

Penerapan Teknologi Las Gesek (*Friction Welding*) Dalam Proses Penyambungan Dua Buah Pipa Logam Baja Karbon Rendah

Budi Luwar Sanyoto^{1)*}, Nur Husodo²⁾, Sri Bangun Setyawati³⁾ Mahirul Mursid⁴⁾

^{1,2,3,4)}Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya-Indonesia
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
Email: sanjoto@me.its.ac.id

Abstrak

Proses pengelasan produk bentuk pipa bahan baja karbon akan sedikit mengalami kesulitan karena 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 waktu gesekan (*friction time*), kecepatan rotasi dan tekanan tempa. Oleh karena itu maka perlu dilakukan penelitian terkait penyambungan pipa logam baja karbon dengan penerapan las gesek. Penelitian penerapan teknologi las gesek ini dilakukan dengan memvariasi waktu gesek sebesar 15, 20, 25, 30, 35 detik. Sedangkan parameter proses yang lain dianggap konstan. Mesin las gesek dioperasikan dengan kecepatan putar 4125 rpm, tekanan gesek sebesar 15 kg/cm² dan tekanan tempa sebesar 70 kg/cm². Sampel uji yang dihasilkan diuji dengan uji metallografi, uji kekerasan. Uji metallografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terjadi sedangkan uji kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada daerah logam induk, daerah pengaruh panas (HAZ) dan daerah logam las. Analisa dilakukan untuk mengetahui perubahan nilai kekerasan pada ketiga daerah yaitu logam induk, daerah HAZ dan logam las yang dikaitkan dengan perubahan struktur mikronya. Semakin lama waktu gesek temperatur yang terjadi semakin meningkat. Namun semakin meningkat temperatur mengakibatkan nilai upset semakin besar dan semakin pendek sampel uji. Penelitian proses penyambungan las gesek dengan proses operasional putaran poros utama 4125 rpm dengan tekanan gesek 15 kg/cm² dan tekanan tempa 70 kg/cm² dapat disimpulkan bahwa waktu gesek yang direkomendasikan adalah 35 detik. Metode las gesek dapat diterapkan untuk proses penyambungan pipa baja karbon rendah. Struktur mikro pada sambungan tidak banyak mengalami perubahan struktur mikro, yang berarti tidak banyak terjadi perubahan sifat mekanik.

Kata kunci: waktu gesek, las gesek, tekanan tempa, baja karbon rendah, pipa air

Abstract

The welding process of the carbon steel pipe will be a bit difficult since during welding it is needed rotary movement of the pipe in order to the operator easily to join the welding. This difficulty can be overcome by applying friction welding technology. This method is strongly influenced by friction time, rotation velocity and pressure of the pressing. Therefore it is needed the research to joint the carbon steel pipe by applying friction welding. The variation time for the friction welding test were 15, 20, 25, 30 and 35 second. The process parameters were keep constant. The friction welding machine was operated with 4125 rpm, friction pressure 15 kg/cm² and pressure about 70 kg/cm². The specimen obtained was tested for metallographic, hardness test. The metallography test was done recognize the microstructure and the hardness test was conducted to obtain the hardness distribution in the original material, in the HAZ region, and in the welding metal. Analyses for the value of hardness in the three region namely, origin metal, HAZ, and welding metal will be related to the change in microstructure. The longer the time for the friction, the temperature increase respectively. But the increase the temperature affect on the upset value become larger and the sample become shorter. The research for joining with friction welding 4125 rpm, friction pressure 15 kg/cm² and thresure 70 kg/cm³ can be concluded that frinction time that is recomended is 35 second. Friction welding method can be applied for the joining low carbon steel pipe. The microstructure in the joining was found not significant change that mean there is no change in mechanical properties

Key words: friction time, Pressure press, low carbon steel, water pipe

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

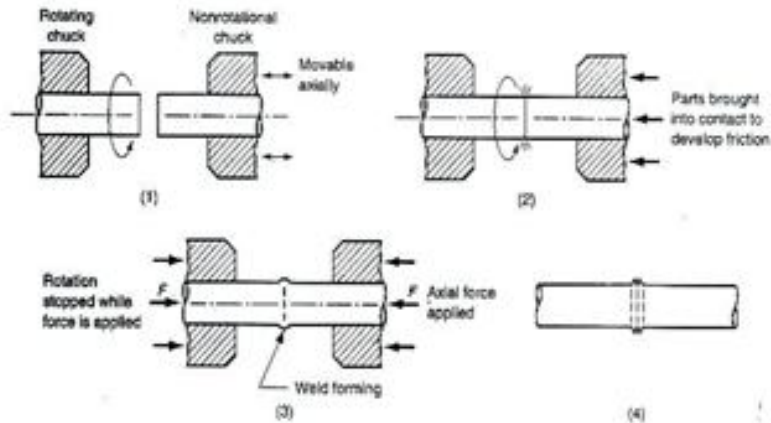
Metode las gesek (*friction welding*) adalah metode penyambungan dua buah material logam. Dalam metode ini panas dihasilkan dari perubahan energi mekanik kedalam energi panas pada bidang interface benda kerja karena adanya gesekan selama gerak putar dibawah tekanan/gesekan[1]. Beberapa keuntungan dari friction welding ini adalah penghematan material 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].

1.2 Studi Pustaka

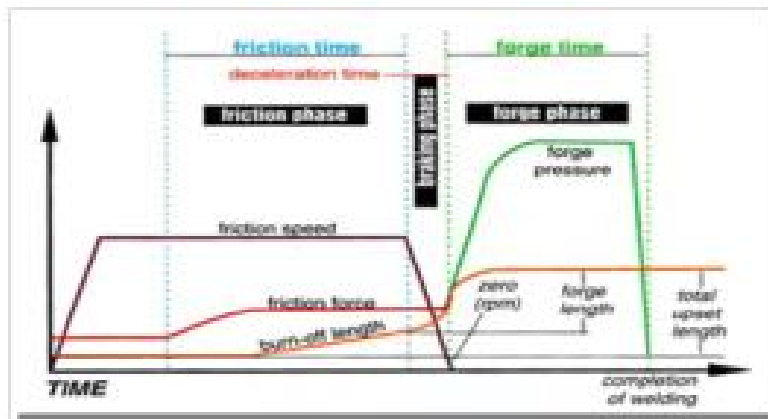
Gambar 1 menunjukkan tipikal dari las gesek, di mana benda kerja yang tidak berputar diberikan kontak dengan benda kerja yang berputar terus-menerus sampai mencapai temperatur penempaan. Selama tahap terakhir dari proses pengelasan terjadi kontak pada kedua permukaan mengalami difusi atom yang

* Penulis korespondensi, phone: +62-31-5946230 Fax: +62-31-5946230
Email: sanjoto@me.its.ac.id

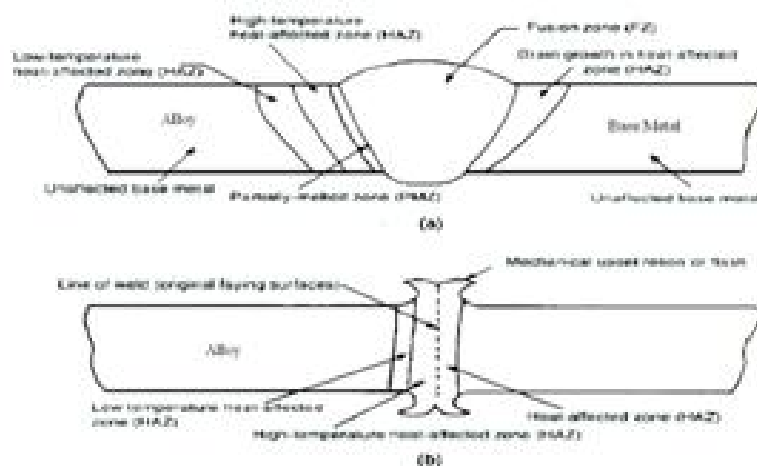
memungkinkan untuk membentuk ikatan metallurgi antara kedua benda kerja.



Gambar 1. Proses pengelasan las gesek (Spinler, 1994)



Gambar 2. Pemilihan parameter dengan waktu untuk ketiga fase dari direct drive friction welding (Spinler, 1994)



Gambar 3. Daerah las (a) Pengelasan Fusi (b) Non Fusi. (Navar, A., 2002).

Berdasarkan bentuk kurva pada *friction welding* akan di bagi menjadi tiga fase lihat pada gambar 3 yaitu: Fase 1 : fase gesekan (*friction phase*), Fase 2 : fase berhenti (*breaking phase*), Fase 3: fase penempaan/*Upset (forging phase)*

Fase 1 adalah fase gesekan, fase ini adalah fase untuk meningkatkan temperatur. Peningkatan temperatur terjadi karena adanya sumber panas yaitu gesekan dua buah logam. Waktu yang dibutuhkan cukup besar dibanding fase lainnya. Fase 2 adalah fase berhenti. Fase ini diharapkan durasi waktu secepat mungkin supaya panas yang terjadi tidak hilang.

Jika dibandingkan dengan metode las fusi maka hasil pengelasan dapat dilihat pada gambar 4. Gambar 4. (a). menunjukkan profil dari daerah pengelasan fusi, di mana terdapat daerah-daerah las yaitu daerah fusi (*Fusion*

Zone), PMZ (*Partially Melted Zone*), daerah terpengaruh panas (HAZ), dan logam induk (*Base Metal*) sedangkan gambar 4 (b) menunjukkan profil daerah pengelasan non fusi dimana terdapat daerah tempa, daerah terpengaruh panas (HAZ) dan logam induk (*Base Metal*). Metode ini bergantung pada perubahan langsung dari energi mekanik ke energi termal untuk membentuk lasan, tanpa aplikasi panas dari sumber yang lain. Di bawah kondisi normal tidak terjadi pencairan pada kedua permukaan.

Dari hasil tinjauan pustaka didapatkan beberapa penelitian seputar las gesek antara lain. Motensen, Jensen, Conrad and Losee, dalam penelitiannya didapatkan bahwa bahan stainless 416 tidak direkomendasikan untuk dilas dengan metode fusion welding, mengingat adanya peristiwa resulfurized, tetapi dengan metode las gesek maka bahan tersebut dapat dilas dengan baik [4]. Sathiva melakukan penelitian friction welding dengan tekanan gesek sebesar 15-25 bar dan tekanan tempa sebesar 35-45 bar dan kecepatan poros utama sebesar 1125 rpm [5]. Mumin Sahin melakukan proses penyambungan dari dua buah logam yang tidak sama yaitu baja paduan tinggi yang digunakan untuk pahat yaitu baja kecepatan tinggi (High Speed Steel/ HSS) dan baja karbon menengah. Dengan memvariasi tekanan gesek sebesar 30 Mpa, 60 Mpa, 90 Mpa, 120 Mpa, 150 Mpa dan dengan waktu gesek konstan sebesar 4 detik didapatkan kekuatan sambungan maksimum sebesar 550 Mpa. Dengan memvariasi waktu gesek sebesar 2, 3, 4, 5 detik dan tekanan gesek dipertahankan konstan sebesar 110 Mpa didapatkan kekuatan sebesar 550 Mpa didapat pada waktu 4 detik [6]. 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. Juga didapatkan bahwa tekanan awal lebih efektif dibandingkan dengan tekanan akhir [7]. Penelitian tentang aplikasi friction welding pada produk poros rotor pada kapal. Dengan mengevaluasi kekuatan tarik sambungan dan struktur mikro sambungan serta uji kekerasan, uji kelelahan dapat disimpulkan bahwa dihasilkan kekuatan sambungan yang sangat baik [8]. Pada pengelasan gesek selain menghasilkan penyambungan yang baik, tetapi mengingat terjadinya proses penyambungan melibatkan kombinasi temperature siap tempa dan tekanan tempa maka juga berdampak terbentuknya deformasi plastis (upset) diseperti sambungan. Besar kecilnya deformasi plastis ini mengindikasikan kondisi pengelasan dan hal ini juga akan mempengaruhi kualitas sambungan [9]. Penyambungan dua jenis logam yang berlainan (HSS- baja karbon medium) dapat dilakukan dengan teknologi pengelasan gesek. Kekuatan sambungan mencapai maksimum ketika temperature siap tempanya optimal. Temperatur tersebut dicapai dengan mengatur variasi tekanan gesek dan durasi gesek, dimana temperaturnya tidak boleh terlalu rendah maupun terlalu tinggi [10]. Berdasarkan penelitian Alfian Mahdi Raditya Firdaus yang menyimpulkan bahwa efek tekanan tempa pada pengelasan menghasilkan dimensi upset yang bervariasi [11]. Wahyu Nugroho menyimpulkan bahwa pengaruh dari parameter tekanan gesek, tekanan tempa dan durasi gesekan dapat diketahui pada sifat mekanik dan struktur mikro [12]. Penelitian berikutnya dilakukan oleh *Anggi Aditya dan Maulana Fajerirancang* bangun mesin *friction welding* menghasilkan produk as sepeda motor [13]. Berdasarkan penelitian Eko Nur Cahyo dan Dimas Angga S menyimpulkan bahwa efek waktu gesekan pada pengelasan menghasilkan distribusi kekerasan dan kekuatan tarik yang bervariasi [14]. Dalam penelitian selanjutnya dari Muhammad Husen Bahasa dan A.H. Fuad Efendi dalam penelitian terapan dari las gesek dalam memproduksi komponen as sepeda motor didapatkan bahwa semakin lama waktu gesek (25, 35, 45 detik) semakin meningkat kekuatannya namun akan menurun kembali ketika waktu geseknya semakin lama (55, 65 detik). Perubahan ini didukung dengan perubahan struktur mikronya [15]. Semakin besar gaya tempa maka semakin besar nilai kekuatan sambungan dari las gesek namun semakin berkurang panjang sampel ujinya karena upset semakin besar [16].

Tujuan penelitian ini adalah pemanfaatan teknologi las gesek dalam upaya penerapan untuk menyambung dua buah pipa baja karbon rendah. Penelitian dilakukan dengan variasi waktu gesek terhadap perubahan struktur mikro dan perubahan sifat kekerasan yang ada pada sambungan

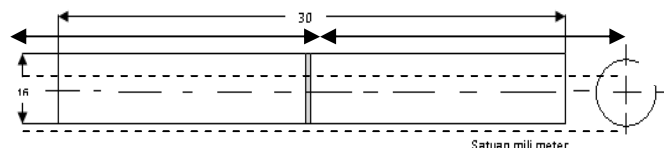
2. METODE

2.1 Material Benda Uji

Benda uji pada penelitian ini adalah pipa air low carbon steel. Biasanya pipa ini disebut dengan pipa baja Galvanis yaitu pipa baja yang telah dilapisi dengan seng. Lapisan ini melindungi baja dari korosi.

Bentuk benda kerja

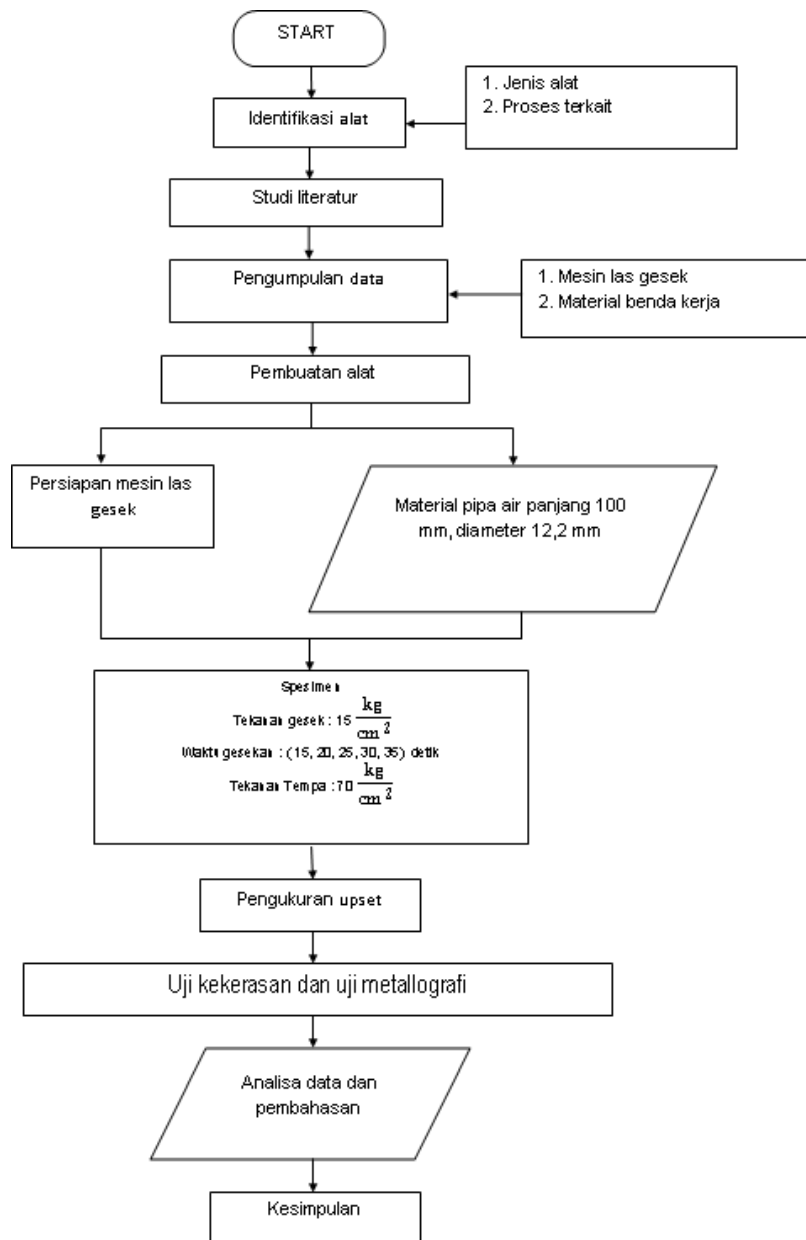
Bentuk benda yang akan di uji kekerasan dan di struktur mikro adalah pipa dengan panjang 100 mm dan diameter luar adalah 21.2 mm, seperti pada gambar 4.



Gambar 4. Spesimen awal

2.2 Diagram alir penelitian

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir penelitian

2.3 Proses Pengelasan

Pada proses *friction welding* untuk material pipa ini dimulai dengan proses *friction* dan dilanjutkan proses penempaan. Penjelasan tentang kedua proses ini akan dijelaskan pada subbab dibawah ini.

Proses Friction

Proses pengelasan dari material pipadimulai dariSpesimen uji yang sudah terpasang diputar dengan kecepatan putaran 4125 Rpm pada temperatur kamar lalu kedua benda kerja dipertemukan dan diberi tekanan gesek $15 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ selama kurun waktu 15, 20, 25, 30, dan 35 detik.Ketika proses *friction* dilakukan maka masing–masing specimen akan mengalami upsett awal pada kedua permukaan yang disambung . Kemudian dilakukan pengukuran temperatur pada masing–masing spesimen sesuai dengan perencanaan yang telah ditentukan.

Proses tempa

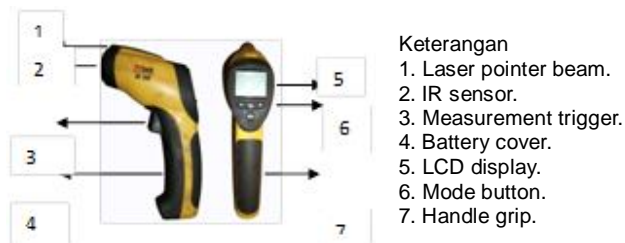
Proses tempa dari material pipa ini dimulai setelah proses *friction* selesai yaitu setelah spesimen uji mencapai waktu yang telah ditentukan. Setelah itu spesimen uji diberi tekanan kembali pada tekanan $70 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ sehingga proses weld dapat dilaksanakan diikuti putaran diperlambat dengan cara direm hingga kondisi berhenti dan didinginkan hingga temperatur ruangan dengan media udara

2.4 Peralatan yang digunakan

Peralatan yang digunakan adalah Mesin Las Gesek (friction welding) dan Infrared Thermograf



Gambar 6. Mesin las gesek langsung



Gambar 7. Infrared Thermograf

2.5 Uji Kekerasan dan Uji Mikro Struktur

Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *rockwell* skala A dengan menggunakan mesin *hardness testing machine hydraulic system*. Pengujian dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan yang terjadi akibat proses *friction* dan *forging*. Pada pengujian *rockwell*, kekerasan didasarkan pada penetrasi akibat beban statis. Pada pengujian kekerasan ini mempunyai keuntungan nilai kekerasan dapat dibaca langsung pada skala pada alat uji kekerasan.

Uji Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro menggunakan peralatan sebagai berikut:

- a. Mesin *grinder* dan *polisher*.
- b. Kertas gosok grid 180, 220, 400, 600, 800, 1000, 1500 dan 2000.
- c. Kain bludru dan bubuk alumina.
- d. etsa menggunakan larutan *pitrid acid* 10 gram dan alkohol.
- e. Mikroskop dengan perbesaran 100x sampai 500x



Gambar 8. Alat uji kekerasan rockwell



Gambar 9. Peralatan pengamatan struktur mikro, a) Mesin Grinder dan Polisher, b) Mikroskop

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

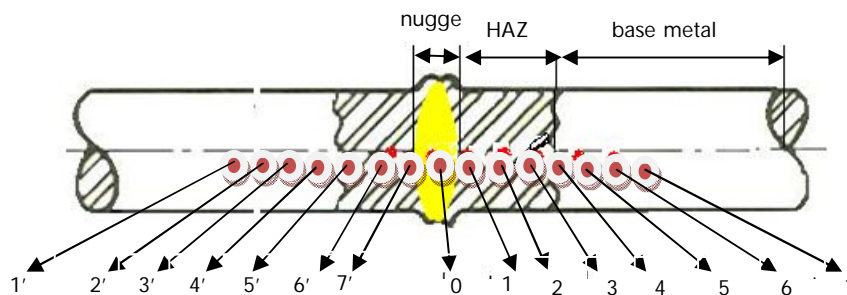
3.1 Hasil Penelitian

Data tabel 1 didapatkan dari hasil proses pengelasan dengan mesin las gesek langsung

Tabel 1. Hasil proses gesek dan tempa

no	gesek			tempa			
	tekanan gesek $\frac{kg}{cm^2}$	Waktu gesekan	Temperatur °C	tekanan tempa $\frac{kg}{cm^2}$	Upset mm	Temperatur °C	HAZ (mm)
1	15	15	402	70	3.1	410	7
2		20	418		3.3	427	7
3		25	437		4.3	442	8
4		30	470		4.7	478	8
5		35	490		5,2	498	9

Dari tabel 1 di atas dapat dilihat pengaruh waktu gesekan sangat berpengaruh pada temperatur gesek dan temperatur tempa, semakin lama waktu gesek semakin berpengaruh pada besar temperatur. Ini juga terjadi pada upset, yang terlihat makin besar seiring dengan peningkatan waktu gesek. Ini juga mempengaruhi panjang HAZ yang terjadi, sesuai yang terlihat pada tabel 2.

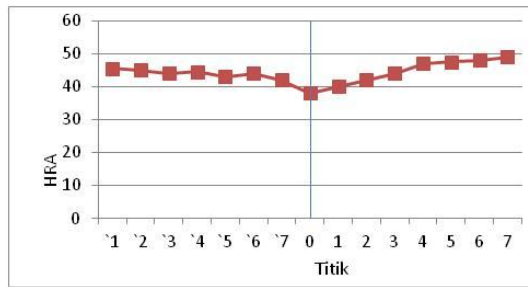


Gambar 10. Posisi pengujian kekerasan

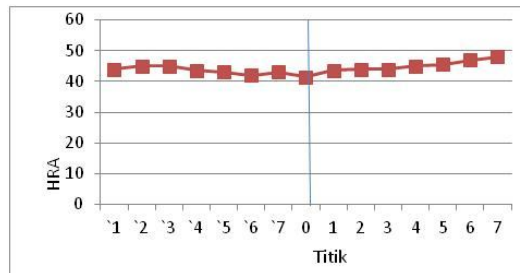
Data tabel 2 didapatkan dari hasil proses pengujian kekerasan dengan Rockweel skala A

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan.

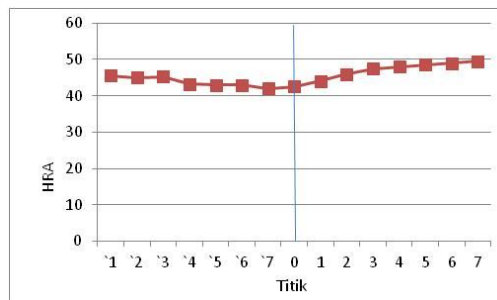
No Spesimen	Friction			Forging P. tempa kg/cm ²	Titik Identasi (HRA)														
	P.gesek kg/cm ²	Durasi gesek detik	Temperatur °C		1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	0	1	2	3	4	5	6	7
1	15	15	402	70	45,5	45	44	44,5	43	44	42	38	40	42	44	47	47,5	48	49
2		20	418		44	45	45	43,5	42	42	43	41,5	43,5	44	44	45	45,5	47	48
3		25	437		45,5	45	45,3	43,3	43	43	43	42	42,5	44	46	47,5	48,5	49	49,5
4		30	470		44	43,2	43,5	44	45	45,5	44	42	44,5	45	47	48,5	49	49,3	49
5		35	490		47,5	47	48	48	49	51	51,2	47,5	51	50,3	51,5	52	53	53,5	55



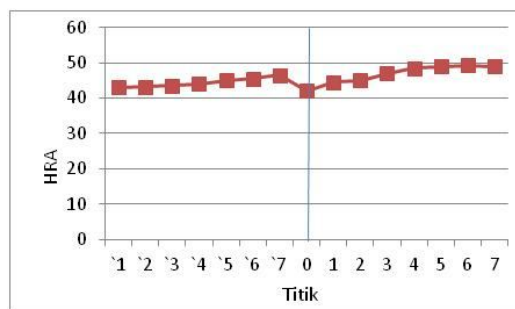
Gambar 11. Distribusi nilai kekerasan sampel uji dengan waktu gesek 15 detik



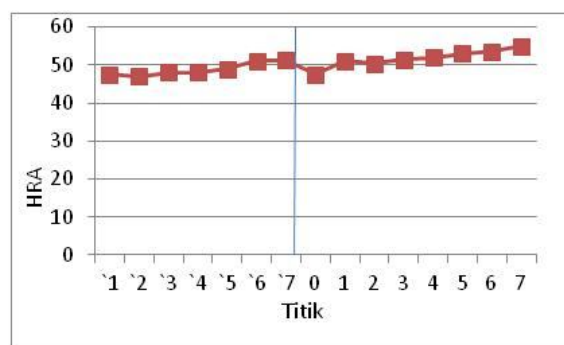
Gambar 12. Distribusi nilai kekerasan sampel uji dengan waktu gesek 20 detik



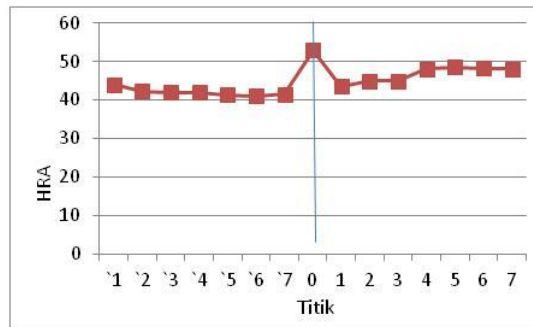
Gambar 13. Distribusi nilai kekerasan sampel uji dengan waktu gesek 25 detik



Gambar 14. Distribusi nilai kekerasan sampel uji dengan waktu gesek 30 detik

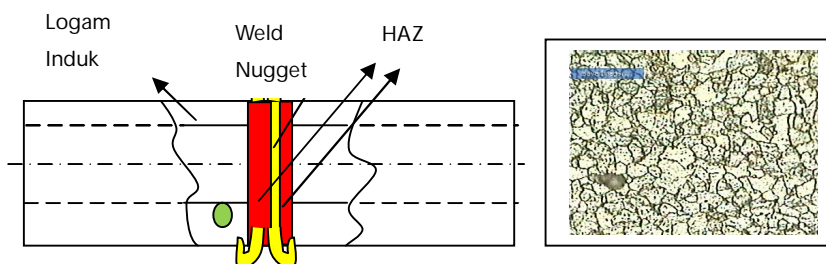


Gambar 15. Distribusi nilai kekerasan sampel uji dengan waktu gesek 35 detik

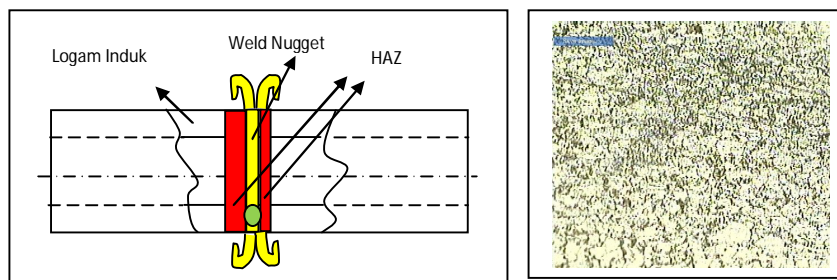


Gambar 16. Distribusi nilai kekerasan sampel uji hasil pengelasan metode fusion welding (las SMAW)

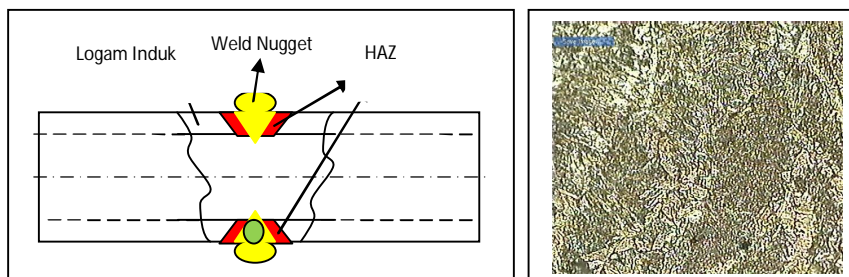
Struktur Mikro pada Friction Welding



Gambar 17. Gambar struktur mikro logam induk pipa low carbon



Gambar 18. Gambar struktur mikro logam las hasil penyambungan las gesek



Gambar 19. Gambar struktur mikro logam las fusion welding (SMAW)

Ada perbedaan srtruktur mikro antara logam induk dengan logam las hasil las gesek. Perbedaan ini dikarenakan logam las telah mengalami proses pemanasan akibat gesekan dan proses penempaan. Pemanasan maupun proses penempaan akan dapat merubah struktur mikro. Namun perbedaan struktur mikro akan sangat menyolok jika dikonstraskan dengan struktur mikro hasil las fusion welding yaitu proses pengelasan las listrik (SMAW). Perbedaan menyolok ini dapat dipahami karena dalam las listrik menggunakan logam pengisi (filler metal) dan proses pengelasan las listrik ini terjadi panas yang sampai meleburkan logam pengisi sehingga panas yang dihasilkan lebih tinggi. Semakin tinggi masukan panas (heat input) mengakibatkan kecepatan pendinginan semakin tinggi juga. Juga dimungkinkan terjadi struktur martensit. Adanya struktur martensit didukung kuat dari hasil uji kekerasan logam las tinggi, ada perbedaan yang menyolok.

3.2 Pembahasan Hasil Penelitian

Semakin tinggi waktu gesek dari 15, 20, 25, 30 dan 35 detik maka semakin tinggi panas yang dihasilkan, dari temperatur 402°C, 418°C, 437°C, 470°C, 490°C. Dan jika diteruskan waktu geseknya akan dapat mengakibatkan temperatur juga semakin tinggi. Hal ini mengacu dari penelitian *Muhammad Husen Bahasa* yang mendapatkan waktu gesek yang menghasilkan temperatur tertinggi di 45 detik. Namun jika diteruskan sampai temperatur akan turun karena sumber gesekan makin berkurang dan temperatur akan turun. Dalam penelitian ini juga dimungkinkan masih dapat mencapai temperatur yang lebih tinggi lagi namun juga ada batasnya sehingga akan turun juga. Naiknya temperatur akan berpengaruh terhadap nilai upset. Terlihat pada tabel 1. Semakin tinggi waktu gesek semakin tinggi temperatur juga semakin tinggi nilai upsetnya. Namun juga jika diteruskan nilai upsetnya juga akan dapat naik dan kemudian turun. Jika dilihat bagian yang terkena pengaruh / terimbas panas yang sering disebut HAZ akan semakin panjang. HAZ dalam penelitian ini lebih diterjemahkan sebagai daerah yang terkena panas sehingga permukaannya terkena oksidasi, ada perubahan warna dipermukaannya. Jika dikaitkan dengan hasil distribusi kekerasan pada sampel uji maka hasil uji kekerasan ada perbedaannya. Pada sampel uji dengan waktu gesek paling singkat yaitu 15 detik maka terlihat adanya nilai kekerasan pada logam las paling rendah (gambar 11). Kondisi ini akan dapat diprediksi bahwa nilai kekuatan tariknya akan rendah, akan terjadi putus di daerah sambungan karena proses sambungannya dimungkinkan belum sempurna. Kesempurnaan sambungan merupakan hasil kombinasi temperatur dan tekanan tempa. Jika waktu gesek dinaikan lebih lama maka distribusi kekerasan tidak begitu nampak kekontrasan dengan nilai kekerasan sebelumnya. Jika dibandingkan dengan distribusi kekerasan hasil sambungan las fusion welding maka akan ada perbedaan (gambar 16). Pada gambar 16 daerah logam induk sangat menyolok perbedaan nilai kekerasannya dikarenakan logam lasnya dari logam yang berbeda dan temperturnya lebih tinggi karena sampai mencair. Tingginya angka kekerasan logam las pada gambar 16 akan didukung pada gambar struktur mikro pada gambar 19. Nilai kekerasan tinggi ini dimungkinkan adanya fase martensit. Struktur mikro berubah pasti akan mengakibatkan sifat mekanik (kekerasan) berubah. Yang mampu merubah struktur mikro ada 3 faktor yaitu adanya perubahan komposisi logam, adanya perlakuan panas, adanya pengaruh pengerjaan dingin (cold working). Pada peristiwa las gesek ini perubahan struktur dimungkinkan dari pengaruh pemanasan dan pengaruh tempa. Namun pengaruh panas akan dieliminir oleh proses tempa. Mestinya semakin panas akan memperbesar butir kristal struktur mikro namun proses pembesaran butir kristal ini akan dihambat karena pengaruh tempa sehingga perubahan butir kristal yang sering terjadi di daerah pengaruh panas tersebut tidak terjadi karena ada proses tempa.

4. SIMPULAN

Semakin lama waktu gesek temperatur yang terjadi semakin meningkat. Namun semakin meningkat temperatur mengakibatkan nilai upset semakin besar dan semakin pendek sampel ujinya. Penelitian proses penyambungan las gesek dengan proses operasional putaran poros utama 4125 rpm dengan tekanan gesek 15 kg/cm² dan tekanan tempa 70 kg/cm² dapat disimpulkan bahwa waktu gesek yang direkomendasikan adalah 35 detik. Metode las gesek dapat diterapkan untuk proses penyambungan pipa baja karbon rendah. Struktur mikro pada sambungan tidak banyak mengalami perubahan struktur mikro, yang berarti tidak banyak terjadi perubahan sifat mekanik.

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.
- [3] Navar, A., *The Steel Handbook*, McGraw Hill, New York, 1994.
- [4] Motensen, Jensen, Conrad and Losee, *Mechanical Properties and Microstructures of Inertia Friction Welded 416 Stainless Steel*, welding research supplement, November, p. 268-273. 2001.
- [5] P.Sathiva, S., Aravindan dan A., Noorul Hag, *Friction welding of austenitic stainless steel and optimization of weld quality*. International Symposium of research student on Materials science and Engineering, desember 20-22, Chennai India, 2004.
- [6] Mumin Sahin, *Joining with friction welding of high speed steel and medium carbon steel*, Journal of Materials Processing Technology 168, halaman 201-210, 2005.
- [7] Akbari mousavi and Rahbar kelishami, *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, 2008.
- [8] Ho Seung Jeong dkk., *Inertia friction welding process analysis and mechanical propeirties evaluation of large rotor shaft in marine turbo charger*, International journal of precision engineering and manufacturing volume 11, no.1 , page 83-88, 2010.
- [9] Mumin Sahin, H. Erol Ataka, *Joining with friction welding of plastically deformed steel*. Mechanical Engineering Departement, Trakya University, Edirne, Turkey, 2003.
- [10] Mumin Sahin, *Joining with friction welding of high-speed steel and medium carbon steel*, Mechanical Engineering Departement, Trakya University, Edirne, Turkey, 2004.
- [11] Alfian Mahdi Raditya Firdous, *Pengaruh tekanan tempa terhadap upset, Akurasi dimensi dan kekuatan sambungan lasan Pada baja karbon aisi 1045 dengan Direct-drive friction welding*, Tugas Akhir D3 Teknik Mesin, FTI, ITS, Surabaya, 2010.
- [12] Wahyu Nugroho, *Pengaruh durasi gesekan, tekanan gesek dan tekanan tempa terhadap kekuatan sambungan las gesek langsung pada baja karbon aisi 1045*, Tugas Akhir Teknik Mesin, FTI, ITS, Surabaya,

2010.

- [13] Anggi Aditya dan Maulana Fajeri, Rancang bangun mesin friction welding yang menghasilkan produk as sepeda motor, *Tugas Akhir D3 Teknik Mesin*, FTI, ITS, Surabaya, 2011.
- [14] Eko Nur Cahyo dan Dimas Angga S, ***Analisa Pengaruh Waktu Gesekan Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik pada Pipa Baja ASTM A106 dengan Metode Friction Welding***, Tugas Akhir D3 Teknik Mesin, FTI, ITS, Surabaya, 2010.
- [15] Muhammad Husen Bahasa, ***Analisa pengaruh waktu gesekan dengan metode direct drive friction welding terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja St 41 sebagai alternative pengganti proses produksi as roda sepeda motor***, Tugas Akhir D3 Teknik Mesin, FTI, ITS, Surabaya, 2011.
- [16] AH Fuad Efendi, ***Analisa pengaruh tekanan tempa dengan metode direct drive friction welding terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja St 41 sebagai alternative pengganti proses produksi as roda sepeda motor***, Tugas Akhir D3 Teknik Mesin, FTI, ITS, Surabaya, 2011.