

Analisa Kelelahan Dan Kekerasan Pada Logam *Axle shaft* Dengan Pengelasan Gesek

Muhammad Faisal¹, Asrul²

^{1,2} Teknik Mesin, fakultas, Politeknik Kotabaru Kalimantan Selatan

¹muhammadfaisal@poltekab.ac.id ²asrul@poltekab.ac.id

Abstract

The axle shaft is a component of the power transfer system which often experiences mechanical failure. The purpose of this study was to determine the degree of fatigue and hardness of metal shafts with variations in frictional load as information on friction welding recommendations on metal shafts. The research method used is the experimental method, which is a way to compare specimens with variations in friction welding loads of 2 kg, 4 kg, and 6 kg using the Rockwell method of hardness testing and fatigue testing using a rotary bending machine. From the research results it is recommended that friction welding on metal axle shafts can be carried out with a friction load of 6 kg because from the results of the fatigue test SPBG6 has the highest average fatigue strength compared to SPBG2 and SPBG4. This was reinforced by the results of the SPBG6 hardness test which showed the lowest hardness level for the parent metal at 80.44 HRA.

Keywords: Friction Welding, *Axle shaft*, Hardness Test, Fatigue

Abstrak

Axle shaft merupakan salah satu komponen sistem pemindah tenaga yang sering mengalami kegagalan mekanis. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui tingkat kelelahan dan kekerasan pada logam *axle shaft* dengan variasi beban gesek sebagai informasi rekomendasi pengelasan gesek pada logam *axle shaft*. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen, yaitu suatu cara untuk membandingkan antara spesimen dengan variasi beban pengelasan gesek 2 kg, 4 kg, dan 6 kg menggunakan pengujian kekerasan metode *Rockwell* dan uji lelah menggunakan mesin *rotary bending*. Dari hasil penelitian dapat direkomendasikan pengelasan gesek pada logam axle shaft dapat dilakukan dengan beban gesek 6 kg karena dari hasil uji lelah SPBG6 memiliki rata-rata kekuatan lelah tertinggi dibandingkan dengan SPBG2 dan SPBG4. Hal ini diperkuat dengan hasil uji kekerasan SPBG6 yang menunjukkan tingkat kekerasan paling rendah pada logam induk sebesar 80,44 HRA.

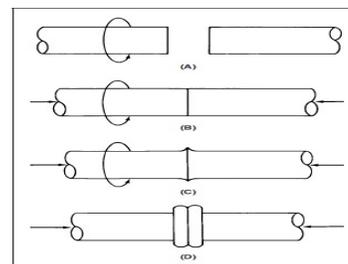
Kata kunci: Las Gesek, *Axle shaft*, Uji Kekerasan, Uji Lelah

1. Pendahuluan

Pengelasan gesek adalah proses penyambungan *solid-state* yang menghasilkan sambungan dalam material menggunakan panas yang dikembangkan di antara permukaan melalui kombinasi gerakan gesek yang digerakkan secara mekanik dan beban yang diterapkan. Variasi pengelasan gesek dibutuhkan untuk membuat lasan di mana energi yang dipasok melalui koneksi motor langsung untuk periode yang telah ditentukan dari siklus pengelasan [1].

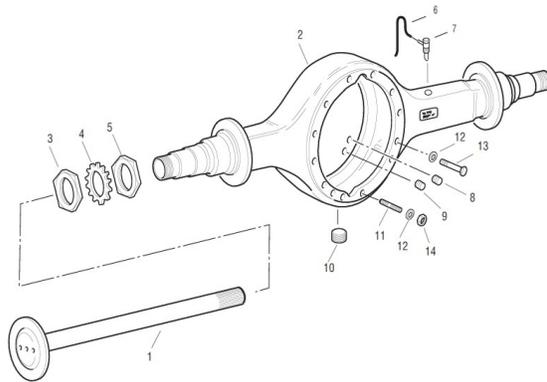
Langkah-langkah dasar dalam proses pengelasan gesekan diilustrasikan pada Gambar 1. Seperti yang ditunjukkan pada 1.(A), satu benda kerja diputar dan yang lainnya dipegang diam. 1.(B) Ketika kecepatan rotasi yang sesuai tercapai, dua benda kerja disatukan.

1.(C) Abrasi pada antar muka benda kerja secara lokal menjadi leleh dan mengakibatkan pemendekan aksial. Tahap kedua langkah ini terjadi selama gesekan berlangsung. 1.(D) Hingga akhirnya, rotasi benda berhenti dan tersambung [2].



Gambar 1. Proses pengelasan gesek [2]

Adapun konstruksi penggerak belakang dapat dilihat pada Gambar 2. yang memperlihatkan posisi *axle shaft*



- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| 1. Axle shaft | 8. Fill plug |
| 2. Housing | 9. Oil sensor plug |
| 3. Outer nut | 10. Drain plug |
| 4. Lock washer | 11. Housing stud |
| 5. Inner nut | 12. Hardened washer |
| 6. Housing breather tube | 13. Carrier capscrew |
| 7. Housing breather fitting | 14. Nut, stud |

Gambar 2. Bagian axle shaft pada housing [3]

Axle shaft atau poros penggerak merupakan produk komponen suku cadang otomotif (*automotif spare part*). *Axle shaft* berfungsi untuk meneruskan tenaga gerak dari differential ke roda-roda. *Axle shaft* merupakan salah satu komponen sistem pemindah tenaga yang sering mengalami kegagalan mekanis karena tumpuan roda-roda yang terpasang pada *axle shaft*. Logam *axle shaft* yang akan dilakukan penelitian adalah *axle shaft* pada truk dengan kapasitas angkut 7 ton. Berdasarkan tujuan tersebut, maka dilakukan penelitian terkait dengan pengelasan gesek pada variasi beban untuk mengetahui pengelasan gesek yang baik dengan menganalisa tingkat kelelahan dan kekerasan.

Penelitian yang dilakukan pada pengujian tarik didapatkan hasil kekuatan tarik pada spesimen logam *axle shaft* dengan pengelasan gesek meningkat sebesar 817,32 MPa dari spesimen logam *axle shaft* murni yang memiliki kekuatan tarik sebesar 769,22 MPa [4].

Kekerasan adalah sifat yang dapat diandalkan sebagai kekuatan bahan. Pengukuran kekerasan adalah mudah, sehingga banyak dilakukan dalam pemilihan bahan. Ada beberapa macam alat pengujian kekerasan yang dipergunakan sesuai dengan: bahan, Kekerasan dan hal lain-lainnya dari suatu produk [5].

Tabel 1. Skala kekerasan *rockwell*

Skala	Penekan	Beban Utama	Dial
B	Bola Baja 1/16"	100	Merah
C	Intan	150	Hitam
A	Intan	60	Hitam
D	Intan	100	Hitam
E	Bola Baja 1/8"	100	Merah
F	Bola Baja 1/16"	60	Merah
G	Bola Baja 1/16"	150	Merah
H	Bola Baja 1/8"	60	Merah
K	Bola Baja 1/8"	150	Merah
L	Bola Baja 1/4 "	60	Merah
M	Bola Baja 1/4 "	100	Merah
P	Bola Baja 1/4"	150	Merah
R	Bola Baja 1/2 "	60	Merah
S	Bola Baja 1/2 "	100	Merah
V	Bola Baja 1/2 "	150	Merah

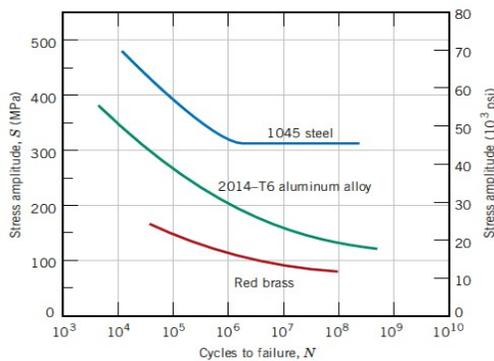
Pengujian kekerasan *Rockwell* cocok untuk semua material yang keras dan yang lunak, penggunaannya sederhana dan penekannya dapat luasa. Tabel 1 menunjukkan bagaimana memilih skala *Rockwell*. Sekala kekerasan B, C, dan A adalah untuk bahan logam, sekala A dapat dipakai untuk bahan sangat keras seperti karbida tungsten, sekala D dan di bawahnya dipakai untuk batu gerinda sampai plastik. Pengujian *Rockwell* superfisial menggunakan beban yang ringan untuk memperbaiki ketelitian dari penekanan dengan cara penggunaan yang sama, juga dapat mengukur kekerasan permukaan dari bahan yang dikeraskan kulitnya [6].

Menurut Callister pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell* bertujuan menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap benda uji (spesimen) yang berupa bola baja ataupun kerucut intan yang ditekan pada permukaan material uji tersebut [7]. Pengukurannya dapat dilakukan dengan bantuan sebuah kerucut intan dengan sudut puncak 120° dan ujungnya yang dibulatkan sebagai benda pendesak (*indenter*). Prinsip pengujian pada metode *Rockwell* adalah dengan menekankan penetrator ke dalam benda kerja dengan pembebanan, dan kedalaman indentasi akan memberikan harga kekerasan yaitu perbedaan kedalaman indentasi yang didapatkan dari beban mayor dan minor.

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/b^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	Diamond cone 1/8, 1/16, 1/32 in. diameter steel spheres			60 kg 100 kg 150 kg 15 kg 30 kg 45 kg	Rockwell Superficial Rockwell

Gambar 3. Teknik Pengujian Kekerasan [7]

Metode dasar dalam penyajian data kelelahan adalah menggunakan kurva S-N yaitu pemetaan tegangan S terhadap jumlah siklus hingga terjadi kegagalan N. Mesin ini memberi beban lentur, Gambar 4 menunjukkan kurva S-N yang diperoleh dari uji gelagar berputar [9].



Gambar 4. Kurva S-N

Paventhan dkk, Dalam penelitiannya tentang pengelasan gesek terhadap perilaku kelelahan dissimilar pada baja karbon menengah austenitic gesekan baja (MCS – ASS) yang berbeda. Mesin pengelasan gesek yang digunakan bergerak kontinyu untuk membuat sambungan las. Prilaku Kelelahan menggunakan mesin uji bending lentur putar (R = 1). Menerapkan tegangan terhadap jumlah siklus pada kegagalan diplot dengan kurva (S-N) [8].

Patahan lelah disebabkan oleh tegangan berulang, dan juga dijumpai pada tegangan kurang dari 1/3 kekuatan tarik statis pada bahan struktur tanpa konsentrasi tegangan. Dalam keadaan di mana pemusatan tegangan diperhitungkan, mungkin bahan akan putus pada tegangan yang lebih rendah. Jadi kelelahan memegang peran utama dalam putusnya bahan secara mendadak pada penggunaan suatu struktur atau komponen [6].

Herdi dan Joli, tegangan lentur yang terjadi pada permukaan bahan dapat ditentukan dengan

menggunakan momen inersia dan jarak melintang benda uji dengan persamaan sebagai berikut [10]:

$$\sigma = (M.y)/I$$

$$M = WL$$

$$y = d/2$$

$$I = \frac{\pi.d^4}{64}$$

Maka akan diperoleh :

$$\sigma = 32WL/(\pi.d^2)$$

Dimana :

$$\sigma = \text{Tegangan Lentur (Kg / mm}^2\text{)}$$

W = Beban yang digunakan

L = Jarak antara beban dan titik area pengujian (cm)

d = Diameter spesimen (cm)

$\pi = 3,14$

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Material Teknik Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia. Penelitian dimulai melakukan studi literatur mencari refrensi terkait pengelasan gesek, axle shaft, pengujian lelah dan pengujian kekerasan. Persiapan alat dan bahan dalam penelitian ini yaitu pembuatan spesimen dari *axle shaft* yang dilakukan pengupasan menggunakan mesin bubut dan selanjutnya dilakukan penyambungan dengan pengelasan gesek pada variasi beban gesek 2 kg, 4 kg, dan 6 kg. Pengambilan data pengujian lelah menggunakan mesin *rotary banding* dan pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell. Selanjutnya dari data pengujian dilakukan analisa data untuk mendapatkan hasil penelitian.

Pembuatan spesimen diperlihatkan pada Gambar 5 logam *axle shaft* pada truk yang sudah mengalami kegagalan (patah). Sebelum dilakukan pengelasan gesek perlu dilakukan pengupasan logam menggunakan mesin bubut.



Gambar 5. Proses Pengupasan Logam

Pengelasan gesek diperlihatkan pada Gambar 6 dilakukan dengan putaran 1120 rpm dengan variasi beban 2 kg, 4 kg, dan 6 kg.



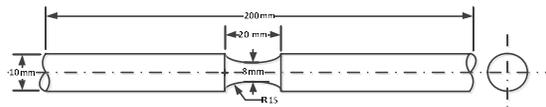
Gambar 6. Pengelasan Gesek

Adapun hasil pengelasan gesek spesimen uji lelah yang diperlihatkan pada Gambar 7 akan dilakukan pengupasan sesuai standar ASTM E466.



Gambar 7. Spesimen Uji Lelah (*fatigue*)

Dimensi spesimen uji lelah (*fatigue*) ASTM E466 [11] diperlihatkan pada Gambar 8.



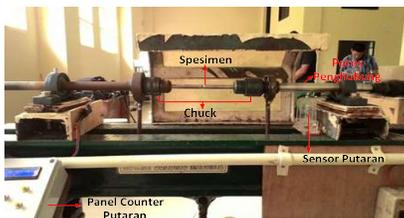
Gambar 8. Dimensi ASTM E466

Dimensi ASTM E466 yang diperlihatkan pada Gambar 8 meliputi panjang spesimen 200 mm, diameter 10 mm, panjang ukur 20 mm, radius 15, diameter takikan 8 mm.



Gambar 9. Spesimen Uji Lelah

Spesimen uji lelah diperlihatkan pada Gambar 9 mengikuti standar ASTM E466 dan selanjutnya akan dilakukan pengujian lelah menggunakan mesin rotary bending. Proses pengujian lelah menggunakan mesin rotary bending dengan memasang spesimen uji yang diperlihatkan pada Gambar 10.



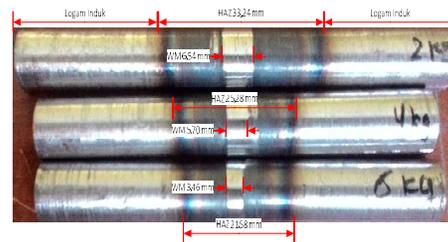
Gambar 10. Pemasangan Spesimen Pada Mesin Rotary Bending

Selanjutnya memasang beban uji pada mesin rotary bending (variasi beban 14 kg, 15 kg, 16 kg, 17 kg, 18 kg), menghidupkan mesin dan menunggu hingga spesimen uji patah, saat spesimen patah otomatis mesin akan berhenti dan akan merekam pada data logger memory card di panel counter putaran yang diperlihatkan pada Gambar 11.



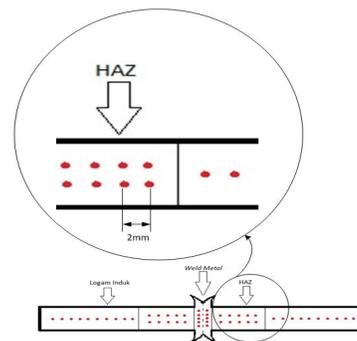
Gambar 11. Panel Counter Putaran

Adapun hasil pengelasan gesek spesimen uji kekerasan diperlihatkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Daerah Las pada Spesimen Uji Kekerasan *Rockwell*

Terlihat pada Gambar 12 menunjukkan ada batasan antara daerah *weld metal*, HAZ dan logam induk. Daerah HAZ terlihat sangat jelas berwarna hitam, hal ini karena rambatan panas dari pengelasan gesek. Semakin lama waktu penyambungan maka daerah HAZ akan semakin panjang dan sebaliknya. Hal ini sesuai dengan pernyataan Husodo dkk, yang melakukan pengamatan pada metalografi material yang mengalami proses pengelasan akan dilakukan pada 3 tempat yaitu pada *base metal*, *weld metal* dan daerah HAZ. Ketiga daerah itu mendapat pengaruh panas yang berbeda pada saat proses pengelasan berlangsung, sehingga akan memiliki struktur metalografi yang berbeda pula [12].



Gambar 13. Spesimen Uji kekerasan *Rockwell*

Pengujian kekerasan yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode *Rockwell* dengan indenter kerucut intan dengan beban 60 kg. dan sudut 120°. Setiap daerah las pada spesimen dikenai sepuluh titik tekanan dengan jarak antara titik kurang lebih 2 mm dapat dilihat pada Gambar 13.

Adapun proses pengujian kekerasan dalam penelitian ini melakukan persiapan spesimen uji dengan membersihkan permukaan benda dari kotoran menggunakan kertas gosok, mengatur alat uji kekerasan *Hardness Rockwell* (HRA), Spesimen yang akan diukur kekerasannya yaitu pada daerah sambungan las (*weld metal*), daerah Haz, dan daerah logam induk (*base metal*). Gambar 14 memperlihatkan proses pengambilan data pengujian kekerasan menggunakan metode *rockwell*.



Gambar 14. Pengujian Kekerasan

3. Hasil dan Pembahasan

Dari hasil pengujian lelah didapatkan data yang diperlihatkan pada Tabel 2.

Beban pengujian lelah (kgf)	Tegangan Lentur σ_E (Mpa)	Siklus (N)		
		SBPG2	SBPG4	SBPG6
14	300.40	1506841	1296523	1348314
15	321.86	492971	630495	1026948
16	343.31	337815	98472	427041
17	364.77	282226	58105	139933
18	386.23	37749	20759	84660

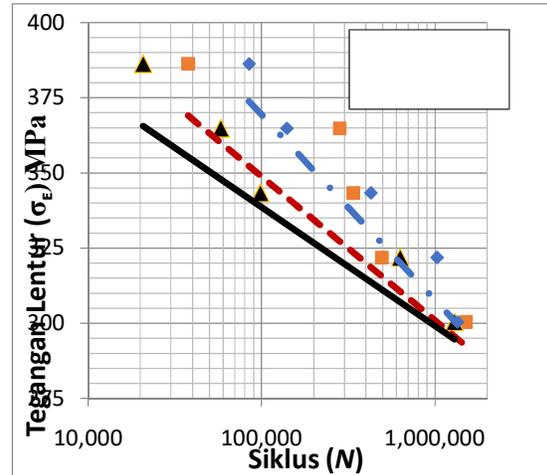
Keterangan:

SBPG2 = Spesimen Beban Pengelasan Gesek 2 kg.

SBPG4 = Spesimen Beban Pengelasan Gesek 4 kg.

SBPG6 = Spesimen Beban Pengelasan Gesek 6 kg.

Diagram S-N dapat diplot dari hasil Tabel 2 yang diperlihatkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Kurva S-N Hasil Uji Lelah (Fatigue)

Dari hasil pengujian bahwa kondisi material dan sifat ketahanan lelah material memiliki hubungan yang sangat erat. Besar pembebanan yang diberikan pada spesimen uji lelah akan memperpendek siklus atau ketahanan lelah material seperti yang ditunjukkan pada Kurva S-N hasil uji lelah yang memperlihatkan tegangan lentur diubah antara 300,40 MPa sampai 386,23 MPa. Hal serupa juga terjadi dalam penelitian Mumin Sahin yang melakukan pengelasan gesek pada baja karbon tinggi dan baja karbon sedang dengan melakukan pengujian lelah didapatkan fluktuasi tegangan lentur diubah antara 175 MPa sampai 225 MPa [13]. Penambahan beban pada pengujian lelah dapat menambah tegangan lentur pada spesimen,

Dalam penelitian Paventhan dkk yang melakukan penelitian tentang perilaku kelelahan pengelasan gesek pada baja karbon sedang dan *austenitic stainless steel dissimilar joints* mendapatkan hasil perilaku kelelahan menggunakan mesin uji bending lentur putar ($R = 1$). Menerapkan tegangan terhadap jumlah siklus pada kegagalan diplot dengan kurva (S-N). Kekuatan lelah baja karbon sedang adalah 100 MPa dan kekuatan lelah *austenitic stainless steel dissimilar joints* adalah 120 MPa dan sambungan yang berbeda didapatkan 70 MPa yang berarti lebih rendah 30% lebih rendah dari baja karbon sedang serta 40% lebih rendah dari *austenitic stainless steel dissimilar joints*. Artinya dari kurva S-N menunjukkan bahwa kekuatan lelah *austenitic stainless steel dissimilar joints* lebih tinggi dari baja karbon sedang dan sambungan yang berbeda [8].

Hasil uji lelah yang didapatkan pada penelitian ini berbanding lurus dengan penelitian yang berkaitan dengan tingkat kelelahan, hal ini diperlihatkan kecenderungan pengaruh pembebanan alat uji lelah terhadap jumlah siklus yang dihasilkan hingga spesimen patah. Dari ketiga spesimen dengan variasi beban gesek menunjukkan kekuatan lelah tertinggi didapatkan pada SBPG2 dengan siklus (N) 1.506.841 putaran pada tegangan lentur 300,40 MPa, namun kekuatan lelah tertinggi pada tegangan lentur 386,23

MPa didapatkan pada SPBG6 dengan siklus (N) 84.660 putaran. Bila dilihat dari kurva S-N kekuatan lelah tertinggi didapatkan pada SPBG6 karena rata-rata hasil kekuatan lelah yang didapat lebih baik dibandingkan pada SPBG2.

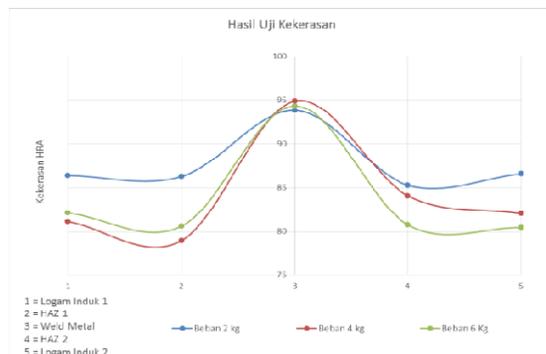
Secara teoritis, besar tegangan lentur akibat pembebanan dan kecepatan putar pada alat uji lelah atau disebut juga frekuensi pembebanan. Tegangan lentur yang semakin kecil akan mempengaruhi siklus, sehingga menghasilkan batas lelah yang semakin lama hingga akhirnya spesimen patah. Sebaliknya dengan pembebanan yang semakin berat pada pengujian lelah maka tegangan lentur yang dihasilkan akan semakin meningkat, sehingga spesimen akan cepat patah dengan siklus yang sedikit.

Dari hasil pengujian kekerasan *Rockwell* yang di perlihatkan pada Tabel 3 diperoleh hasil rata-rata pengujian kekerasan *Rockwell* adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Kekerasan

PUTARAN	BEBAN		LI	HAZ	WM	HAZ	LI
1120	2	average	86.07	85.44	93.47	84.97	86.58
		SD	1.52	1.66	1.05	1.25	1.10
		average-SD	84.55	83.78	92.42	83.72	85.48
		Data Rata-rata Sortir	86.38	86.27	93.81	85.30	86.58
	4	average	80.86	78.51	94.67	83.68	82.07
		SD	0.91	2.76	1.58	1.56	0.96
		average-SD	79.95	75.75	93.09	82.12	81.11
		Data Rata-rata Sortir	81.13	78.99	94.92	84.11	82.07
	6	average	81.53	80.39	93.82	80.40	80.34
		SD	1.83	0.87	0.94	0.89	0.89
		average-SD	79.70	79.52	92.88	79.51	79.45
		Data Rata-rata Sortir	82.13	80.61	94.34	80.76	80.44

Adapun grafik kekerasan spesimen pengelasan gesek adalah sebagai berikut:



Gambar 16. Grafik Kekerasan Spesimen Pengelasan Gesek Beban 2 kg, 4 kg, dan 6 kg

Dari pengujian kekerasan yang telah dilakukan, kekerasan logam untuk daerah *weld metal* yang tertinggi adalah spesimen pada SPBG4 dengan nilai rata-rata yaitu (94,92) HRA, sedangkan kekerasan logam untuk daerah *weld metal* yang terendah adalah spesimen pada SPBG2 dengan nilai rata-rata yaitu (93,81) HRA.

Kekerasan logam untuk daerah HAZ yang tertinggi adalah spesimen pada SPBG2 dengan nilai rata-rata yaitu (86,27-85,30) HRA, sedangkan kekerasan logam untuk daerah HAZ yang terendah adalah spesimen pada SPBG4 dengan nilai rata-rata yaitu (78,99-84,11) HRA.

Kekerasan logam untuk daerah logam induk yang tertinggi adalah spesimen pada SPBG2 dengan nilai rata-rata yaitu (86,38-86,58) HRA, sedangkan kekerasan logam untuk daerah logam induk yang terendah adalah spesimen pada SPBG6 dengan nilai rata-rata yaitu (82,13 - 80,44) HRA.

Dari hasil uji kekerasan ternyata metode pengelasan gesek menunjukkan nilai kekerasan yang tinggi, temperatur panas dan waktu pengelasan yang lebih singkat merubah struktur logam menjadi keras setelah proses pengelasan gesek. Pengelasan gesek yang paling cepat terjadi pada pembebanan 6 kg yaitu 12 detik, pembebanan 4 kg yaitu 21 detik dan pembebanan 2 kg yaitu 56 detik. Pengaruh pembebanan terhadap kekerasan pada pengelasan gesek perbedaannya tidak terlalu signifikan.

Dari ketiga spesimen dengan variasi beban yang berbeda mempunyai nilai kekerasan yang tertinggi untuk daerah *weld metal* terdapat pada SPBG4, nilai kekerasan tertinggi untuk daerah HAZ dan logam induk terdapat pada SPBG2.

Bila dikaitkan dengan hasil uji tarik pada penelitian sebelumnya oleh Faisal dkk, patahan spesimen pada uji tarik yang terjadi terdapat pada logam induk [4], artinya nilai kekerasan daerah logam induk lebih keras dibandingkan pada daerah HAZ. Hal ini sesuai dengan hasil uji kekerasan yang tertinggi didapatkan pada SPBG4, hasil ini dapat menjadi informasi bahwa SPBG4 tidak menjadi rekomendasi dalam pengelasan gesek pada logam *axle shaft* karena memiliki nilai kekerasan tertinggi yang mengakibatkan logam *axle shaft* cepat patah. Hal ini juga diperkuat dengan hasil uji lelah yang didapatkan bahwa SPBG4 didapatkan siklus (N) terendah yaitu 20.759 putaran.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat direkomendasikan pengelasan gesek pada logam *axle shaft* dapat dilakukan dengan beban gesek 6 kg karena dari hasil uji lelah SPBG6 memiliki rata-rata kekuatan lelah tertinggi dibandingkan dengan SPBG2 dan SPBG4. Hal ini diperkuat dengan hasil uji kekerasan SPBG6 yang menunjukkan tingkat kekerasan paling rendah pada logam induk sebesar 80,44 HRA.

5. Refrensi

- [1] MTI, "Friction Welding," Washington, 1999.
- [2] A. O'Brien and C. Guzman, *Welding handbook*, vol. 3. 2007.
- [3] DANA, *Service Manual-Single Reduction & Single Reduction with Differential Lock*. USA: Spicer, 2008.

- [4] M. Faisal, M. Balfas, and K. Kamil, "Analisis Kekuatan Tarik pada Logam *Axle shaft* dengan Pengelasan Gesek (Friction Welding)," *Teknologi*, vol. 19, pp. 25–30, 2018.
- [5] Surdia, T. & Chijiwa. K., *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta: Pradnya Paramita, 2006.
- [6] Surdia, T. & Saito, S., *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: Pradnya Paramita, 1999.
- [7] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 2007.
- [8] R. Paventhan, P. R. Lakshminarayanan, and V. Balasubramanian, "Fatigue behaviour of friction welded medium carbon steel and austenitic stainless steel dissimilar joints," *Mater Des*, vol. 32, no. 4, pp. 1888–1894, Apr. 2011.
- [9] Achmad, Z. *Elemen Mesin 1*. Bandung: Refika Aditama. 1999.
- [10] Herdi, S., & Joli, S., *Alat Uji Cantilever Rotating Bending (Fatigue Testing Machine)*, Universitas Teuku Umar. 2013.
- [11] ASTM. Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials I. 2002.
- [12] Husodo, N., Suseno, G., W, G. D., Hidayat, D., & Hidayat, R., "Upaya Alternatif Proses Manufaktur Produk Katup Mesin (Engine Valve) Bahan SS 304 Berbasis Proses Operasional Las Gesek (Friction Welding), Seminar Nasional Teknologi, ISSN: 2407 -7534, 142-152, 2015.
- [13] Sahin, M. Joining With Friction Welding Of High-Speed Steel And Medium-Carbon Steel. *Technology, Materials Processing*, 168, 202–210, 2005.