

Pengaruh *Quenching* Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baut *Connecting Rod* Bekas Untuk Alat Gesek FSW

Wahyu Ari Putranto^{1*}, Khaeroman², Susanto³, Deri Herdawan⁴, Noviarianto⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Jurusan Teknik, Politeknik Maritim Negeri Indonesia

^{1, 2, 3, 4, 5}Jln. Pawiyatan Luhur I/1 Bendan Duwur, Semarang 50233, Indonesia

E-mail: wahyu_ap@polimarin.ac.id¹, khoer@polimarin.ac.id², susanto@polimarin.ac.id³, deriherdawan@polimarin.ac.id⁴, novi@polimarin.ac.id⁵

Info Naskah:

Naskah masuk: 21 November 2024

Direvisi: 27 Desember 2024

Diterima: 11 Januari 2024

Abstrak

Salah satu metode penyambungan logam lunak seperti aluminium yang banyak digunakan adalah *Friction Stir Welding* (FSW). Alat gesek merupakan bagian yang sangat penting dalam FSW. Alat gesek biasanya terbuat dari baja H13 yang dikeraskan. Tujuan penelitian ini adalah membuat alat gesek dari material baja baut *connecting rod* bekas yang berasal dari *marine diesel engine*. Metode yang digunakan eksperimental mencakup desain alat FSW, perlakuan panas material pada suhu 900°C dilanjutkan proses *quenching* dengan media pendingin air dan air garam, kemudian dilanjutkan dengan pengujian material (uji komposisi kimia, uji kekerasan dan uji mikrofografi). Hasil pengujian yang diperoleh dari uji komposisi kimia menunjukkan baut *connecting rod* bekas termasuk jenis material baja AISI 4145. Nilai kekerasan terbesar diperoleh dari baja *connecting rod* pada proses *quenching* air garam sebesar 52,67 HRC dengan fasa martensit yang dilihat dari uji mikrofografi. Baja baut *connecting rod* bekas dari *marine diesel engine* bisa digunakan sebagai material alat gesek FSW.

Keywords:

FSW tools;
connecting rod bolt;
mechanical properties.

Abstract

One method of joining soft metals such as aluminum that is widely used is Friction Stir Welding (FSW). The friction tool is a very important part of FSW. Friction tools are usually made from hardened H13 steel. This research aims to make a friction tool from steel connecting rod bolts used in marine diesel engines. The experimental methods used include FSW tool design, heat treatment of the material at a temperature of 900oC followed by a quenching process with water and salt water cooling media, then continued with material testing (chemical composition test, hardness test, and micrographic test). The test results obtained from the chemical composition test show that the connecting rod bolts include AISI 4145 steel material. The highest hardness value obtained from the connecting rod steel in the saltwater quenching process was 52.67 HRC with a martensite phase, as seen from the micrographic test. Used steel connecting rod bolts from marine diesel engines can be used as FSW friction tool material.

*Penulis korespondensi:

Wahyu Ari Putranto

E-mail: wahyu_ap@polimarin.ac.id

1. Pendahuluan

Penyambungan dengan las busur saat digunakan untuk menyambung material logam lunak seperti aluminium menimbulkan banyak permasalahan. Permasalahan umum pengelasan las busur adalah terdapat retak saat proses peleburan dan pemadatan. Masalah lain yang timbul adalah terdapatnya rongga porositas, serta hilangnya elemen paduan yang mudah menguap. Penyambungan material lunak dapat dilakukan menggunakan pengelasan aduk gesekan yang disebut dengan *Friction Stir Welding (FSW)* untuk meminimalkan masalah tersebut. Proses penyambungan material terjadi karena gesekan dari alat berbentuk silinder dengan ujung berupa pin silinder berulir yang berputar [1]. Gesekan mekanis dan putaran dari pin berulir akan memanaskan benda kerja, sehingga menggerakkan paduan yang dilunakkan di sekitarnya untuk membentuk sambungan [2]. Alat pengaduk gesekan merupakan komponen yang sangat penting pada pekerjaan sambungan FSW.

Pada proses penyambungan menggunakan FSW memerlukan alat gesek yang kuat, handal, tahan panas, sehingga tidak mudah mengalami kerusakan. Panas yang diperlukan pada FSW material aluminium sekitar 70 – 90% dari titik leburnya sekitar 660 °C [3]. Pemilihan material dasar untuk membuat alat gesek FSW juga harus menjadi pertimbangan pada saat perencanaan. Proses pembuatan alat gesek memerlukan pekerjaan pembubutan, sehingga material dasar perlu dipilih dari bahan yang mudah dibuat dan murah harganya secara ekonomi. *Steel H13* dan *SKD61* dapat menjadi pilihan material yang mudah difabrikasi [4]. Alat gesek FSW sebagai komponen penting dalam proses penyambungan harus dibuat dengan memenuhi berbagai kriteria dengan dimensi menyesuaikan dengan material yang akan disambungkan. Selama proses pengelasan berlangsung alat gesek tersebut akan menahan beban yang berat seperti puntir, gesekan dan suhu yang sangat tinggi. Kekuatan alat dalam menahan beban selama pengelasan sangat dan model pin alat gesek sangat mempengaruhi hasil sambungan. Selain kualitas hasil sambungan, keausan alat gesek dan deformasi plastis adalah dua masalah utama yang dihadapi selama proses FSW.

Keausan alat gesek disebabkan oleh kerusakan mekanis atau afinitas kimiawi dari pahat dan benda kerja [5]. Deformasi plastis dikaitkan dengan variasi tegangan, laju regangan, dan suhu selama proses FSW juga dapat menjadi faktor penyebab kerusakan. Alat gesek sebagai komponen penting dapat juga diprediksi usia pakainya. Studi secara numerik dilakukan menggunakan *ANSYS transient* struktural analisis untuk menghitung usia alat gesek dengan derivasi matematis [6]. Prediksi usia alat gesek juga dapat dilakukan secara eksperimen. Pengaturan eksperimen dan prosedur eksperimen untuk memonitor kondisi alat FSW. Seluruh eksperimen dilakukan dengan mesin las *friction stir welding* yang sehat dan bertekanan penuh dan otomatis secara hidrolik. Pemantauan kondisi alat las sangat penting untuk proses *inline*, identifikasi, dan menghindari cacat awal benda kerja dan kerusakan alat gesek. Pemantauan kondisi alat FSW merupakan teknik pemeliharaan prediktif yang canggih dan baru, di mana data getaran waktu nyata dikumpulkan dari mesin FSW dalam kondisi operasi yang berbeda menggunakan sensor akselerometer [7]. Keandalan alat

gesek dan variasi model pin menjadi penentu hasil sambungan.

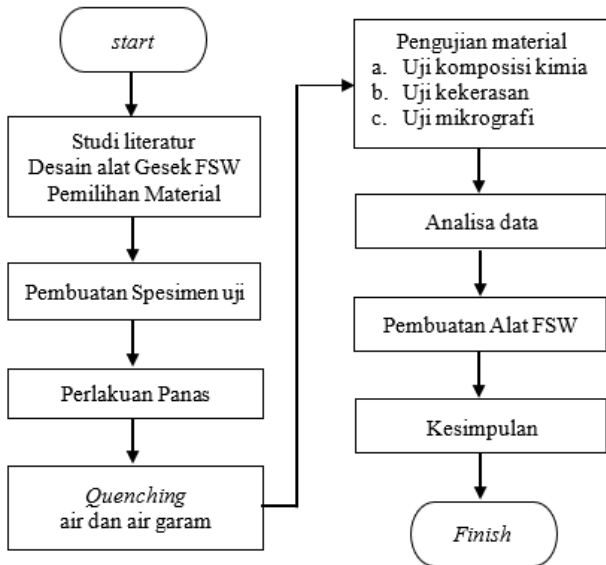
Studi pengelasan aluminium 6061 tebal 6 mm dilakukan dengan metode FSW dengan alat gesek berbahan dasar *steel H13* dengan variasi diameter pin 6 mm, 8 mm, 10 mm ulir kiri 1 mm [8]. Hasil studi didapatkan diameter pin 6 mm memberikan dampak sifat mekanik terbaik dengan kuat tarik 144 MPa. Model ujung alat gesek juga memiliki peranan penting untuk mendapatkan hasil sambungan yang baik. Penelitian pada pembuatan alat gesek FSW dengan berbagai bentuk pin segitiga, silinder dan kerucut berulir menunjukkan bahwa nilai kekerasan meningkat dan kekuatan tarik menurun untuk pin berulir segitiga [9]. Ujung alat gesek dimodelkan dengan model silinder beralur, segitiga beralur dan pin tirus beralur untuk aplikasi penyambungan aluminium 5083 [10]. Hasil studi didapatkan bahwa sifat mekanik dan struktur mikro yang lebih baik saat menggunakan alat gesek dengan pin tirus beralur. Studi terkait optimalisasi alat gesek untuk meningkatkan hasil dan mencegah kerusakan juga banyak dilakukan. Penerapan metode taguchi dengan parameter offset alat, profil pin alat, dan sudut kemiringan alat diperhitungkan saat pekerjaan eksperimental [11]. Pendekatan variasi parameter dapat dilakukan dengan memberikan perubahan putaran antara 600 – 1200 RPM. Hasil studi memperoleh terjadinya sambungan yang tidak terikat menjadi berkurang dampak aliran material dari penambahan putaran [12].

Uraian dari beberapa studi terdahulu yang telah dibahas menunjukkan bahwa hasil pengelasan FSW dipengaruhi banyak faktor. Profil alat gesek yang meliputi bentuk dan dimensi pin, optimalisasi parameter dengan berbagai variasi sudah dilakukan dalam berbagai eksperimen. Studi ini dilakukan dengan tujuan menghasilkan alat untuk melakukan penyambungan pada material aluminium 5083 menggunakan metode FSW. Studi dilakukan secara eksperimen yang mencakup desain, pembuatan, perlakuan panas, dan pengujian material alat FSW. Kebaruan dari studi ini adalah memanfaatkan baut *connecting rod* bekas dari *marine diesel engine*. Pemilihan baut *connecting rod* bekas dijadikan material dasar karena secara sifat mekanik sudah memiliki kekuatan dan keuletan yang baik. Secara ekonomi memiliki keuntungan tanpa harus mengeluarkan biaya tambahan pembelian material. Material dasar baut bekas tersebut dibuat menjadi alat gesek FSW sesuai dengan model bentuk dan dimensi yang direncanakan. Alat gesek yang dibuat selanjutnya diberikan perlakuan panas dan diuji untuk mengetahui sifat mekanik dan struktur mikro sehingga layak digunakan.

2. Metode

Penelitian dilakukan beberapa tahap untuk membuat dan menghasilkan alat gesek. Alat gesek tersebut akan digunakan untuk melakukan penyambungan logam lunak. Metode *Friction Stir Welding (FSW)* dipilih karena material yang akan disambungkan tergolong lunak. Studi dilakukan secara eksperimen yang mencakup desain alat gesek, pembuatan alat gesek, perlakuan panas, dan pengujian material alat gesek untuk FSW. Tahap penelitian yang dilakukan disajikan pada diagram alir Gambar 1.

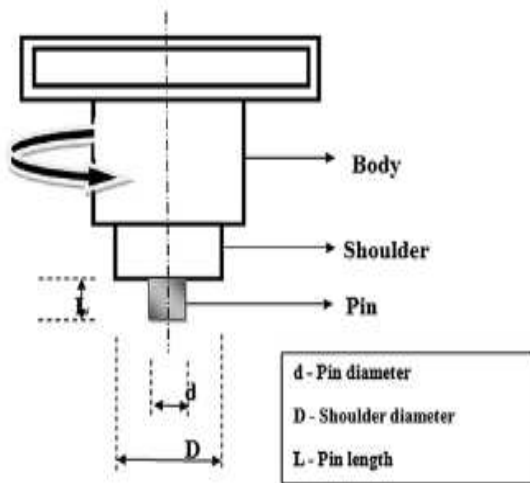
Berdasarkan Gambar 1 di bawah dijabarkan secara rinci tahapan yang ditentukan untuk membuat alat gesek FSW. Kritikal poin yang perlu menjadi perhatian dalam proses pembuatan alat gesek antara lain; desain alat gesek FSW, material dasar alat gesek FSW, proses perlakuan panas, pengujian material alat, dan analisa hasil pengujian. Secara terperinci tahap-tahap tersebut diuraikan sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.1 Desain dan Dimensi Alat Gesek

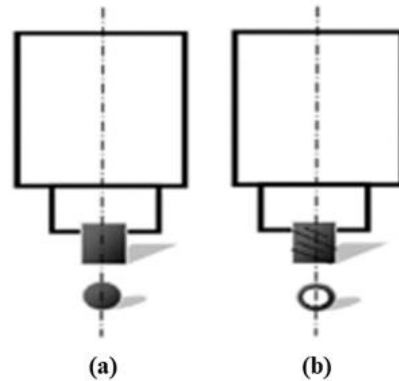
Hasil Pengelasan dengan metode FSW sangat ditentukan oleh desain dari alat gesek yang dibuat. Secara umum alat gesek FSW terdiri dari tiga bagian, *body*, *shoulder*, dan pin. Representasi desain alat gesek yang dibuat disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Alat gesek FSW [13]

Bagian alat gesek yang paling vital adalah pada bagian pin. Pada bagian pin akan bersinggungan dan bergesekan dengan benda kerja yang akan disambungkan. Saat proses pengelasan berlangsung pin akan berputar sehingga akan menimbulkan panas yang dapat meleburkan benda kerja pada titik lelehnya. Perputaran pin sekaligus akan

memberikan dorongan pada material benda kerja yang meleleh sehingga menjadi kampuh sambungan. Terdapat berbagai jenis bentuk pin yang dapat dibuat untuk menghasilkan hasil sambungan terbaik. Studi dilakukan membuat 2 bentuk pin yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain bentuk pin alat gesek FSW, (a). Silinder, (b). Silinder berulir [13]

2.2 Material Dasar

Material dasar merupakan bahan mentah yang diperlukan untuk membuat alat gesek yang akan dibuat. Baut *connecting rod* bekas dari *marine diesel engine* dimanfaatkan sebagai material material dasar pembuatan alat gesek FSW. Material ini dipilih karena nilai komposisi kimianya mendekati nilai dari baja H13. Material dasar baut bekas yang digunakan disajikan pada Gambar 4.

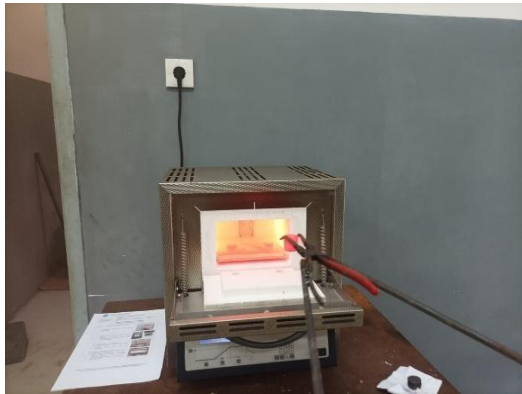


Gambar 4. Material Dasar, (a). Baut *Connecting Rod*, (b). Potongan Baut untuk spesimen uji

Pada Gambar 4 disajikan material baut *connecting rod* utuh (a) dan baut yang sudah dipotong (b) yang digunakan untuk spesimen uji komposisi kimia, uji kekerasan dan uji mikrofografi. Desain alat gesek dan dimensi yang telah direncanakan selanjutnya dibuat dengan proses pembubutan dan proses *quenching*.

2.3 Perlakuan Panas

Proses *heat treatment* perlu dilakukan agar alat gesek tersebut mengalami peningkatan kekerasan. Perlakuan panas dimulai dari pemanasan material yang ditunjukkan pada Gambar 6 di bawah ini. hingga temperatur 900 °C kemudian ditahan selama 1 jam.



Gambar 6 Proses Pemanasan Material

Pemanasan dilakukan di dalam tungku yang menggunakan energi listrik untuk menghasilkan sumber panas. Pemanasan material pada Gambar 6 di atas dilakukan hingga temperatur 900°C yang ditahan selama 1 jam. Setelah itu material dilakukan pendinginan kejut (*quenching*) dengan memasukkan material tersebut ke dalam wadah yang berisi air tawar dan air garam yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Proses Pendinginan Material, (a) Air Tawar, (b) Air Garam

2.4 Pengujian Material

Pengujian material dilakukan sebanyak 2 tahap. Tahap 1 pengujian dilakukan pada material dasar. Hal ini dilakukan untuk mengetahui sifat mekanis dan struktur mikro dari bawaan baut *connecting rod*. Pengujian tahap 2 dilakukan terhadap alat gesek FSW yang telah diberikan perlakuan panas. Pengujian yang dilakukan meliputi Uji kekerasan, uji mikrografi dan Uji komposisi kimia.

2.4.1 Uji Kekerasan

Kekerasan material perlu diketahui dengan melakukan pengujian menggunakan material lain yang lebih keras. Terdapat banyak metode pengujian, antara lain; *Brinell Hardness*, *Vickers Hardness*, *Rockwell Hardness*, *Rockwell Superficial Hardness*, *Knoop Hardness*, and *Scleroscope Hardness*[14]. Penelitian ini menggunakan metode *Rockwell* tipe C. Beban mayor adalah 150 kgf. Melalui *hardness test* dapat diketahui kekerasan relatif suatu material terhadap skala kekerasan yang dijadikan pembanding. Nilai kekerasan dapat diperoleh langsung dari pengujian dengan melihat nilai pada skala pengujian.

2.4.2 Uji Mikrografi

Hubungan antar struktur dengan sifat atau karakter suatu material perlu diketahui secara mendalam. Material teknik memiliki sifat-sifat dasar seperti tensile *strength*, *elongasi*, sifat termal, dan sifat kelistrikan sangat dipengaruhi oleh mikrostruktur yang menjadi penyusunnya [15]. Alat gesek dan ujung pin pada FSW akan menerima beban kerja yang cukup berat agar dapat meleburkan material yang disambung.

2.4.3 Uji Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk menganalisis dan mengidentifikasi komponen kimia, konsentrasinya dalam suatu material. Pengujian ini sangat penting untuk berbagai kepentingan industri. Terdapat banyak aspek kunci yang perlu diketahui dalam uji komposisi kimia, antara lain; Identifikasi komponen, kuantifikasi, Kontrol kualitas, Penelitian, dan penyelesaian persoalan [16]. Pada studi ini pengujian komposisi kimia menggunakan spektrometer yang ditunjukkan pada Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5 Pengujian Komposisi Kimia

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini diperoleh data-data dari pengujian komposisi kimia, pengujian kekerasan dan pengujian mikrografi dari material baut *connecting rod* bekas sebelum dan sesudah dilakukan proses *heat treatment* dilanjutkan proses *quenching* dengan media pendingin air tawar dan air garam. Berikut ini adalah hasil dari pengujian pada sampel.

3.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia apa saja yang terkandung pada material. Pengujian ini dilakukan pada spesimen material baja H13 (sebagai pembanding) dan baja baut *connecting rod* bekas. Data hasil pengujian komposisi kimia kedua spesimen tersebut dianalisis untuk dilihat data komposisi kimianya. Data komposisi kimia kedua material tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Pada tabel 1. Di bawah terlihat bahwa kandungan karbon pada kedua material tersebut hampir sama yaitu 0,34% dan 0,4% sehingga dapat dikategorikan ke dalam golongan baja karbon menengah. Selain unsur karbon ternyata terdapat unsur penambah/ paduan lainnya. Maka dari data di atas kedua material baja tersebut bisa digolongkan pada jenis baja paduan.

Tabel 1. Data hasil uji komposisi kimia baja H13 dan baja *connecting rod*

No.	Unsur kimia	Baja H13	Baut <i>connecting rod</i>
1	%C	0,40	0,34
2	%Mn	-	0,47
3	%Si	1,00	0,29
4	%Cr	5,30	1,88
5	%W	-	0,007
6	%Mo	1,4	0,36
7	%V	1,0	0,016
8	%Ni	-	1,82

Tabel 2. Hasil uji kekerasan

No.	Spesimen	Pengujian Kekerasan (HRC)			
		1	2	3	Rata-rata
1	BajaCR netral	45	44	44,5	44,5
2	BajaCR Air	52,5	52	52,5	52,33
3	BajaCR Air garam	52	54	52	52,67
4	Baja H13 netral	15	10	10	11,67
5	Baja H13 HT	50	51	53	51,33

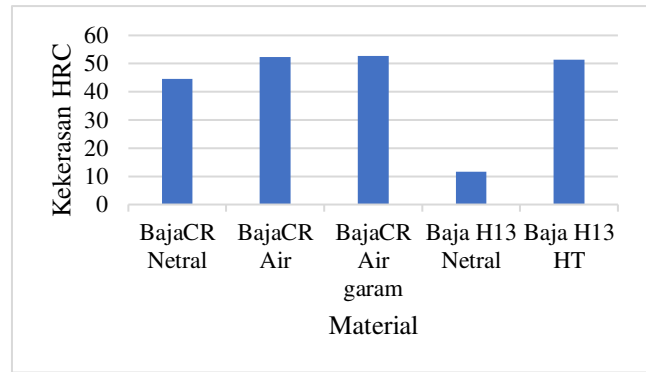
Pada baja AISI H13 terdapat molibdenum dan vanadium yang bertindak sebagai zat penguat. *Tool Steel* H13 memiliki *machinability* yang baik, kemampuan las yang baik, keuletan yang baik, dan dapat dibentuk dengan cara konvensional. Karena baja perkakas H13 kombinasi yang sangat baik antara ketangguhan tinggi dan ketahanan lelah, baja perkakas AISI H13 lebih banyak digunakan daripada baja perkakas lainnya dalam aplikasi perkakas [4].

Baja *connecting rod* bisa dikategorikan pada jenis baja AISI 4145 (Ni-Cr) yaitu penggabungan bahan nikel dan kromium. Nikel memiliki peran untuk meningkatkan kekuatan ferit sehingga meningkatkan kekuatan baja (ketangguhan dan kekerasan). Kromium memiliki pengaruh yang hampir sama dengan mangan yaitu meningkatkan ketangguhan, kemampuan untuk dikeraskan dan tahan terhadap temperatur tinggi. Salah satu pengaruh yang sangat signifikan dengan penambahan krom pada baja adalah meningkatkan ketahanan korosi [17].

3.2 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kemampuan suatu material terhadap suatu pembebanan ketika gaya tertentu diberikan pada suatu material uji. Pengujian kekerasan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode uji kekerasan *Rockwell* tipe C. Hasil pengujian menunjukkan material yang mengalami proses *quenching* memiliki nilai kekerasan lebih tinggi jika dibandingkan dengan material tanpa proses *quenching* (*raw material*). Hasil pengujian kekerasan material baja H13 dan baut *connecting rod* sebelum dan sesudah diberikan perlakuan panas dan proses *quenching* disajikan pada tabel 2. dan lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 8.

Hasil uji kekerasan dari tabel 2 terlihat bahwa nilai kekerasan bervariasi. Nilai kekerasan yang paling tinggi adalah pada baut *connecting rod quenching* dengan media pendingin air garam yaitu 52,67 HRC. Nilai kekerasan tersebut lebih tinggi dari pada variabel kontrolnya yaitu baja H13 *heat treatment* sebesar 51,33 HRC. Nilai hasil uji kekerasan berikutnya adalah 52,33 HRC pada baut *connecting rod quenching* dengan media pendingin air tawar. Hasil uji kekerasan baja H13 dan baut *connecting rod* sebelum diberi perlakuan panas adalah sebesar 11,67 dan 44,5 HRC.



Gambar 8. Hasil uji kekerasan baja *connecting rod* dan baja H13

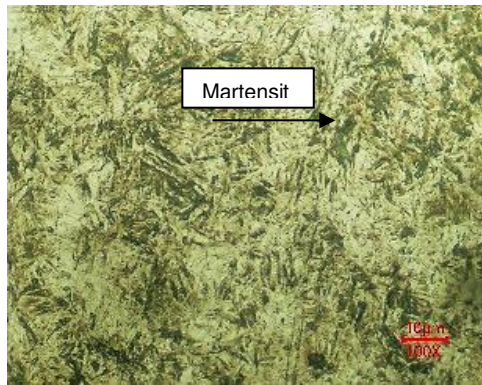
Nilai kekerasan baja mengalami peningkatan karena terdapat perubahan fasa dari fasa ferit-pearlit menjadi fasa martensit. Fasa martensit adalah fasa terkeras pada sebuah baja. Baja yang di *quenching* dengan air atau air garam dengan kandungan 2,5-25,0% struktur mikronya lebih dominan berupa martensit. Semakin tinggi kandungan garam maka struktur martensit yang terbentuk juga semakin halus [9].

3.3 Hasil Pengujian Mikrografi

Pengujian mikrografi dilakukan untuk mengetahui fasa dari material uji. Pengujian mikrografi sangat berkaitan dengan pengujian kekerasan karena nilai kekerasan suatu material berkaitan dengan fasa yang terbentuk pada material. Hasil pengujian mikrografi material baja H13 dan baut *connecting rod* sebelum dan sesudah diberikan perlakuan *heat treatment* pada proses *quenching* disajikan pada Gambar 9



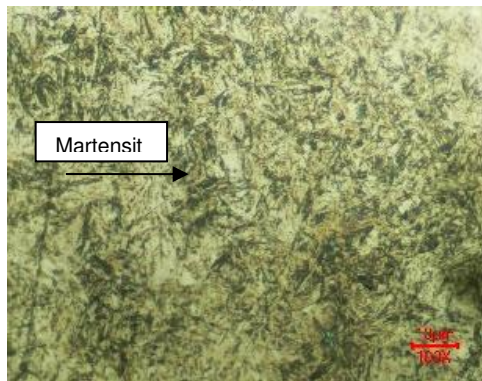
(a)



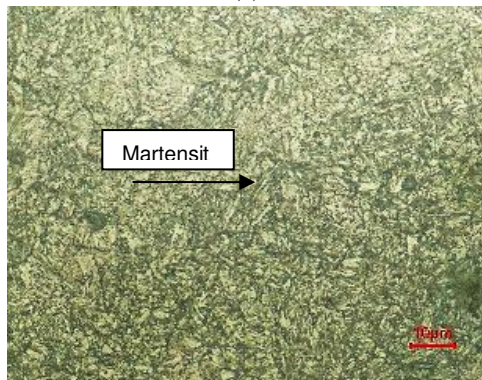
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 9. Struktur mikro material a). Baja H13 sebelum perlakuan, b). Baja baut *Connecting rod* sebelum perlakuan, c). Baja H13 *heat treatment* d). Baja baut *Connecting rod* *quench* air, e). Baja baut *Connecting rod* *quench* air garam

Hasil pengujian mikrografi pada gambar 9a. terlihat struktur mikro baja H13 sebelum diberi perlakuan panas adalah ferit-perlit (putih-hitam), sedangkan pada gambar 9b. terlihat struktur mikro baja baut *connecting rod* adalah martensit (seperti jarum). Hasil pengujian mikrografi pada gambar 9.c. terlihat struktur mikro baja H13 setelah diberi perlakuan panas adalah martensit, sedangkan pada gambar 9d dan 9e. terlihat struktur mikro baja baut *connecting rod* adalah juga martensit (seperti jarum).

Karakteristik struktur mikro terjadi perubahan bentuk struktur yang telah melalui proses *quenching* antara lain kehadiran struktur martensit yang mengubah kekerasan material ditandai dengan meningkatnya nilai kekerasan dari *raw material*. Oleh karena itu, dari hasil seluruh pengujian di atas menunjukkan bahwa variasi media pendingin pada proses *quenching* berpengaruh terhadap perubahan karakteristik struktur mikro pada bahan baut *connecting rod* bekas. Martensit adalah struktur mikro yang memiliki sifat keras, semakin banyak struktur martensitnya maka nilai kekerasannya semakin tinggi, dimana fasa martensit ini merupakan fasa keras metastabil, sesuai dengan apa yang dijelaskan ASM International (1991: 160-161) bahwa tujuan dari proses *quenching* adalah untuk membentuk fasa martensit [9].

3.4 Pembuatan Alat Gesek FSW

Pembuatan alat gesek FSW dilakukan berdasarkan data dari pengujian. Alat gesek FSW dibuat dengan cara dibubut kemudian diberi perlakuan panas 900°C dan didinginkan kejut dengan media pendingin air garam. Alat gesek FSW bisa dilihat pada gambar 10.



Gambar 10 Alat gesek FSW, (a) pin silinder, (b) pin silinder berulir

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang telah dibahas mengenai pembuatan *tool* FSW dari material baut *connecting rod* bekas dari *marine diesel engine*. Maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut bahwa komposisi kimia material baja baut *connecting rod* bekas memenuhi untuk dibuat menjadi *tool* FSW. Dari data yang diperoleh material tersebut termasuk golongan baja Paduan AISI 4145 (Ni-Cr). Kekerasan tertinggi terdapat pada data baut *connecting rod* bekas setelah proses *heat treatment* dan *quenching* menggunakan media air garam, dan air. Nilai kekerasannya adalah 52,67 HRC dan 52,33 HRC. Selain itu struktur mikro baut *connecting rod* bekas setelah proses *heat treatment* *quenching* dengan media air dan air garam adalah terbentuk

fasa martensit. Kemudian baut *connecting rod* bisa digunakan sebagai alat FSW setelah diberi perlakuan panas dan *quenching* dengan media air garam.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat (PPPMM) Politeknik Maritim Negeri Indonesia (Polimarin). yang telah membiayai penelitian ini dan seluruh anggota tim riset.

Daftar Pustaka

- [1] R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia, and T. DebRoy, "Review: Friction stir welding tools," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 16, no. 4, pp. 325–342, 2011, doi: 10.1179/1362171811Y.0000000023.
- [2] D. Kumar Rajak, D. D. Pagar, P. L. Menezes, and A. Eyvazian, "Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 24, pp. 2613–2637, 2020, doi: 10.1080/01694243.2020.1780716.
- [3] T. Tarmizi and O. B. Hutapea, "Desain dan Pembuatan Perkakas untuk Proses Friction Stir Welding pada Material Aluminium 5052," *J. Ris. Teknol. Ind.*, vol. 9, no. 2, pp. 107–119, 2016, doi: 10.26578/jrti.v9i2.1709.
- [4] P. Maji, R. Karmakar, R. Kanti Nath, and P. Paul, "An overview on friction stir welding/processing tools," *Mater. Today Proc.*, vol. 58, pp. 57–64, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.009.
- [5] S. R. Nathan, S. Malarvizhi, V. Balasubramanian, and A. G. Rao, "Failure analysis of tungsten based tool materials used in friction stir welding of high strength low alloy steels," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 66, pp. 88–98, 2016, doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.04.018.
- [6] H. Taraka, P. Pardeep, B. Pankaj, D. Anilkumar, B. Indira, and K. Aadarsh, "Friction Stir Welding Tool Life Assessment Through Fatigue Analysis," *Stroj. Cas.*, vol. 73, no. 2, pp. 163–180, 2023, doi: 10.2478/scjme-2023-0031.
- [7] K. Balachandar and R. Jegadeeshwaran, "Friction stir welding tool condition monitoring using vibration signals and Random forest algorithm - A Machine learning approach," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, no. xxxx, pp. 1174–1180, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.061.
- [8] T. Tarmizi, F. O. Wijaya, and I. Irfan, "Pengaruh Variasi Diameter Tool Pin Pada Friction Stir Welding Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Sambungan Aluminium 6061-T6," *Kapal J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 16, no. 3, pp. 91–99, 2019, doi: 10.14710/kapal.v16i3.23280.
- [9] T. Tarmizi and B. Prayoga, "Analisa Sifat Mekanik dan Struktur Mikro pada Proses Friction Stir Welding Aluminium 5052," *J. Ris. Teknol. Ind.*, vol. 10, no. 2, pp. 105–118, 2016, doi: 10.26578/jrti.v10i2.2562.
- [10] I. Helmi and Tarmizi, "Pengaruh Bentuk Pin Terhadap Sifat Mekanik Aluminium 5083 - H112 Hasil Proses Friction Stir Welding," *J. Ris. Teknol. Ind.*, vol. 11, no. 1, pp. 31–42, 2017.
- [11] K. P. Yuvaraj, P. Ashoka Varthanan, L. Haribabu, R. Madhubalan, and K. P. Boopathiraja, "Optimization of FSW tool parameters for joining dissimilar AA7075-T651 and AA6061 aluminium alloys using Taguchi Technique," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, no. xxxx, pp. 919–925, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.942.
- [12] M. Paidar, S. Mehrez, O. O. Ojo, V. Mohanavel, B. Babaei, and M. Ravichandran, "Modified friction stir clinching of AA6061-T6/AA5754-O joint: Effect of tool rotational speed and solution heat treatment on mechanical, microstructure, and fracture behaviors," *Mater. Charact.*, vol. 173, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.matchar.2021.110962.
- [13] R. Anand and V. G. Sridhar, "Studies on process parameters and tool geometry selecting aspects of friction stir welding-A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 27, no. xxxx, pp. 576–583, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.042.
- [14] ASTM E92-82, "Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials," *ASTM Int.*, vol. 82, no. Reapproved 2003, pp. 1–9, 2004.
- [15] A. N. A. R. Banjarnahor, W. Amiruddin, and Samuel, "Jurnal Teknik Perkapalan," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 10, no. 3, pp. 11–20, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [16] J. Crawford, "Tools and techniques," *Appl. Ergon.*, vol. 25, no. 6, pp. 398–400, 1994, doi: 10.1016/0003-6870(94)90061-2.
- [17] Khaeroman, W. A. Putranto, "Studi Kasus Analisis Kegagalan Baut Connecting Rod," *Jurnal Inovtek Polbeng*, vol. 11, no. 1, 2021.