

## STUDI SIFAT MEKANIS HASIL PENGELASAN DENGAN METODE LAS GESEK PADA MATERIAL BAJA TAHAN KARAT AISI D2 & AISI 304

Deni<sup>1,\*</sup>, Riyan Ariyansah<sup>2</sup>, Murtalim<sup>3</sup>, Ade Sunardi<sup>4</sup>, Adhes Gamayel<sup>5</sup>

<sup>1,2,4,5</sup>Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Jakarta Global University, Jl. Boulevard Grand Depok City, Tirtajaya, Kec. Sukmajaya, Kota Depok, Jawa Barat 1641

<sup>3</sup>Teknik Mesin, Fakultas Teknik Dan Ilmu Komputer, Universitas Buana Perjuangan Karawang, Jl. Ronggo Waluyo Sirnabaya, Puseurjaya, Kec. Telukjambe Timur, Kabupaten Karawang, Jawa Barat 41361

Email: [deni@jgu.ac.id](mailto:deni@jgu.ac.id)<sup>1\*</sup>, [riyanariyansah@jgu.ac.id](mailto:riyanariyansah@jgu.ac.id)<sup>2</sup>, [murtalim@ubpkarawang.ac.id](mailto:murtalim@ubpkarawang.ac.id)<sup>3</sup>, [ade@jgu.ac.id](mailto:ade@jgu.ac.id)<sup>4</sup>, [adhes@jgu.ac.id](mailto:adhes@jgu.ac.id)<sup>5</sup>

### ABSTRAK

Teknik pengelasan telah lama digunakan untuk menyambung logam dengan adanya media panas. Busur listrik, nyala oxy-acetylene, dan gesekan digunakan sebagai sumber panas. Pengelasan gesekan adalah prosedur pengelasan keadaan padat di mana panas dihasilkan oleh dua logam yang saling bergesekan, menyebabkan logam meleleh dan kemudian membeku bersama, membentuk sambungan las. Pengelasan fusi adalah jenis sambungan las yang paling umum saat ini. Keuntungan dari pengelasan ini adalah tidak memerlukan logam pengisi, cepat, dan suhu operasi di bawah titik leleh logam. Manfaat lain dari proses pengelasan ini adalah menghemat bahan dengan tidak memerlukan logam pengisi, fluks, atau gas pelindung, serta memiliki waktu pengelasan yang singkat. Penelitian ini membahas mengenai pengelasan gesek untuk mengetahui sifat mekanis pada pengelasan gesek logam AISI D2/ AISI 304. Metode yang digunakan dengan pengujian yaitu : uji tarik dan uji kekerasan (Vickers). Pada pengujian ini didapat nilai uji tarik paling tinggi terdapat pada specimen no 9 yaitu 352Mpa dengan parameter waktu gesek 70s, tekanan tempa 2,5 Mpa dan waktu tempa 35s. dan untuk hasil Uji kekerasan dengan nilai yang tinggi terdapat pada specimen no 9 area weld yaitu 649HV dengan parameter waktu gesek 70s, tekanan tempa 2,5 Mpa dan waktu tempa 35s.

**Kata kunci:** Pengelasan gesekan, Logam AISI D2/AISI 304, Uji tarik

### ABSTRACT

*Welding techniques have been used extensively in joining metal to hot media. The heat source used comes from an electric arc, an oxy-acetylene flame and friction. Friction welding is a method of solid state welding, where the heat generated by two metals rubbing together so that the metal melts and then solidifies together into a weld joint. Welding joints that are most widely used today is fusion welding. The advantages of this welding are that it does not require a charger, the welding time is fast and the operating temperature is below the melting point of the metal. Other advantages of this welding technique are material preservation because it does not require a charger, flux and gas shield, short welding time and operating temperature below the melting point of the metal. This study discusses friction welding to see the mechanical of AISI D2 / AISI 304 metal friction welding. The methods used are: , tensile test and hardness test (Vickers). In this test, the highest tensile test value was found in specimen No. 9, namely 352Mpa with the parameters of friction time of 70s, forging pressure of 2.5 Mpa and forging time of 35s. and for the results of the hardness test with a high value found in specimen No. 9 the weld area is 649HV with a friction time parameter of 70s, forging pressure of 2.5 Mpa and forging time of 35s.*

**Keywords:** Friction Welding, Metal AISI D2 / AISI 304

## PENDAHULUAN

Baja tahan karat austenitik AISI 304 adalah baja tahan karat tipe 300. Kandungan karbon dari 304 stainless steel lebih tinggi dari 304 [1]. 304 stainless steel adalah baja anti karat yang memiliki harga mahal. Baja tahan karat austenitik AISI 304 memiliki ketahanan korosi yang baik [2], sifat mekanik komprehensif yang sangat baik dan kemampuan las yang baik. Oleh karena itu, 304 stainless steel memiliki berbagai aplikasi di banyak fields, termasuk industri kimia, minyak bumi, laut, makanan, dan pencahayaan. Untuk menggunakan bahan ini secara luas dan andal, sangat mendesak dan perlu untuk meningkatkan kekerasan permukaan, meningkatkan ketahanan abrasi dan mengkompensasi ketahanan korosi. Keausan, korosi dan kegagalan lainnya terutama terjadi pada permukaan bahan, pada Baja AISI 304 harga relative mahal, akan tetapi ada pula lebih mahal dari AISI 307 yaitu Baja AISI D2 adalah grade yang umum digunakan untuk perkakas deep drawing [3]. Karena kandungan karbon dan kromiumnya yang tinggi, pengendapan karbida M7C3 dan M23C6 dalam matriks martensit yang keras dapat dicapai dengan perlakuan panas. Oleh karena itu, alat deep drawing memberikan ketahanan yang tinggi terhadap keausan abrasif dan perekat dalam operasi pembentukan konvensional. Sehingga untuk memanfaatkan kekerasan untuk tool yang relative murah maka perlu adanya penyambungan atau pengelasan.

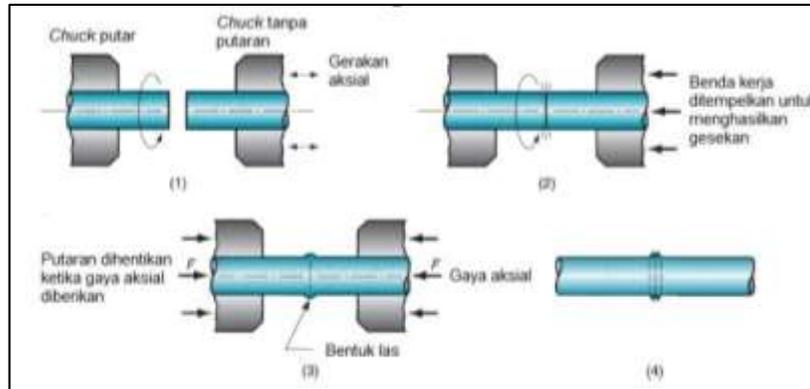
Pengelasan adalah proses menyambungkan logam sejenis atau berbeda dari ukuran dan bentuk yang berbeda [4]. Proses pengelasan dapat diklasifikasikan menjadi: Resistance Welding, Thermal Welding, High Energy Beam Welding dan Electric Arc Welding [5], SMAW [6][4][9][10]. Teknologi pengelasan sangat lah luas pengelasan bisa juga dengan pengelasan mekanik yaitu *Friction Stir Welding* (FSW), *Friction Welding* (FW) [9][11] [12] dan *Friction Linier Welding* (FLW) [12]. Pengelasan *Friction Welding* penyambungan dengan cara mekanik dengan gesekan dengan cara matrial di putar [13]. Pengelasan gesekan memberikan beberapa keunggulan dibandingkan teknik pengelasan lainnya, termasuk tidak adanya fluks/membran las, bahan pengisi/elektroda, atau gas dalam proses pengelasan, tidak adanya percikan api atau asap las, dan tidak adanya pencairan, yang mencegah cacat pematatan. (misalnya, porositas gas, segregasi, atau inklusi terak) dapat digunakan untuk menggabungkan dua logam yang berbeda untuk menghemat uang pada bahan baku dalam aplikasi pengelasan [9]. Pengelasan gesekan, meskipun banyak manfaatnya, memiliki sejumlah kelemahan, termasuk ketidakmampuan untuk menempel secara efisien pada bahan atau komponen berbentuk persegi atau persegi [14]. Yang mempengaruhi parameter dalam kecepatan gesek, tekanan gesek, waktu gesek [15].

Pada penelitian ini akan yang belum banyak di bahas dalam artikel sebelumnya yaitu las gesek yang menggunakan bahan baja keras antara AISI D2 dan AISI 304 yang di mana untuk memenuhi kriteria matrial yang diinginkan.

### Las Gesek (*Friction Welding*)

Pengelasan gesekan adalah jenis pengelasan yang memanfaatkan panas yang dihasilkan oleh gesekan [16]. Sebuah gaya tekan membawa permukaan dua bahan yang akan dihubungkan, satu berputar dan lainnya diam, ke dalam kontak. Gesekan antara dua permukaan kontak dipertahankan tanpa batas, menghasilkan peningkatan panas yang diciptakan oleh gesekan terus menerus. Proses pengelasan terjadi ketika gaya tekan dan panas diterapkan pada kedua sisi sampai pertemuan kedua bahan melebihi titik leleh.

Kecepatan putar adalah variabel sensitif dalam proses pengelasan gesekan, dan dapat diubah dalam situasi ini jika durasi pemanasan, suhu, dan tekanan diatur dengan benar. Tekanan gesek ( $P_f$ ), waktu gesek ( $t_f$ ), tekanan tempa ( $P_u$ ), waktu tempa ( $t_u$ ), dan kecepatan putar merupakan elemen penting dalam proses pengelasan gesek ( $s$ ). Deformasi plastis terjadi selama prosedur penyambungan. Tekanan tempa menyebabkan deformasi plastis, dan panas yang tinggi selama proses pengelasan menyebabkan proses difusi. Produksi logam di mana baik ukuran maupun bentuk logam tidak dapat kembali ke keadaan semula dikenal sebagai deformasi plastis.



**Gambar 1.** Proses Pengelasan Gesek

### Baja AISI 304

Pembuatan lapisan oksida krom ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) memberikan ketahanan korosi pada baja tahan karat, yang merupakan baja paduan yang mengandung sekitar 12% Cr. Karena adanya logam yang ditambahkan ke paduan besi karbon seperti nikel, mangan, molibdenum, nitrogen, dan komponen lain yang secara dramatis mengubah kualitas material, baja tahan karat tahan terhadap korosi dan oksidasi. Baja tahan karat austenitik, martensit, feritik, dan dupleks diklasifikasikan menurut konsentrasi Cr-Ni% (2).

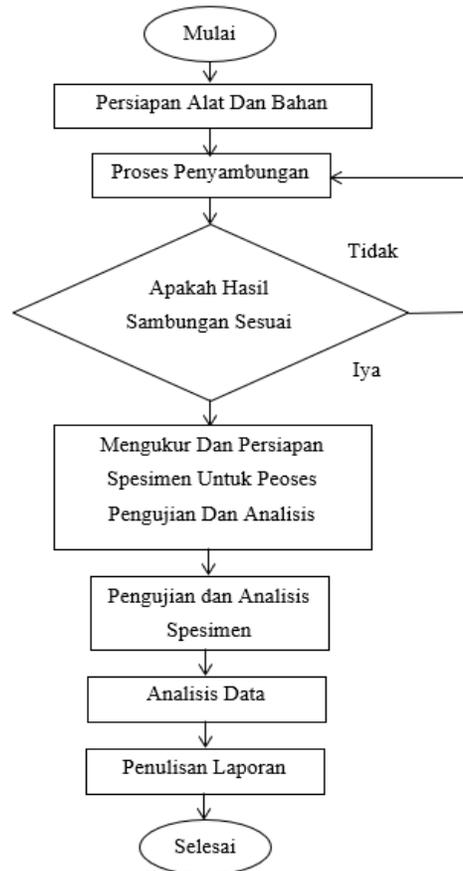
AISI 304 adalah baja tahan karat austenitik dengan karakteristik non-magnetik yang dapat dikeraskan melalui pengerjaan dingin tetapi tidak dengan perlakuan panas. Baja tahan karat dapat dibentuk ketika telah dianil. Baja tahan karat yang paling umum adalah Tipe 304, yang memiliki 18% Cr dan 8% Ni. Kimia, petrokimia, pengolahan makanan dan minuman, farmasi, kriogenik, dan penukar panas adalah beberapa industri yang menggunakan AISI 304.

### Baja AISI D2

Ini adalah baja paling lunak yang tersedia. Baja tahan karat dapat ditempa (Sean McWilliams menempa stainless), tetapi sangat sulit untuk dikerjakan. Baja karbon juga dapat sedikit ditempa untuk ketajaman yang tahan lama dan bilah belakang yang tahan lama.

Baja tahan karat, di sisi lain, tidak dapat diperlakukan dengan cara ini. Sampai batas tertentu, baja karbon akan menimbulkan korosi lebih cepat daripada baja tahan karat. Baja karbon mungkin juga sedikit kurang menarik daripada baja tahan karat. 10xx adalah baja karbon dalam sistem nomenklatur AISI, sedangkan baja lainnya adalah baja paduan. Seri 50xx, misalnya, adalah baja kromium. Baja dengan huruf (misalnya W-2, A-2) adalah baja perkakas menurut sistem penamaan SAE. Ada juga sistem klasifikasi ASM, tetapi jarang digunakan dalam pembicaraan tentang baja perkakas potong. Dalam beberapa kasus, digit terakhir nama baja cukup dekat dengan persentase karbon baja. Hasilnya, 1095 mengandung 95 persen. 52100 memiliki kandungan karbon 1,0 persen. 5160 memiliki kandungan karbon sebesar 0,60 persen.

## METODE PENELITIAN



Gambar 2. Diagram Alir

### Pengujian Hasil Pengelasan

Ada banyak cara untuk menguji hasil pengelasan, termasuk uji tarik, uji mikro, dan uji kekerasan [17]:

#### 1. Uji Tarik

Pengujian tarik destruktif dan non-destruktif dapat digunakan untuk menentukan kekuatan dan kesalahan yang mungkin ada pada sambungan logam yang dilas. Pengujian mekanis untuk mengukur kekuatan sambungan logam yang dilas, yang salah satunya dapat dilakukan dengan uji tarik standar, dapat digunakan untuk pengujian destruktif. Sifat logam induk, daerah HAZ, kualitas logam las, dan geometri serta distribusi tegangan pada sambungan semuanya berdampak pada kekuatan tarik sambungan las.

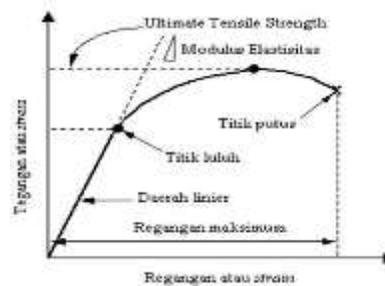
Pengujian tarik memerlukan penggunaan batang tarik. Spesimen yang akan diuji dikerjakan dengan mesin menjadi batang tarik dengan diameter standar. Uji tarik adalah salah satu dari banyak pengujian yang dilakukan secara rutin untuk mengukur sifat mekanik suatu material. Uji tarik dilakukan dengan mengikat kedua ujung benda uji tarik ke rangka beban uji tarik dalam bentuk yang paling dasar. Mesin uji tarik (Universal Testing Machine) memberikan gaya tarik pada benda uji tarik sehingga menyebabkan benda uji memanjang hingga putus.

Dalam pengujian, benda uji dibebani secara bertahap sampai putus, pada titik mana karakteristik tarik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Tegangan: } \sigma = \frac{F}{A_0} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana : F = beban (kgf)  
A<sub>0</sub> = luas mula dari penampang batang uji (mm<sup>2</sup>)

Regangan :  $\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100\%$  .....(2)  
 Dimana :  $L_0$  = panjang mula dari batang uji ( $mm^2$ )  
 $L$  = panjang batang uji yang dibebani ( $mm^2$ )



**Gambar 3.** Kurva Tegang-Regangan

2. Pengujian Kekerasan

Kekerasan material adalah ketahanannya terhadap penetrasi transien. Angka ini adalah ukuran tegangan aliran untuk insinyur desain, ketahanan terhadap keausan untuk insinyur pelumasan, ketahanan gores untuk insinyur mineralogi, dan ketahanan yang lebih tinggi terhadap pemotongan dengan alat potong untuk mekanik bengkel. Meskipun pengertian ini dapat dikaitkan dengan satu mekanisme, yaitu tegangan aliran plastis dari material yang dievaluasi, ada berbagai konsep kekerasan material yang dipahami oleh organisasi ilmiah..

Kekerasan suatu benda atau bahan dapat didefinisikan sebagai kekuatan suatu bahan ketika mendapat tekanan dari bahan yang lebih keras, berdasarkan uraian sebelumnya. Berdasarkan deskripsi uji kekerasan.

$$VHN = \frac{2P \sin(\frac{\phi}{2})}{d^2} = \frac{1,854 P}{d^2} = (kg/mm^2) \dots\dots\dots(3)$$

P = beban panjang digunakan N (kg)  
 D = panjang diagonal peninjakan penetrator (mm)  
 $\phi$  = sudut antara permukaan intan (Vickers) =  $136^\circ$

Angka kekerasan Vickers dihitung dengan membagi beban dengan luas permukaan lekukan. Daerah ini diperkirakan dalam praktik menggunakan pengukuran kecil dari panjang diagonal Trace. Karena logam mengalami deformasi dengan proporsi tertentu selama indentasi, nilai kekerasan dihubungkan dengan hasil atau kekuatan tarik logam. Ketika mengevaluasi suatu bahan, operator biasanya memilih beban indenter dari kisaran (50, 100, 200, 300, 400, 500) yang sesuai untuk zat yang sedang diuji. Kesalahan dalam pemilihan beban akan mempengaruhi akurasi data dan dapat menyebabkan salah tafsir terhadap atribut material benda uji.

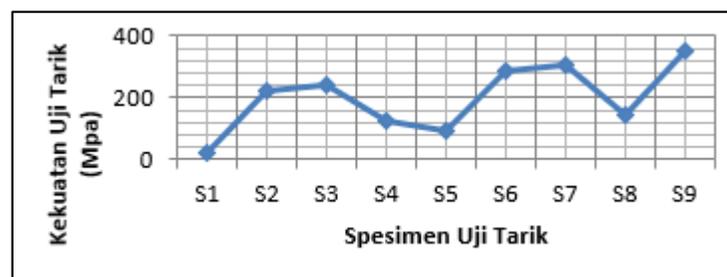
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil AISI 304 dengan AISI D2, di buat dengan jumlah 9 spesimen dan masing-masing spesimen akan dilakukan uji tarik dan uji kekerasan (*Vickers*), di bawah ini adalah 9 spesimen yang sudah dilakukan las gesek.

**Tabel 1.** Nilai Hasil Uji Tarik

Kode sampel	Waktu gesek (s)	Tekanan tempa (MPa)	Waktu tempa (s)	Luas area (mm <sup>2</sup> )	Kuat tarik (MPa)
S1	60	2,1	30	50,89	25
S2	60	2,3	35	51,54	221
S3	60	2,5	40	62,07	241
S4	65	2,2	35	60,67	127
S5	65	2,3	40	49,51	92
S6	65	2,5	30	56,29	286
S7	70	2,1	40	54,0	306
S8	70	2,3	30	63,54	145
S9	70	2,5	35	57,70	352

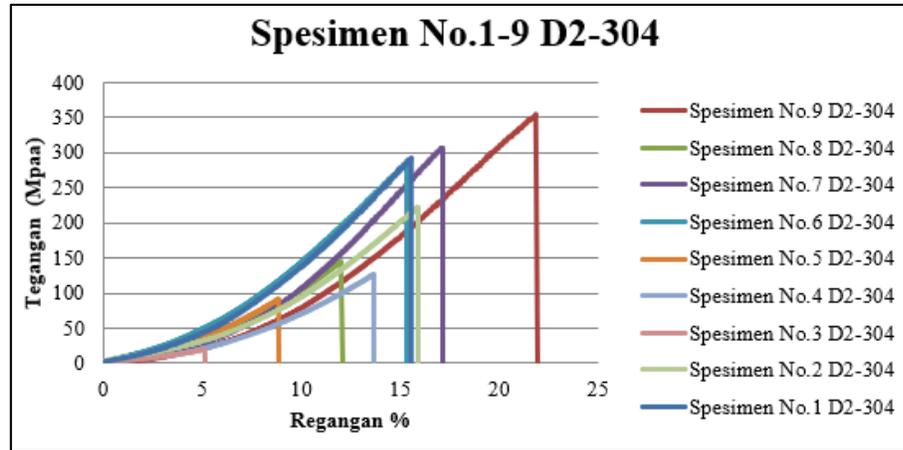
Berdasarkan tabel 1 di atas bahwa nilai kekuatan tarik yang paling besar adalah pada sampel 9 yaitu sebesar 35,2 Kg mm<sup>2</sup> atau 352 Mpa dengan luas area 57,70 mm<sup>2</sup> sedangkan nilai kekuatan tarik yang paling rendah terdapat pada sampel 1 yaitu sebesar 2,5 Kg mm<sup>2</sup>/ 25 MPa dengan luas area 50,89 mm<sup>2</sup>, hal ini terjadi karna waktu gesek yang semakin lama mengakibatkan nilai kekuatan tarik semakin tinggi begitu juga pengaruh tekanan tempa yang semakin besar maka nilai kekuatan tariknya akan semakin tinggi, maka di peroleh grafik tabel di atas sebagai berikut.



**Gambar 4.** Kekuatan Uji Tarik *Friction Welding*

### Analisis Hasil Pengelasan

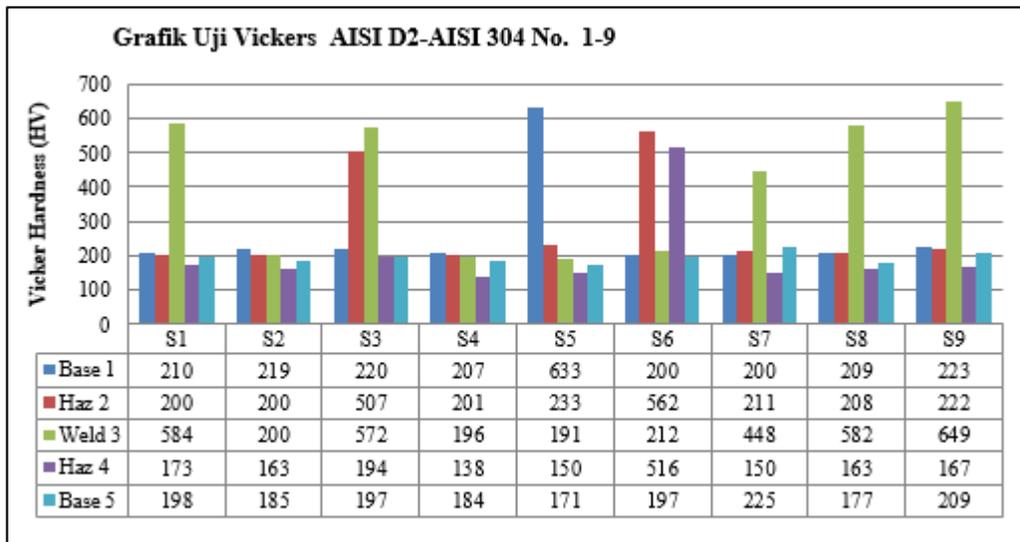
Setelah melakukan proses pengelasan *friction welding* selesai dengan paramater pada tabel 1 kemudian dilakukan proses *quenching* dan *normalizing*. Pada proses *quenching* dilakukan empat variasi pendingin yaitu menggunakan oli, air garam, dan air. Sedangkan pada proses *normalizing* digunakan udara sebagai media fluida yang digunakan. Hasil sambungan *friction welding* untuk sample uji kekerasan dan uji tarik tersaji pada gambar 5.



**Gambar 5.** Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen No.1-9

Pada grafik kekuatan tarik di atas terlihat naik turunnya grafik yang signifikan dari nilai kekuatan tarik yang paling rendah pada sampel 1 hingga pada sampel 9. Berdasarkan hasil uji tarik, grafik dan peraktek pengelasan maka penulis menganalisis bahwa kekuatan tarik yang paling tinggi terjadi pada sampel 9 di sebabkan oleh :

- Parameter tekanan tempa yang tinggi sehingga struktur kristal pada daerah weld lebih padat
- Jika di dibandingkan dengan kekuatan tarik logam AISI 304 itu sendiri maka kekuatan tarik AISI 304 masih lebih besar di dibandingkan hasil kekuatan tarik lasan itu sendiri maka diperlukan tekanan tempa yang lebih tinggi jika ingin menyeterakanya
- Memiliki waktu gesek lebih lama di dibandingkan dengan sampel lain maka pengaruhnya adalah semakin lama waktu gesek maka akan semakin tinggi nilai kekuatan tariknya



**Gambar 6.** Grafik Uji Vickers AISI D2-AISI 304

Berdasarkan hasil uji kekerasan *vickers* dan praktek ketika pengelasan, kekerasan pada daerah Base, Haz dan Weld di atas maka penulis menganalisis bahwa kekerasan yang menghasilkan nilai tinggi, rata rata ada pada daerah weld atau daerah sambungan dan nilai hardness yang paling tinggi dari sampel 1 sampai dengan sampel 9 ada pada daerah weld sampel 1 dan pada daerah HAZ sampel 2 hal ini di sebabkan oleh :

- Sampel 9 Memiliki waktu gesek ,tekanan tempa dan waktu tempa yang paling kecil di dibandingkan sampel yang lain ,jadi pengaruhnya semakin kecil waktu gesek ,tekanan tempa dan waktu tempa maka akan semakin tinggi nilai kekerasanya.

- b. Pendinginan setelah pengelasan di lakukan secara alami (di biarkan saja) pendinginan pun berlangsung cepat hal ini akan menghasilkan struktur martensitik pada permukaan benda kerja dan struktur martensitik bersifat keras, sehingga di dapat permukaan sambungan las yang sangat keras
- c. Proses untuk tekanan tempa di lakukan secara perlahan-lahan dan parameternya juga kecil karena baja AISI D2 termasuk baja karbon tinggi yaitu 1,55 % (*high carbon steel*) yang memiliki pengantar panas yang sangat buruk sehingga harus di panaskan secara perlahan jika ingin menghasilkan nilai kekerasan yang tinggi.
- d. Di lakukanya pemanasan awal pada setiap sampel yang akan di las hingga mencapai suhu beberapa derajat di atas suhu plastis dan pendinginan di lakukan sekitar 30 derajat celsius setelah logam tersambung sehingga menghasilkan kekerasan yang tinggi.

## KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dari hasil uji tarik, uji kekerasan, dari hasil fiction welding bahan baja tahan karat AISI D2 dengan AISI 304 dapat di ambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil pengujian kekerasan pengelasan gesek antar logam AISI D2 dengan AISI 304 dengan variasi parameter yang berbeda dan putaran gesek 1600 rpm konstan bahwa di peroleh nilai kekerasan yang paling besar ada pada daerah weld 3 sampel 9 sebesar 649 HV dengan parameter waktu gesek 70s, tekanan tempa 2,5 Mpa dan waktu tempa 35s dan diperoleh nilai kekerasan yang paling rendah pada daerah HAZ 4 sampel 4 sebesar 138 HV di simpulkan juga bahwa nilai kekerasan pada AISI D2 lebih besar dari AISI 304, karena di lihat pada daerah HAZ 2 material AISI D2 paling rendah 199 HV dan paling tinggi 562 HV sedangkan di HAZ 4 material AISI 304 paling rendah 138 HV dn paling tinggi 194 HV.
2. Berdasarkan hasil uji tarik pengelasan gesek antara AISI D2 dan AISI 304 dengan variasi parameter yang berbeda dan putaran gesek 1600 rpm konstan bahwa di peroleh nilai kekuatan tarik yang paling besar ada pada sampel 9 yaitu sebesar 35.2 Kg mm<sup>2</sup>/ 352 MPa dengan luas area 57.70 mm<sup>2</sup> dan patahan terdapat pada daerah wled (sambungan) sedangkan di lihat pada patahan specimen bisa di simpulkan matrial bersipat sangat getas sedangkan nilai kekuatan tarik yang paling rendah terdapat pada sampel 1 yaitu memiliki nilai sebesar 2.5 Kg mm<sup>2</sup>/ 25 Mpa dengan luas area 50.89 mm

## UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya penelitian ini maka peneliti mengucapkan terima kasih kepada pihak terkait terutama untuk Universitas Buana Perjuangan Karawang yang dimana telah memberi peluang ini

## REFERENSI

- [1] A. Abdullah, A. D. Shieddieque, Jatira, D. A. Rajab, and Sukarman, "Analisis Keretakan pada Sambungan Las antara Pipa ASTM A106 dengan Globe Valve," vol. 3, pp. 89–96, 2021.
- [2] R. Singh, D. Sachan, R. Verma, S. Goel, R. Jayaganthan, and A. Kumar, "Mechanical behavior of 304 Austenitic stainless steel processed by cryogenic rolling," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 16880–16886, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.04.090.
- [3] K. Singh, R. K. Khatirkar, and S. G. Sapate, "Microstructure evolution and abrasive wear behavior of D2 steel," *Wear*, vol. 328–329, pp. 206–216, 2015, doi: 10.1016/j.wear.2015.02.019.
- [4] A. A. Shukla, V. S. Joshi, A. Chel, and B. A. Shukla, "Analysis of Shielded metal arc welding parameter on Depth of Penetration on AISI 1020 plates using Response surface methodology," *Procedia Manuf.*, vol. 20, pp. 239–246, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.035.
- [5] Sukarman *et al.*, "Optimization of tensile-shear strength in the dissimilar joint of Zn-coated steel and low carbon steel," *Automot. Exp.*, vol. 3, no. 3, pp. 115–125, 2020, doi: 10.31603/ae.v3i3.4053.
- [6] Abdurahman, Sukarman, A. D. Shieddieque, Safri, D. Setiawan, and N. Rahdiana,

- “EVALUASI KEKUATAN UJI TARIK PADA PROSES PENGELASAN BUSUR LISTRIK BEDA MATERIAL SPHC DAN S30-C,” *Mech. Xplore*, vol. 1, no. 2, pp. 29–37, 2021.
- [7] R. Arabi Jeshvaghani, E. Harati, and M. Shamanian, “Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 3, pp. 1531–1536, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.10.006.
- [8] M. B. Karamiş and K. Yildizli, “Surface modification of nodular cast iron: A comparative study on graphite elimination,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 20, pp. 5225–5229, 2010, doi: 10.1016/j.msea.2010.04.067.
- [9] Y. Wei, J. Li, J. Xiong, and F. Zhang, “Investigation of interdiffusion and intermetallic compounds in Al–Cu joint produced by continuous drive friction welding,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 1, pp. 90–95, 2016, doi: 10.1016/j.jestch.2015.05.009.
- [10] J. You *et al.*, “Microstructural evolution and mechanical properties of the Al–Cu dissimilar joint enhanced by stationary-dynamic shoulder friction stir welding,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 300, no. June 2021, p. 117402, 2022, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117402.
- [11] Y. Hangai *et al.*, “Friction welding of porous aluminum and polycarbonate plate,” *Mater. Lett.*, vol. 304, no. August, p. 130610, 2021, doi: 10.1016/j.matlet.2021.130610.
- [12] X. Wang, W. Li, T. Ma, X. Yang, A. Vairis, and J. Tao, “Microstructural heredity and its effect on mechanical properties of linear friction welded Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy joints,” *Mater. Charact.*, vol. 168, no. April, p. 110540, 2020, doi: 10.1016/j.matchar.2020.110540.
- [13] W. Yin, H. Lu, Y. Zheng, and Y. Tian, “Tribological properties of the rotary friction welding of wood,” *Tribol. Int.*, vol. 167, no. September 2021, p. 107396, 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107396.
- [14] H. D. Vyas, K. P. Mehta, V. Badheka, and B. Doshi, “Microstructure evolution and mechanical properties of continuous drive friction welded dissimilar copper-stainless steel pipe joints,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 832, no. December 2021, p. 142444, 2022, doi: 10.1016/j.msea.2021.142444.
- [15] M. Kimura, Y. Sano, M. Kusaka, and K. Kaizu, “Methods for improving joint strength of friction stud welded AA5083 alloy joints,” *J. Adv. Join. Process.*, vol. 5, p. 100075, 2022, doi: 10.1016/j.jajp.2021.100075.
- [16] L. Raimondi, C. J. Bennett, A. Gameros, and D. Axinte, “Signal-based analysis of the dynamic behaviour of the system in inertia friction welding and its impact on part contact evolution,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 161, no. May, p. 107985, 2021, doi: 10.1016/j.ymsp.2021.107985.
- [17] Sukarman, A. Abdullah, A. D. Shieddieque, N. Rahdiana, and Khoirudin, “Optimization of the Resistance Spot Welding Process of Galvanized Steel Sheet Using the Taguchi Method,” *Sinergi*, vol. 39, no. 2, pp. 1171–1176, 2014, doi: 10.1007/s13369-013-0634-x.