabel proses pengelasan

Tiga daerah hasil pengelasan yang akan kita temui bila kita melakukan pengelasan gesek yaitu sebagai berikut :

- a. Daerah logam las ; bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku.
- b. Daerah pengaruh panas atau *Heat Affected Zone (HAZ)* ; logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat sehingga daerah ini yang paling kritis dari sambungan las.
- c. Logam induk adalah bagian logam dasar di mana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan.



Gambar 2. Daerah hasil pengelasan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

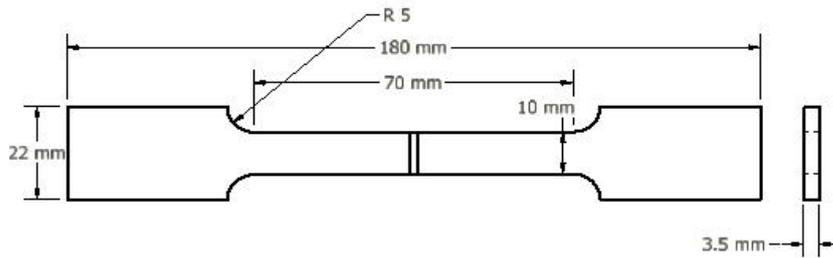
Tabel 3. Pengujian Awal

Kecepatan	Waktu	Tekanan	Suhu Pengelasan
550	25 s	28.02 Mpa	±1050°C
	35 s		
	45 s		
1020	25 s		
	35 s		
	45 s		
1800	25 s		
	35 s		
	45 s		

Pemberian tekanan tersebut diperoleh, ditetapkan dan dibatasi berdasarkan percobaan terlebih dahulu. Jika tekanan ditingkatkan lagi, maka timbul getaran mesin yang tinggi, spesimen mengalami pergeseran, dan hasil pengelasan menjadi tidak seumbu. Temperatur pengelasan dapat dicapai dengan beban tersebut.

A. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilaksanakan di Laboratorium Mekanik Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang. Tujuan pengujian ini ialah untuk mengetahui nilai kekuatan tarik Pipa *stainlesssteel Aisi 304L* hasil pengelasan gesek dengan variasi kecepatan putaran dan waktu tempa. Pengujian juga dilakukan pada *rawmaterial* agar dapat dibandingkan dengan material hasil pengelasan. Mesin yang digunakan yaitu *Universal Testing Machine Galdabini* 10 ton dengan ukuran spesimen sesuai standar ISO 82-1974 (E), DP8, $l_0 = 70$ mm.



a) dimensi spesimen uji



b) sebelum pengujian



c) setelah pengujian

Gambar 3. Spesimen uji tarik

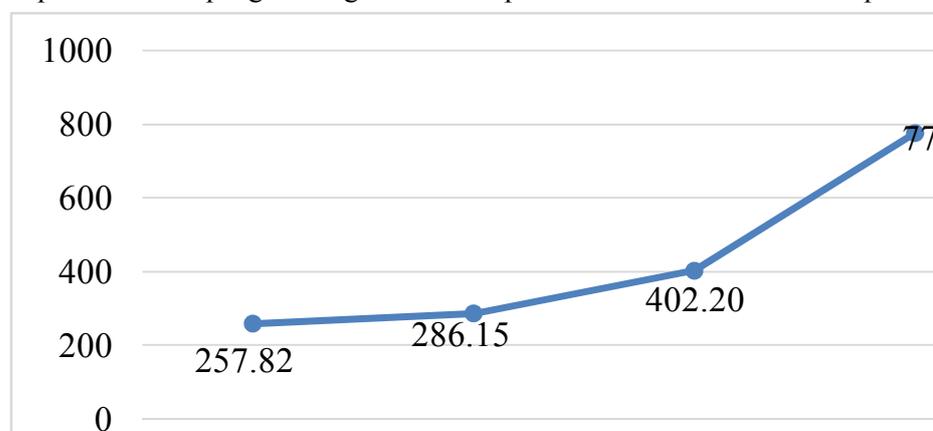
Setelah melakukan pengujian, hasil data yang diperoleh dapat dilihat pada tabel 4 yaitu sebagai berikut :

Tabel 4. Hasil perhitungan data uji Tarik

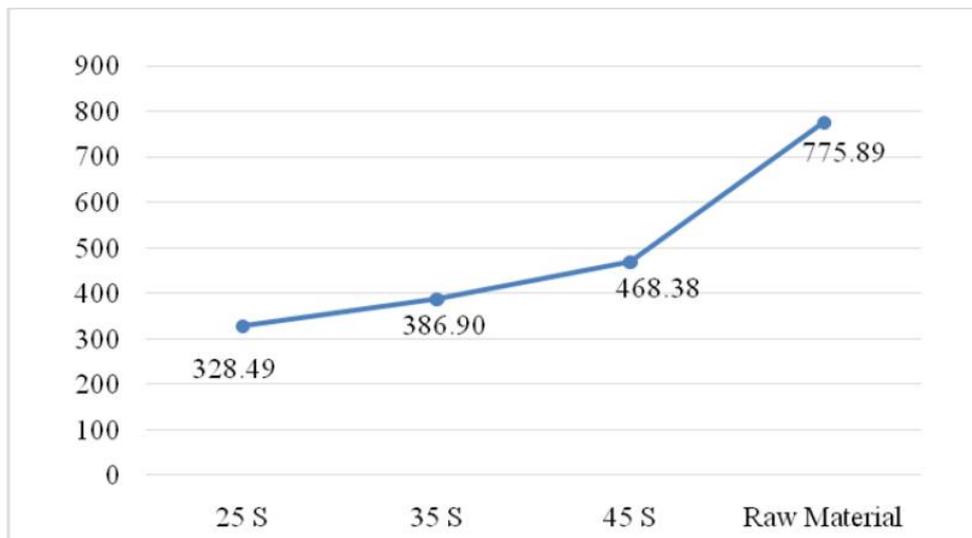
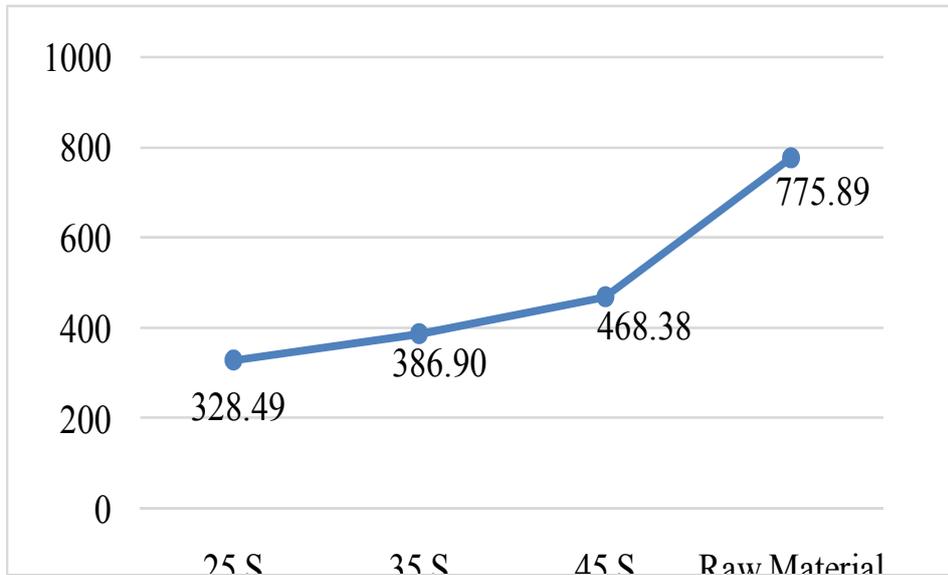
Kecepatan putaran	Waktu Tempa	ΔL_p	ΔL dial	σ_u (Mpa)	σ_p (Mpa)	$\dot{\epsilon}$ (%)	r (%)	E
1020 rpm	25 s	0.25	9.1	281.09	121.46	1.3	8.6	92.41
		0.55	11.3	375.89	142.3	2	6.04	72.18
	35 s	0.3	2.2	111.41	28.9	0.4	9.87	65.26
		0.5	3.2	62.39	52.51	0.2	35.45	282.74
		1.1	7.2	175.77	91.86	1.1	16.45	80.37
		0.6	5.6	160.99	104.61	1.1	15.43	98.95
1800 rpm	25 s	0.8	7.6	133.94	81.07	1.2	17.16	68.37
		0.75	14.7	381.7	135.04	1.4	10.22	99.5
	35 s	0.78	3.1	174.48	140.14	0.9	7.07	148.63
		0.72	7.5	237.82	124.86	1	13.39	126.66
	45 s	1.2	14.7	446.22	301.85	2.9	14.77	104.6
		0.75	7.1	358.18	198.84	2.4	12.32	81.87
Raw material		0.34	17.8	788.62	383.87	25.24	52.23	3124.13

Dari data yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa nilai kekuatan tarik pada kecepatan putaran 1800 rpm dengan waktu 45 detik adalah nilai kekuatan tarik tertinggi pada pengujian ini yaitu sebesar 358.18 Mpa. Sedangkan nilai kekuatan tarik *Raw Material* lebih besar dibandingkan nilai kekuatan tarik pengujian yaitu 788.62 Mpa.

Berikut adalah grafik tegangan tarik sambungan las Pipa *stainless steel* Aisi 304L untuk kecepatan putaran 1020 rpm dan 1800 rpm. Grafik tersebut terbentuk dari nilai yang diperoleh dari data perhitungan hasil uji tarik tabel 4. Grafik tersebut memperlihatkan perbandingan tegangan tarik antara *raw material* dan spesimen hasil pengelasan gesek variasi putaran mesin serta waktu tempa.



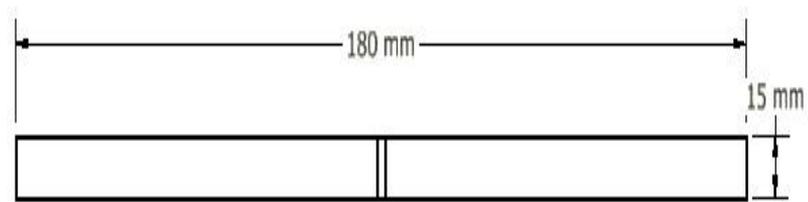
a). Tegangan maksimum 1020 rpm



b). Tegangan maksimum 1800 rpm

B. Pengujian Lentur

Pengujian Lentur dilaksanakan di Laboratorium Mekanik Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang. Tujuan pengujian ini ialah untuk mengukur kekuatan material akibat pembebanan dan kekenyalan hasil sambungan las baik di *weld metal* maupun HAZ pada Pipa *stainlesssteel* Aisi 304L hasil pengelasan gesek dengan variasi kecepatan putaran dan waktu tempa. Pengujian juga dilakukan pada *raw material* agar dapat dibandingkan dengan material hasil pengelasan. Mesin yang digunakan yaitu *Universal Testing Machine Galdabini* 10 ton dengan ukuran spesimen sesuai standar ISO 82-1974 (E), DP8, $l_0 = 180$ mm.



a). dimensi spesimen uji



b). sebelum pengujian



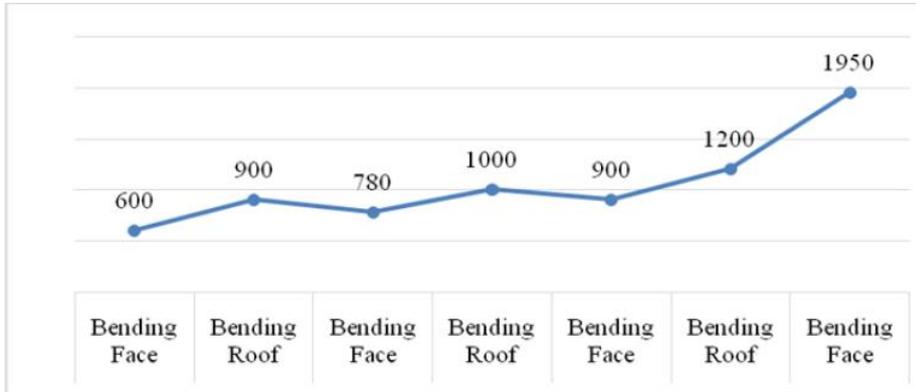
c). Setelah pengujian

Gambar 4. Spesimen uji lentur

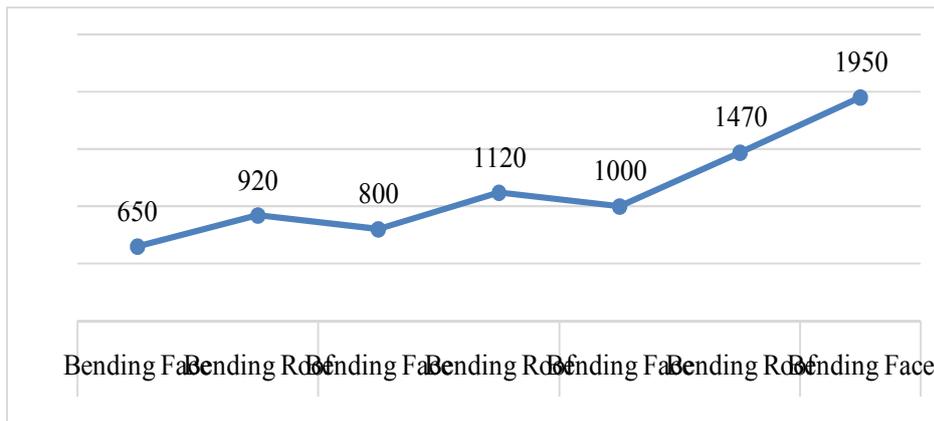
Tabel 5. Hasil Perhitungan data uji lentur

Kecepatan Putaran	Waktu Tempa	Jenis	Fmax	Fmax (N)	Keterangan
1020 rpm	25 S	Bending Face	0.6	600	Patah
		Bending Roof	0.9	900	Retak
	35 S	Bending Face	0.78	780	Patah
		Bending Roof	1	1000	Retak
	45 S	Bending Face	0.9	900	Patah
		Bending Roof	1.2	1200	Patah
1800 rpm	25 S	Bending Face	0.65	650	Patah
		Bending Roof	0.92	920	Retak
	35 S	Bending Face	0.8	800	Patah
		Bending Roof	1.12	1120	Patah
	45 S	Bending Face	1	1000	Patah
		Bending Roof	1.47	1470	Retak
Raw Material		Bending Face	1.95	1950	tidak Patah

Data yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa nilai kekuatan lentur pada kecepatan putaran 1800rpm dengan waktu 45 detik adalah nilai kekuatan lentur tertinggi pada pengujian ini yaitu sebesar 1470N. Sedangkan nilai kekuatan lentur *Raw Material* lebih besar dibandingkan nilai kekuatan tarik pengujian yaitu 788.62 Mpa.



a). Data Tegangan Maksimum 1020 rpm



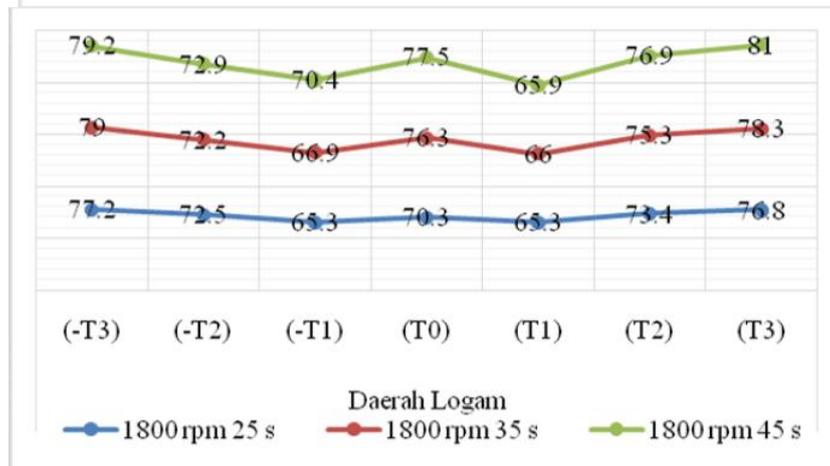
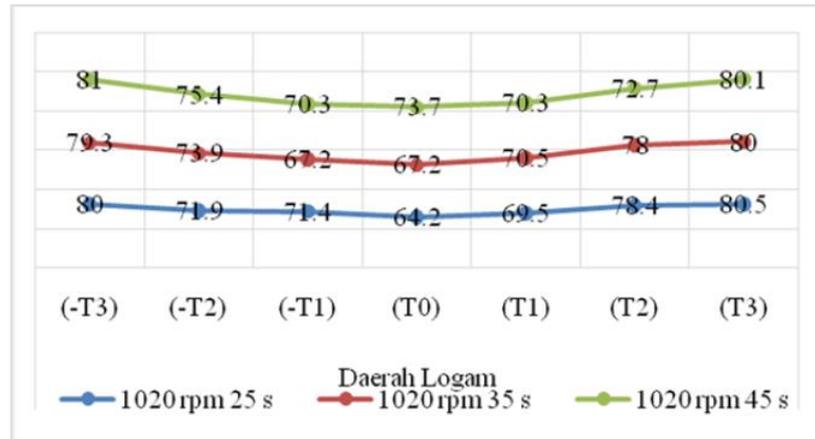
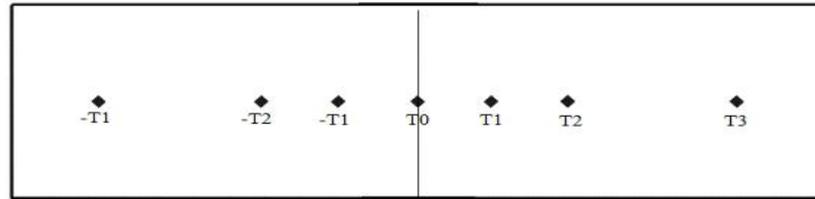
b). Data Tegangan Maksimum 1800 rpm

Dari kedua grafik diatas, yang terlihat bahwa spesimen uji kecepatan putaran 1020 rpm dan 1800 rpm dengan waktu tempa 25s, 35s, dan 45s memiliki nilai kelenturan yang sangat rendah ketika di uji menggunakan metode *bending face* dan semua spesimen mengalami patah di daerah las sedangkan ketika di uji menggunakan metode *bending roof* kekuatan lenturnya meningkat dari nilai *bending face* dan sebagian besar spesimen tidak patah tapi mengalami keretakan di daerah las. Nilai kelenturannya dari semua spesimen sangat jauh dari *raw material* sebesar 1950 N. Spesimen dengan nilai kelenturan paling tinggi terletak kecepatan putaran 1800 rpm dan waktu tempa 45 detik sebesar 1470 N sedangkan nilai kekerasan terendah diperoleh pada spesimen dengan kecepatan putaran 1020 rpm dan waktu tempa 25 detik sebesar 600 N.

C. Pengujian Kekerasan

Dapat dilihat dari grafik bahwa spesimen dengan nilai kekerasan paling tinggi terletak di bagian sambungan las spesimen dengan variasi putaran 1800 rpm dan waktu tempa 45s sebesar 77,5 HRA, sedangkan nilai kekerasan terendah

diperoleh pada spesimen dengan variasi putaran 1020 rpm dan waktu tempa 25 sebesar 64,2 HRA. Rata-rata penurunan nilai kekerasan daerah sambungan las yaitu sekitar 10-20 % dari nilai kekerasan logam induk.

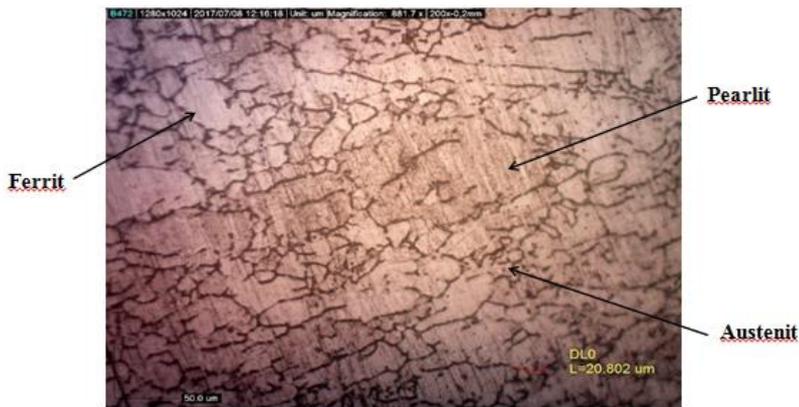


D. Pengujian Mikro-struktur

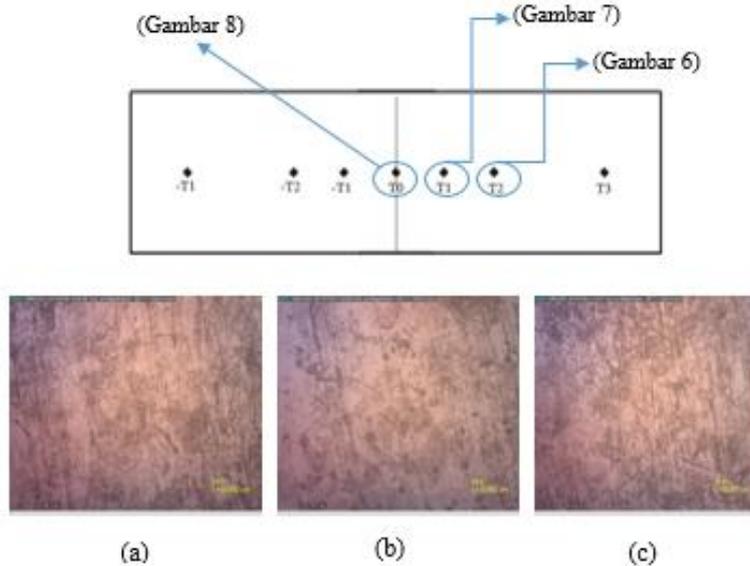
Pengamatan pada struktur mikro suatu material yang mengalami proses pengelasan dilakukan pada 3 tempat yaitu pada daerah base metal, HAZ dan daerah *weld metal*. Ketiga daerah itu mendapatkan perlakuan yang berbeda pada saat proses pengelasan berlangsung, dengan adanya perlakuan yang berbeda maka ketiganya pun memiliki struktur mikro yang berbeda pula. Pada gambar dibawah pada umumnya *base metal* tidak mengalami *cold work*, dimana struktur mikronya terdiri dari ferrit, pearlit dan austenit yang tidak terlalu pipih, dikarenakan presentase terpengaruh *cold work* kecil struktur mikro dari *base metal* karena pada proses las gesek *direct-drive* daerah *base metal* tidak mengalami efek panas yang dapat merubah struktur mikronya. Karena struktur mikro dari *stainless steel* itu

sendiri akan berubah apabila dikenai panas sampai temperatur diatas temperatur rekristalisasi.

Kecepatan putaran dan waktu tempa mempengaruhi temperatur yang dibangkitkan pada saat gesekan berlangsung, semakin tinggi. Daerah HAZ yang berdekatan dengan *weld metal* struktur mikronya berupa ferrit, pearlite dan austenit dengan grain size yang halus. Hal ini terjadi karena daerah HAZ mendapat pengaruh panas selama proses pengelasan. Daerah HAZ yang dekat dengan *base metal* hanya mendapat pengaruh panas yang rendah bila dibandingkan dengan daerah HAZ yang dekat dengan daerah *weld metal*. Semakin dekat dengan *weld metal*, maka *grain sizenya* semaki kecil.

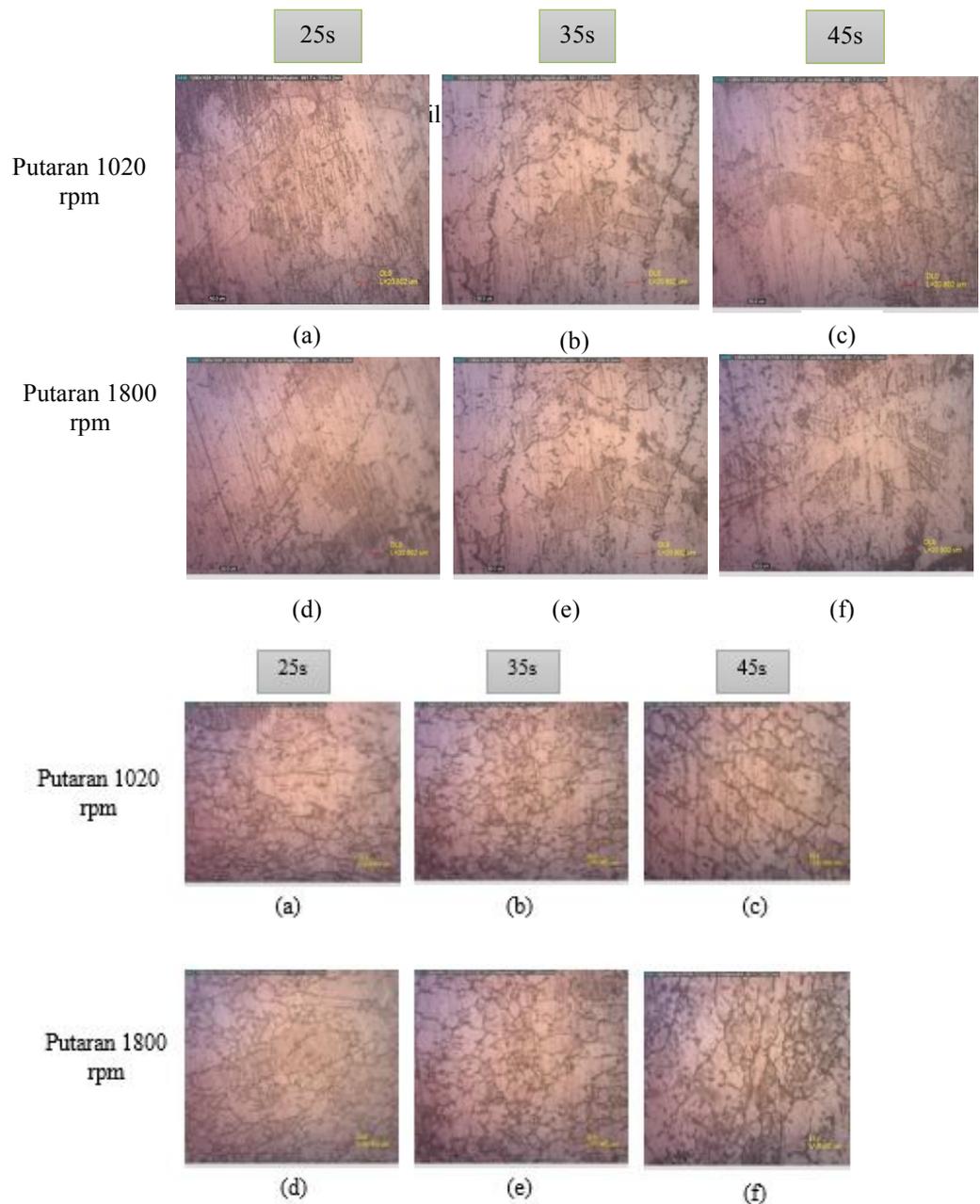


Gambar 5. Struktur Mikro daerah Las dengan pembesaran 200x



Gambar 6. Hasil struktur mikro raw material

Gambar pada 6 (a) menunjukkan bahwa struktur mikro pada *Raw material* diperbesar hingga 200x dan tidak terjadi perubahan struktur mikro. Begitupun dengan gambar (b) dan (c), perubahan struktur akan terjadi apabila dikenai panas sampai temperatur diatas temperatur rekristalisasi.



Gambar 8. Hasil Struktur Mikro Daerah Las

Gambar7(a) menunjukkan bahwa adanya sedikit perubahan struktur mikro pada daerah HAZ akibat pergesekan berlangsung. Gambar7(b) menunjukkan terdapat butiran kasar yang masih berserakan. Gambar7(c) menunjukkan daerah yang dipengaruhi waktu tempa mendekati sisi yang maju, dimana butir-butirannya lebih halus dan berorientasi mendekati daerah pengelasan. Gambar 7(d) menunjukkan adanya sedikit perubahan struktur mikro pada daerah ini akibat pergesekan berlangsung. begitupun (e) dan (f) hampir mirip dengan perlakuan pada (b) dan (c).

Gambar 8(a) menunjukkan bahwa adanya butiran halus *austenite* mengarah kesudut bawah, sedangkan bagian atas terdapat butiran kasar yang berserakan.

Gambar 8(b) perubahan struktur mikro pada daerah las dan terdapat butiran *austenite* yang teratur akibat pergesekan berlangsung. Gambar 8(c) menunjukkan terdapat butiran halus yang masih berserakan dengan arah diagonal yang dipengaruhi oleh waktu tempa. Gambar 8(d) terdapat butiran kasar yang berserakan dan menunjukkan daerah yang dipengaruhi waktu tempa mendekati sisi bagian tengah. Gambar 8(e) menunjukkan perubahan struktur mikro yang hampir sama dengan gambar (b). Gambar 8(f) menunjukkan butiran yang berkumpul dalam satu sisi yaitu bagian tengah yang dipengaruhi oleh laju putaran dan waktu tempa.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian proses friction welding yang telah dilakukan pada pipa *stainless steel* 304L dengan variasi kecepatan putaran dan waktu tempa dapat disimpulkan sebagai berikut :

- 1) Kecepatan putaran sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik material. Pada grafik analisa data pengujian tarik, lentur dan kekerasan memperlihatkan bahwa semakin tinggi putaran mesin nilai kekuatannya semakin meningkat, dimana tegangan tarik maksimum tertinggi ada pada spesimen dengan variasi putaran 1800 rpm yaitu sebesar 446,22 N/mm², nilai lentur tertinggi ada pada spesimen dengan variasi putaran 1800 rpm yaitu sebesar 1420 N dan nilai kekerasan tertinggi ada pada spesimen dengan variasi putaran 1800 rpm yaitu sebesar 77,5 HRA.
- 2) Waktu tempa sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik material. Pada grafik analisa data pengujian tarik, lentur dan kekerasan memperlihatkan bahwa waktu tempa yang paling lama yaitu 45 detik adalah waktu yang paling baik, akan tetapi waktu tempa 45 detik yang digunakan dalam *friction welding* belum mampu menyamai nilai kekuatan *raw material*, sehingga spesimen hasil pengelasan mengalami kondisi patah dan kondisi retak di daerah sambungan las.
- 3) Pada pengamatan struktur mikro dengan divariasikannya kecepatan putaran dan waktu tempa maka dapat dilihat bahwa perubahan yang terlihat adalah pada daerah las yang banyak terdapat *austenit* sehingga nilai kekerasan dan kekuatan hampir mendekati nilai kekerasan *Raw material*. Sedangkan untuk daerah HAZ yang banyak terdapat *ferrit* sehingga nilai kekerasan dan kekuatan mendekati nilai kekerasan *Raw material*.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Alfian Ferry Ardianto, 2015. Kekuatan puntir sambungan las gesek Al-Mg-S dengan variasi sudut chamfer dua sisi dan kekasaran. Universitas Brawijaya. Malang.
- Anggun Panata Gama, 2013. Analisis sifat mekanik dan struktur mikro alumunium paduan seri 6061 hasil pengelasan friction welding dengan variasi sudut. Universitas Jember.
- Azhari sastranegara, 2009. Mengenal Uji Tarik dan Sifat-sifat Mekanik Logam.
- Budi Santoso, 2014. Pengaruh variasi waktu gesekan awal solder terhadap kekuatan tarik, kekerasan dan struktur makro Alumunium 5083 pada

97 Muh. Iswar, Abdul Salam, Aminuddin, Fahrudin, Analisa Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Hasil Pengelasan Gesek Pipa Stainless Steel AISI 304L

pengelasan friction stir welding. Tugas Akhir. Universitas Lampung.Lampung.

Callister, 1994. Temperatur rekristalisasi dan temperatur lebur untuk beberapa logam dan paduan

Nur, R., Sultan, A. Z., & Suyuti, M. A. (2006). Mechanical Properties on Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 5052. Journal of Engineering and Applied Science ARPN. 12 (16), 4445-4450

Ika Wahyuni, Dkk, 2013. Uji Kekerasan Material Dengan Metode Rockwell. Jurusan Fisika, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Airlangga, Surabaya.

Ishak dan Muhammad Fachrul, 2015. Pengaruh Variasi Putaran dan Waktu Tempa Pada Pengelasan Gesek Stainless Steel AISI 301 Terhadap Sifat Mekanik, di Makassar.

Khurmi RS, Gupta JK, 2005. Mekanisme "powerscrew".

Muhammad Iswar, Rafiuddin Syam, 2012. Pengaruh Variasi Parameter Pengelasan (Putaran dan Temperatur) Terhadap Kekuatan Sambungan Las Hasil Friction Welding Pada Baja Karbon Rendah. Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar.

Wahyu Nugroho, 2010. Pengaruh Durasi Gesekan, Tekanan Gesek dan Tekanan Tempa Terhadap Kekuatan Sambungan Las Gesek Langsung pada Baja Karbon Aisi 1045, Tugas Akhir. Intitut Teknologi Sepuluh November.Surabaya.

Wiryo Sumarto, H dan Okumura, T. 1996. Teknologi Pengelasan Logam. Jilid 7. Penerbit Pradnya Paramita. Jakarta.