

## Analisa Kekuatan Sambungan Pipa Baja Karbon dan Besi Cor Berbasis Teknologi Las Gesek (*Friction Welding*)

Nur Husodo<sup>1)\*</sup>, Budi Luwar S.<sup>1)</sup>, Hagi Astono P.<sup>1)</sup>,  
Sri Bangun S.<sup>1)</sup>, dan Rachmad Hidayat<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Progd D3 Jurusan Teknik Mesin, ITS

Jl. Arif Rahman Hakim, Kampus Keputih Sukolilo, Surabaya 60111

<sup>2)</sup> Jurusan Teknik Mesin, Politeknik SAKTI, Surabaya

Jl. Jemursari Sel. IV No.3 Surabaya

### Abstrak

Adanya kesulitan yang akan terjadi manakala dilakukan proses penyambungan dua buah logam yang berbeda komposisi. Namun ada alternative metode proses penyambungan logam baja yang berbeda komposisi dengan metode las gesek. Selain itu metode las gesek ini mempunyai banyak keunggulan antara lain waktu proses cepat, tidak perlu logam pengisi, panas yang terjadi tidak sampai logam mencair, panas yang terjadi tidak terlalu tinggi juga mudah diterapkan karena dapat memanfaatkan mesin perkakas. Oleh karena itu perlu dilakukan proses penyambungan dengan metode las gesek untuk alternative proses pembuatan produk stang sepeda motor. Penelitian dilakukan dengan memvariasi tekanan tempa sebesar 375, 437,5 dan 500 kgf/cm<sup>2</sup>, tekanan gesek 62,5 kgf/cm<sup>2</sup> dan durasi waktu gesek 120 detik. Sampel uji yang dihasilkan dilakukan pengujian struktur mikro dengan metallografi sedangkan sifat mekanik dilakukan dengan pengujian kekerasan dan kekuatan tarik. Analisa dilakukan untuk mengetahui peluang las gesek dipakai sebagai alternative proses produksi produk stang sepeda motor. Dapat ditarik kesimpulan bahwa metode las gesek dapat digunakan menyambung dua buah logam baja yang berbeda komposisi yaitu pipa baja karbon rendah dengan besi cor. Kekuatan las akan meningkat ketika tekanan tempa juga meningkat. Kekuatan sambungan tertinggi sebesar 546,66 N/mm<sup>2</sup>.

Kata kunci: Las gesek, pipa baja karbon rendah, besi cor, tekanan tempa, tekanan gesek

### Abstract

The difficulties that will occur when the process of joining two pieces made of different metal compositions. However, there are alternative methods of process connection of different steel metal composition with friction welding method. Besides this friction welding method has many advantages such as faster processing time, do not need filler metal, the heat does not occur until the metal melts, heat is happening is not too high is also easy to implement because it can take advantage of machine tools. Therefore, it is necessary to the process of switching to an alternative method for friction welding manufacturing process motorcycle handlebar. The study was conducted with three variations of pressure wrought by 375, 437.5 and 500 kgf / cm<sup>2</sup>, while the frictional pressure of 62.5 kgf / cm<sup>2</sup> and the length of time string 120 seconds. The resulting test samples tested microstructure with metallografi done while the mechanical properties hardness testing and tensile strength. The analysis were performed to determine the chances of friction welding is used as an alternative production process motorcycle handlebar. It can be deduced that the friction welding method can be used to connect two pieces of metal of different steel compositions, namely low carbon steel pipe with cast iron. Weld strength will increase when the pressure forging also increased. The highest weld strength was 546.66 N / mm<sup>2</sup>.

Keywords: Friction welding, low carbon steel pipe, cast iron, forging pressure, friction pressure

### 1. Pendahuluan

Salah satu produk stang sepeda motor terbuat dari dua buah material logam yang berbeda dan disambung. Dua buah material logam baja tersebut adalah pipa baja karbon rendah dan besi cor. Produk stang sepeda motor tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.

Metode las gesek (*friction welding*) adalah metode penyambungan dua buah material logam. Dalam metode ini panas dihasilkan dari perubahan energi mekanik kedalam energi panas pada bidang interface benda kerja karena adanya gesekan

selama gerak putar dibawah tekanan (gesekan). [1]. Beberapa keuntungan dari *friction welding* ini adalah penghematan logam pengisi dan waktu untuk penyambungan dua material yang sama maupun berbeda. Sedangkan parameter proses yang penting adalah waktu gesekan, tekanan gesekan, waktu tempa, tekanan tempa dan kecepatan putar. [2]. Pada proses penyambungan ini terjadi proses deformasi plastis akibat tekanan tempa dan terjadi proses difusi karena adanya panas yang tinggi sehingga menghasilkan sambungan yang berkualitas tinggi antara bahan serupa maupun berbeda.

\*Korespondensi: Tel./Fax.: -  
E-mail: nurhusodo21@gmail.com  
©Teknik Mesin Universitas Udayana 2016

Kombinasi dua buah material yang berbeda untuk penggunaan sebuah produk telah banyak dilakukan. Kombinasi logam Ferrous dan paduan Nikel digunakan untuk produk mesin pesawat, kombinasi paduan Titanium dan logam baja diterapkan pada sistem perpipaan pada daerah yang dingin [3], dan industri pesawat dan kimia [4], sementara kombinasi logam tembaga dan paduan berbasis baja telah digunakan untuk pipa pendingin untuk menghindari panas yang tidak diinginkan [5]. Adanya struktur mikro yang sangat halus di daerah tengah (weld zone) yang menyebabkan terjadinya nilai kekerasan yang tinggi sesuai dengan Hall-Petch relation. Sehingga kekuatan pada daerah tengah akan lebih tinggi. Akbari K. [6]. Penelitian tentang aplikasi friction welding pada produk poros rotor pada kapal dilakukan oleh *Ho Seung Jeong, 2010* [7]. Dengan mengevaluasi kekuatan tarik sambungan dan struktur mikro sambungan serta uji kekerasan, uji kelelahan dapat disimpulkan bahwa dihasilkan kekuatan sambungan yang sangat baik. Proses penyambungan pipa dari bahan baja karbon rendah dapat dilakukan dengan baik dan menghasilkan kekuatan yang sangat baik. Proses operasional las gesek yang disarankan adalah putaran poros utama 4125 rpm, tekanan gesek sebesar 15 kgf/cm<sup>2</sup>, tekanan tempa sebesar 70 kgf/cm<sup>2</sup> dan durasi waktu gesek sebesar 35 detik, dimana pipa baja karbon rendah berdiameter 21,2 mm [8]. Dari hasil percobaan pengelasan baja ST 41 pada produk Back spring pin dengan metode *Direct-Drive Friction Welding* dengan kecepatan putar yang digunakan 4215 rpm, variasi waktu gesek 35,45,55 dan 65 detik, tekanan gesek 127,27 kg/mm<sup>2</sup> dan tekanan tempa 1018,18 kg/mm<sup>2</sup> dapat disimpulkan sebagai berikut. Perubahan waktu gesekan mempengaruhi sifat mekanik yang dihasilkan pada sambungan las. Dimana waktu gesekan 45 detik dihasilkan kekuatan tarik dan puntir tertinggi dari waktu gesekan yang lain yaitu pada kekuatan tarik sebesar 414,54 N/mm<sup>2</sup> dan kekuatan puntir 16 kgf.m. Distribusi kekerasan terbaik pada waktu gesekan 45 detik. Hasil dari kekerasan weld

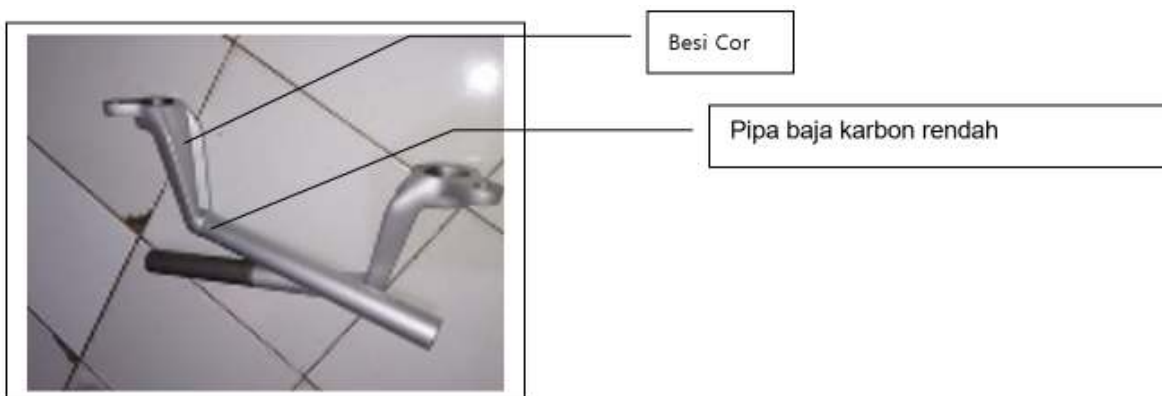
nugget lebih tinggi dari HAZ sehingga menghasilkan lasan yang baik dan tidak patah pada sambungan melainkan patah pada daerah HAZ. Struktur mikro yang terbentuk mempengaruhi kekuatan sambungan. Hasil dari struktur mikro dengan kandungan ferrit lebih banyak dari pearlite menghasilkan kualitas sambungan lebih baik. Dengan proses pengelasan menggunakan metode *direct-drive friction welding* dapat digunakan sebagai alternatif pembuatan produk *back spring pin* T-120 yang lebih efisien [9].

Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisa kemungkinan pemanfaatan teknologi las gesek dalam proses manufaktur produk stang sepeda motor. Penelitian ini dilakukan dengan 3 variasi tekanan tempa yaitu 375, 437,5 dan 500 kg/cm<sup>2</sup>, tekanan gesek 62,5 kg/cm<sup>2</sup> dan durasi waktu gesek 120 detik pada proses operasional las gesek pada pipa baja karbon rendah yang disambung dengan besi cor (cast iron) terhadap kekuatan tarik, kekerasan dan uji metalografi. Harapan dari penelitian ini akan didapatkan proses operasional las gesek yang mampu menghasilkan kekuatan penyambungan yang baik sehingga dapat diterapkan dalam proses pembuatan produk stang sepeda motor yang terdiri dari dua buah logam yaitu pipa baja karbon rendah dan besi cor.

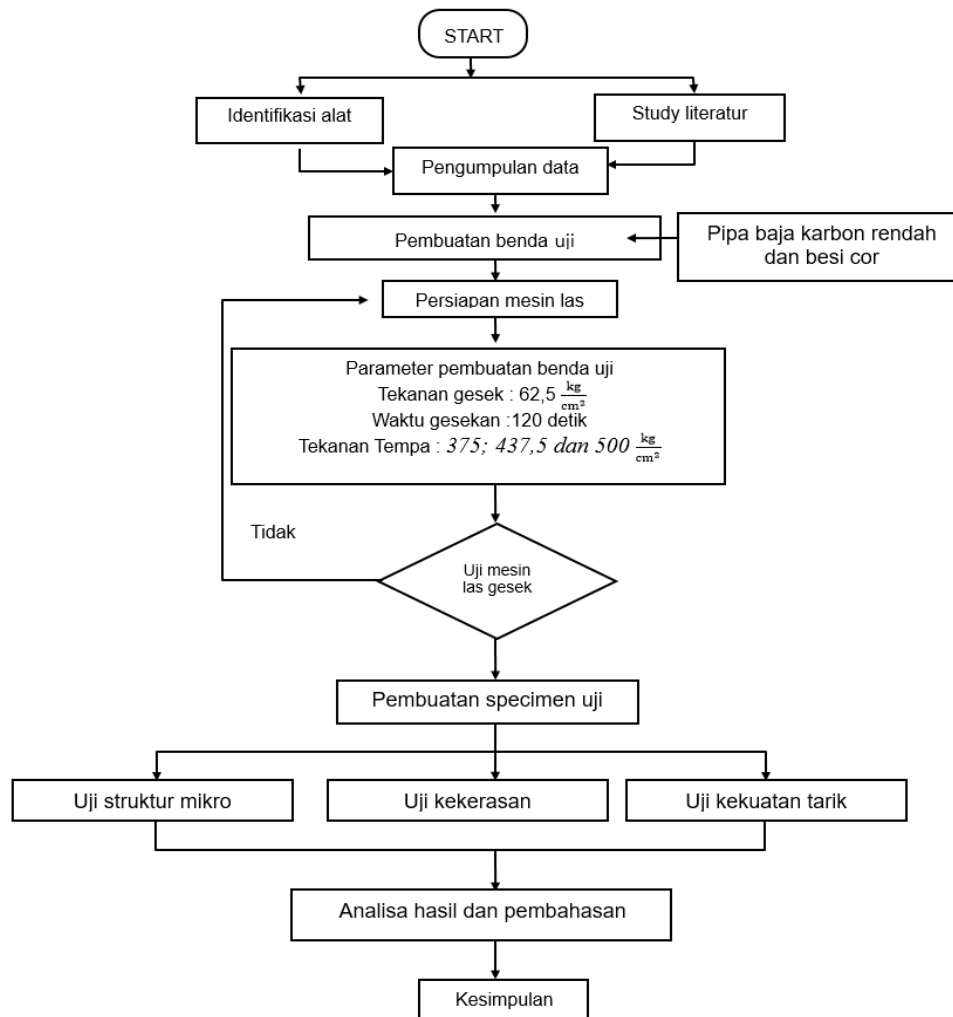
## 2. Metode

### 2.1. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dapat dilihat melalui diagram alir penelitian seperti pada Gambar 2. Benda uji pada penelitian kali ini adalah baja karbon rendah dan besi Cor FC25. Faktor utama yang mempengaruhi sifat dari baja karbon adalah kandungan karbon dan mikrostruktur yang ditentukan oleh komposisi baja, seperti Si, Mn, P, S, Cr, Ni, dan Cu. Material ini mempunyai komposisi yang sesuai dengan sertifikat material dan juga faktor yang mempengaruhi sifat dari besi cor adalah kandungan karbon dan komposisi dari besi cor yaitu Si, p, Mn, S, Cr, dan Ni.



Gambar 1. Produk Stang sepeda motor. Bahan produk stang ini dari besi cor yang disambung dengan pipa baja karbon rendah



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Tabel 1. Komposisi Kimia Besi Cor FC25

No	Chemical Composition/Analysis (%)						
	Cr	C	Mn	Si	P	Si	Ni
1	0.02-0.30	2.8-3.8	0.3-1.10	0.3.-2.7	0.03-0.7	0.30-2.70	0.02-1

Tabel 2. Komposisi Kimia Pipa Baja Karbon Rendah

No	Size	Chemical Composition/Analysis (%)				
		C	Mn	Si	P	S
1	Ø1/2 – 2"	0.07-0.10	0.3-0.6	0.15-0.25	0.03	0.035

Tabel 3. Perencanaan proses gesek (*friction*) dan tempa (*forging*)

No	Gesek ( Friction)		Temperatur °C	Tempa ( <i>forging</i> )	Upset mm	HAZ (mm)
	tekanan gesek (kgf/cm <sup>2</sup> )	waktu gesakan (s)		tekanan tempa (kgf/cm <sup>2</sup> )		
1	62,2	120	...	375	...	...
2			...	437,5	...	...
3			...	500	...	...

Dimensi benda uji yang digunakan pada penelitian ini untuk poros pada pipa baja karbon rendah Ø 20 mm dan panjang 125 mm, besi cor Ø 20 dengan panjang 35 mm.



Gambar 3. Dimensi spesimen pipa baja karbon rendah dan besi cor

Pada proses *friction welding* untuk material besi cor FC 25 dan pipa baja karbon rendah ini dimulai dengan proses *friction phase* dan dilanjutkan *forging phase*. Penjelasan tentang kedua proses ini akan dijelaskan pada sub bab dibawah ini.

**Proses gesek (friction)**

Proses pengelasan dari material besi cor FC 25 dan pipa baja karbon rendah dimulai dari Spesimen uji yang sudah terpasang diputar dengan kecepatan putaran 4125 Rpm pada temperatur kamar lalu kedua benda kerja dipertemukan dan diberi tekanan gesek  $62,5 \frac{kg}{cm^2}$  selama kurun waktu 120 detik. Ketika proses *friction* dilakukan maka masing-masing spesimen akan mengalami upset awal pada kedua permukaan yang disambung. Setelah waktu yang ditentukan terpenuhi kemudian dilakukan pengukuran temperatur pada spesimen dan dilanjutkan dengan fase tempa.

**Proses tempa (forging)**

Proses tempa dari material besi cor FC 25 dan pipa baja karbon rendah ini dimulai setelah proses *friction* selesai yaitu setelah spesimen uji mencapai waktu gesek yang telah ditentukan. Setelah itu spesimen uji diberi tekanan kembali pada tekanan  $(375, 437,5 \text{ dan } 500) \frac{kg}{cm^2}$ , sehingga proses tempa dapat dilaksanakan. Selanjutnya putaran diperlambat dengan cara direm hingga kondisi berhenti dan didinginkan hingga temperatur ruangan dengan media udara.

**Perencanaan proses gesek dan tempa**

Perencanaan proses gesek dan tempa dapat dilihat pada Tabel 3.

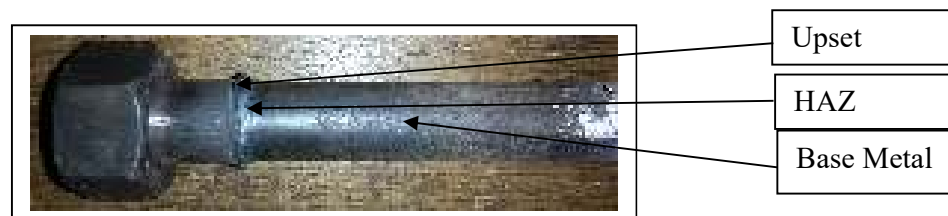
**3. Analisis Hasil dan Pembahasan**

**3.1. Analisis data hasil proses pengujian**

Data hasil proses pengelasan dengan menggunakan mesin las gesek langsung (Direct Friction Welding) ditabulasikan dalam Tabel 4. Dari Tabel 4 dapat dilihat pengaruh tekanan tempa terhadap benda kerja sangat berpengaruh pada besarnya nilai upset yang dihasilkan, semakin besar tekanan tempa yang diberikan maka akan semakin besar nilai upset yang dihasilkan. Hal ini juga mempengaruhi panjang dari awal spesimen dimana akan semakin mengurangi kepresisian dan ukuran dimensi dari panjang pada benda kerja yang di las seperti yang terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil proses friction dan forging pada uji tarik

No	Gesek (Friction)		Temperatur °C	Tempa (forging)	Upset mm	HAZ (mm)
	tekanan gesek kgf/cm <sup>2</sup>	waktu gesakan (s)		tekanan tempa kgf/cm <sup>2</sup>		
1	62,5	120	583	375	2	1,5
2			597	437,5	2,5	1,6
3			624	500	2,8	1,8



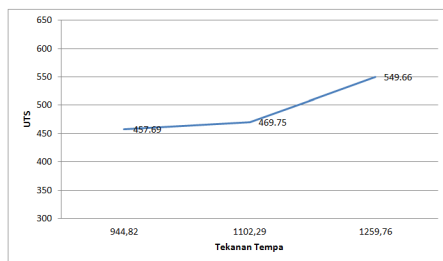
Gambar 4. Contoh benda kerja awal uji tarik yang telah melalui proses friction welding

Tabel 5. Hasil Pengujian Tarik.

No.	Gesek (Friction)		Temperatur (c°)	Tempa	UTS
	tekanan gesek kgf/cm <sup>2</sup>	waktu gesekan (s)		tekanan tempa kgf/cm <sup>2</sup>	( $\frac{N}{mm^2}$ )
1	62,5	120	583	375	457,69
2			597	437,5	469,75
3			624	500	549,66

### 3.2 Analisa data hasil uji tarik

Hasil uji tarik dapat dilihat pada Tabel 5. Grafik tekanan tempa terhadap kekuatan sambungan diperlihatkan dalam Gambar 5. Nilai UTS pada grafik dalam Gambar 5 merupakan nilai dari masing-masing variabel tekanan tempa.



Gambar 5. Grafik hasil uji tarik, waktu gesek 120 detik, tekanan tempa 375, 437,5 dan 500 kgf/cm<sup>2</sup>

### Pengaruh tekanan tempa terhadap kekuatan tarik

Dibawah ini akan ditunjukkan parameter-parameter pengelasan dan kekuatan tarik yang dihasilkan beserta letak dari patahan yang terjadi pada spesimen.

**Specimen 1** dengan waktu gesek 120 detik dan tekanan tempa 944,82 kgf/cm<sup>2</sup>, menghasilkan UTS sebesar 457,69 N/mm<sup>2</sup>.



Gambar 6. gambar specimen 1 setelah uji tarik (patah pada sambungan)

**Specimen 2** dengan waktu gesek 120 detik dan tekanan tempa 944,82 kgf/cm<sup>2</sup>, menghasilkan UTS sebesar 457,69 N/mm<sup>2</sup>.



Gambar 7. gambar specimen 2 setelah uji tarik (patah pada sambungan)

**Specimen 3** dengan waktu gesek 120 detik dan tekanan tempa 1259,76 kgf/cm<sup>2</sup>, menghasilkan UTS sebesar 549,66 N/mm<sup>2</sup>.



Gambar 8. gambar specimen 3 setelah uji tarik (patah pada sambungan)

Pada specimen 1 dan 2 tidak jauh berbeda dengan waktu gesek 120 detik, tekanan tempa 375 kgf/cm<sup>2</sup> menghasilkan UTS 457,69 N/mm<sup>2</sup> dan waktu gesek 120 detik, tekanan tempa 437,5 kgf/cm<sup>2</sup> menghasilkan UTS 469,75 N/mm<sup>2</sup> ketika diuji tarik akan patah pada sambungan. Untuk specimen uji tarik 3 dengan waktu gesek 120 detik, tekanan tempa 500 kgf/cm<sup>2</sup> menghasilkan UTS 549,66 N/mm<sup>2</sup>.

### 3.3. Analisa data hasil uji kekerasan

Data proses friction dan forging pada uji kekerasan diperlihatkan dalam Tabel 6. Dari Tabel 6 dapat dilihat pengaruh tekanan tempa berpengaruh pada besarnya nilai upset yang akan dihasilkan, semakin besar tekanan tempa yang diberikan maka semakin besar nilai upset yang dihasilkan. Hal ini juga mempengaruhi panjang dari awal specimen dimana akan semakin mengurangi kepresisian dimensi dan ukuran dimensi dari panjang pada benda kerja pada benda kerja yang di las.

Pada Gambar 9 diperlihatkan benda spesimen yang telah melalui proses penyambungan las gesek kemudian diratakan permukaannya menggunakan mesin gerinda lalu di molding untuk mempermudah ketika dilakukan pengujian kekerasan pada permukaan benda kerja.

Tabel 6. Hasil proses friction dan forging pada uji kekerasan

No	Gesek ( <i>Friction</i> )		Temperatur °C	<i>forging</i>	Upset mm	HAZ (mm)
	tekanan gesek kgf/cm <sup>2</sup>	waktu gesekan (s)		tekanan tempa kgf/cm <sup>2</sup>		
1	62,5	120	583	375	1,2	1,5
2			597	437,5	1,5	1,6
3			624	500	1,7	1,8



Gambar 9. Benda uji untuk uji kekerasan

Tabel 7. Hasil pengujian kekerasan besi cor FC25

No	Gesek ( <i>Friction</i> )		Temp (°C)	<i>Forging</i>	Titik identasi (HRA)		
	Tekanan gesek kgf/cm <sup>2</sup>	Waktu gesekan (s)		Tekanan tempa kgf/cm <sup>2</sup>	Logam induk	HAZ	LAS
1	62,5	120	583	375	56,5	56	54
2			597	437,5	55	61	56
3			624	500	58,5	61	56,5

Tabel 8. Hasil pengujian kekerasan pipa baja karbon rendah

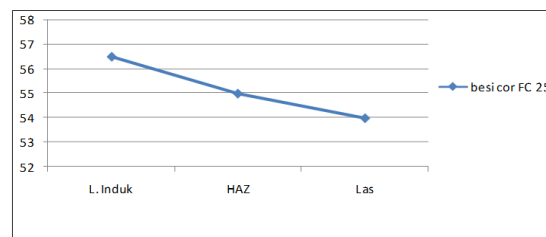
No	<i>Friction</i>		Temp (°C)	<i>Forging</i>	Titik identasi (HRA)		
	Tekanan gesek Kgf/cm <sup>2</sup>	Waktu gesekan (s)		Tekanan tempa kgf/cm <sup>2</sup>	Logam induk	HAZ	LAS
1	62,5	120	583	375	45.5	41	54
2			597	437,5	46	42,5	56
3			624	500	46	43	56,5

**Data hasil pengujian kekerasan**

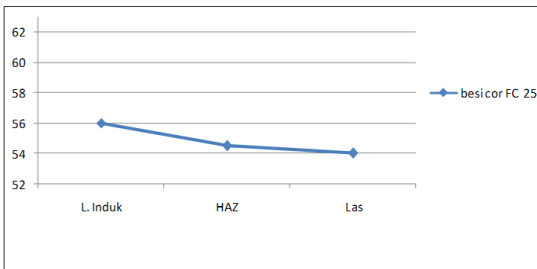
Data dalam Tabel 7 dan 8 didapatkan dari hasil proses pengujian kekerasan dengan Rockweel skala A (HRA 60). Data Tabel 7 dan 8 memperlihatkan bahwa semakin besar tekanan tempa yang diberikan maka akan memiliki nilai kekerasan yang semakin tinggi pula pada daerah logam las dan HAZ.

**Grafik tekanan tempa terhadap kekerasan specimen**

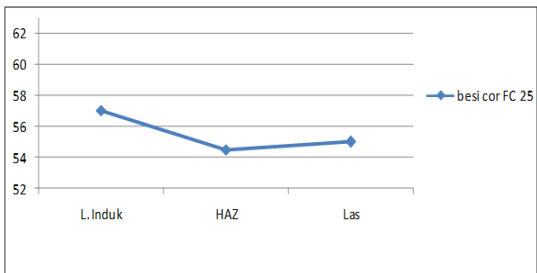
Dibawah ini akan ditunjukkan pengaruh besarnya tekanan tempa terhadap kekerasan yang dihasilkan pada benda kerja.



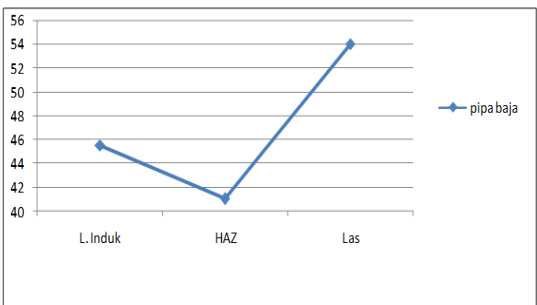
Gambar 10. Grafik hasil uji kekerasan besi cor FC 25, waktu gesek 120 detik dan tekanan tempa 375 kgf/cm<sup>2</sup>.



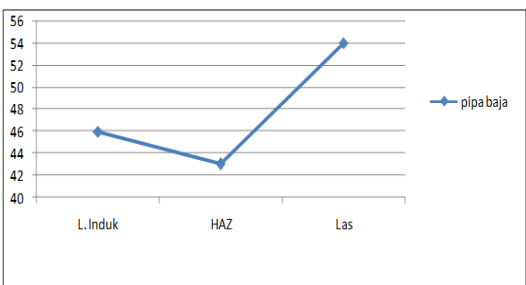
Gambar 11. Grafik hasil uji kekerasan besi cor FC 25, waktu gesek 120 detik dan tekanan tempa 437,5 kgf/cm<sup>2</sup>.



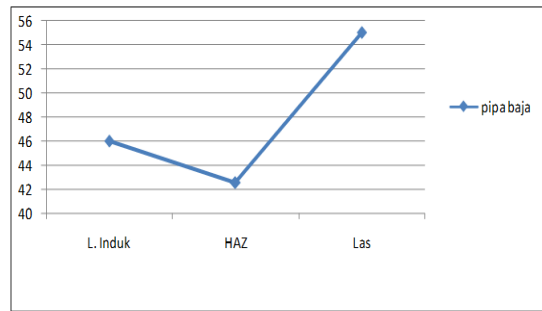
Gambar 12. Grafik hasil uji kekerasan besi cor FC 25 waktu gesek 120 detik, tekanan tempa 500 kgf/cm<sup>2</sup>



Gambar 13. Grafik hasil uji kekerasan pipa baja karbon rendah, waktu gesek 120 detik, tekanan tempa 375kgf/cm<sup>2</sup>



Gambar 14. Grafik hasil uji kekerasan pipa baja karbon rendah, waktu gesek 120 detik, tekanan tempa 437,5 kgf/cm<sup>2</sup>

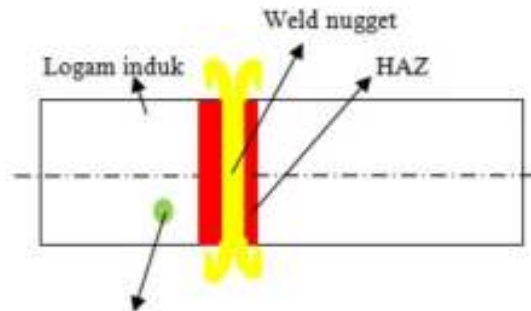


Gambar 15. Grafik hasil uji kekerasan pipa baja karbon rendah, waktu gesek 120 detik, tekanan tempa 500 kfg/cm<sup>2</sup>

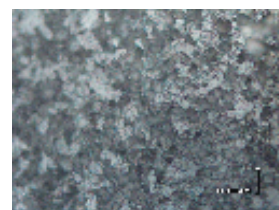
Dari grafik-grafik di atas ditunjukkan bahwa semakin tinggi nilai dari tekanan tempa yang diberikan maka akan menghasilkan nilai kekerasan yang semakin tinggi pula pada daerah logam HAZ dan las/ sambungannya.

### 3.4. Analisa Struktur Mikro

Hasil struktur mikro pada logam induk dengan perbesaran 100x dan 500x ditunjukkan dalam gambar-gambar berikut ini.



Gambar 16. belahan penampang spesimen logam induk

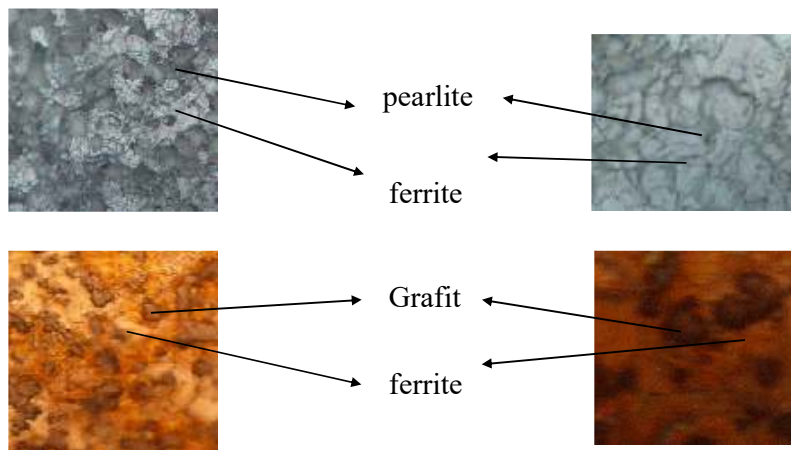


(a) 100X

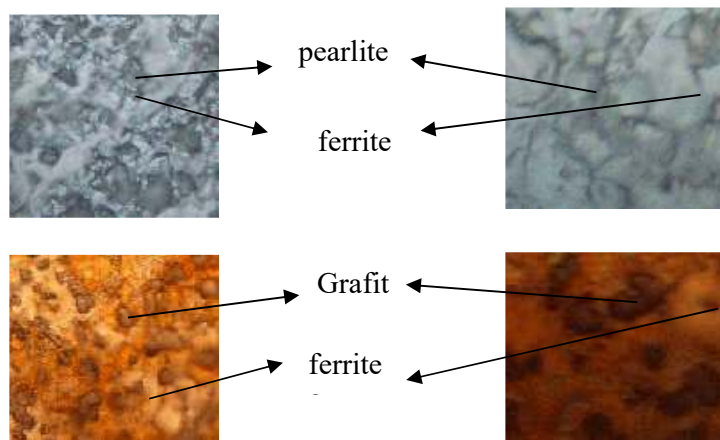


(b) 500X

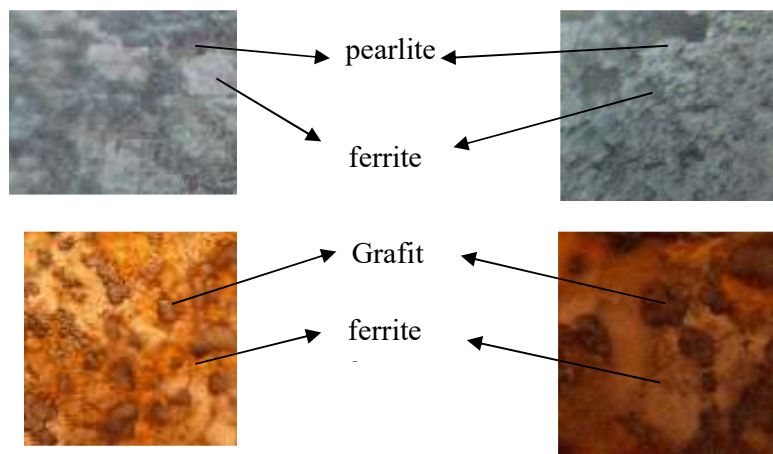
Gambar 17. Struktur mikro pada logam induk 100X dan 500X



Gambar 18. Struktur mikro yang terbentuk pada specimen 1 pada besi cor dan pipa baja karbon rendah dengan perbesaran foto 100X dan 500X waktu gesekan 120 detik dan tekanan tempa 375 kg/cm.<sup>2</sup>



Gambar 19. Struktur mikro yang terbentuk pada specimen 2 pada besi cor dan pipa bajakarbon rendah dengan perbesaran foto 100X dan 500X waktu gesekan 120 detik dan tekanan tempa 437,5 kg/cm.<sup>2</sup>



Gambar 20. Struktur mikro yang terbentuk pada specimen 3 pada besi cor dan pipa baja karbon rendah dengan perbesaran foto 100X dan 500X waktu gesekan 120 detik dan tekanan tempa 500 kg/cm.<sup>2</sup>



### 3.5. Pembahasan

Data hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa semakin besar tekanan tempa yang diberikan (375, 437,5 dan 500) kgf/cm<sup>2</sup> dengan pemberian nilai waktu gesekan yang sama (120 detik) maka nilai UTS yang dihasilkan akan semakin besar dikarenakan difusi integranular (perpindahan atom satu ke atom lainnya) akan lebih maksimal sehingga dihasilkan lasan dengan kekuatan sambungan yang baik dan ketika diuji tarik patah pada sambungan (tekanan tempa 375, 437,5 dan 500 kgf/cm<sup>2</sup>, nilai kekuatan tarik 457,69, 469,75 dan 549,66 N/mm<sup>2</sup>).

Data hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa semakin besar tekanan tempa yang diberikan (375, 437,5 dan 500) kg/cm<sup>2</sup> dengan pemberian nilai waktu gesekan yang sama (120 detik) akan diperoleh nilai distribusi kekerasan pada logam las semakin besar. Hal ini disebabkan adanya metal forming dan ketika diberikan tekanan tempa yang semakin besar struktur perlit pada logam las akan semakin rapat sehingga nilai kekerasan pada daerah logam las akan semakin besar.

Data hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa semakin besar tekanan tempa yang diberikan (375, 437,5 dan 500) kgf/cm<sup>2</sup> dengan pemberian nilai waktu gesekan yang sama (120 detik) akan diperoleh nilai distribusi kekerasan pada logam las semakin besar. Hal ini disebabkan adanya metal forming dan ketika diberikan tekanan tempa yang semakin besar struktur perlit pada logam las akan semakin rapat sehingga nilai kekerasan pada daerah logam las akan semakin besar.

### 4. Kesimpulan

Kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian ini meliputi:

- Semakin besar tekanan tempa maka sifat mekanik yang dihasilkan pada sambungan las akan semakin membaik seiring dengan perubahan struktur mikro dengan pemberian durasi waktu tertentu.
- Kekuatan tarik sambungan las gesek sebesar 549,66 N/mm<sup>2</sup> terjadi pada proses pengoperasian las gesek dengan waktu gesek 120 detik, tekanan gesek sebesar 62,5 kgf/cm<sup>2</sup> dan tekanan tempa sebesar 500 kgf/cm<sup>2</sup>.

### Daftar Pustaka

- [1] Kalpakjian, Serope, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Fourth edition. Pearson Prentice Hall International, 2001.
- [2] Spinler, *What Industry Needs to know about Friction Welding*, *Welding Journal*, march, p. 37 – 42, 1994.
- [3] M.J. Cola, M.B. Lyons, D.F. Theter, R.C. Gentzlinger, *Dissimilar metal joints for the APT superconducting cavity's cryogenic plumbing system*, in: Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999, pp. 962–964.
- [4] M. Ferranate, E.V. Pigoretti, *Diffusion bonding of Ti-6AL-4V to AISI 316L stainless steel: mechanical resistance and interface microstructure*, *J. Mater. Sci.* 37 2002 2825–2833.
- [5] S.A. Fabritsiev, A.S. Pokrovsky, M. Nakamichi, H. Kawamura, *Irradiation resistance of DS copper/stainless steel joints fabricated by friction welding methods*, *J. Nucl. Mater.* 258–263 1998) 2030–2035.
- [6] Akbari mousavi and Rahbar kelishami, 2008, *Experimental and Numerical Analysis of the Friction Welding Process for the 4340 Steel and Mild Steel Combinations*, *Welding Research*, volume 87, July 2008, p.178-186.
- [7] Ho Seung Jeong dkk., *Inertia friction welding process analysis and mechanical properties evaluation of large rotor shaft in marine turbo charger*, *International journal of precision engineering and manufacturing* volume 11, no.1, 2010, page 83-88.
- [8] Budi Luwar Sanjoto, Nur Husodo, Sri bangun S., Mahirul Mursid, *Penerapan teknologi las gesek (friction welding) dalam proses penyambungan buah pipa logam baja karbon rendah*, *Jurnal Energi dan Manufaktur*, ISSN 2302-5255, Teknik Mesin, Universitas Udayana, Denpasar, Bali, vol.5, no.1, hal. 51-60, Oktober 2012.
- [9] Nur Husodo, Budi Luwar S., Sri bangun S., Mahirul Mursid, *Penerapan teknologi las gesek (friction welding) dalam rangka penyambungan dua buah logam baja karbon St41 pada produk back spring pin*, *Jurnal Energi dan Manufaktur*, ISSN 2302-5255, Teknik Mesin, Universitas Udayana, Denpasar, Bali, vol.6, no.1, hal. 43-52, April 2013.