

Pengaruh Variasi Waktu Gesek Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan, dan Kekuatan Tarik Sambungan Logam Pipa Kuningan dengan Metode Pengelasan Gesek Kontinyu (*Friction Welding*)

Emha Amir^(a), Aris Widyo Nugroho, M.T., Ph.D.^(b), Totok Suwanda, S.T., M.T. (c)

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183
Telepon/ Fax: (0274) 387656/387646
Email: emhaamir@gmail.com

Intisari

Pengelasan gesek (*friction welding*) merupakan proses penyambungan suatu material yang memanfaatkan panas yang terjadi dari hasil gesekan dan tekanan dalam waktu tertentu kedua permukaan material tersebut. Pada proses penyambungan pada logam pipa kuningan yang sering digunakan adalah dengan metode *brazing*. Namun, metode *brazing* ini masih memiliki beberapa kekurangan, diantaranya: masih membutuhkan logam pengisi, timbul asap, dan butuh waktu yang lama dalam proses pengerjaannya. Sebagai alternatif untuk menutupi kekurangan pada proses *brazing* ini dapat menggunakan metode *friction welding*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu gesek terhadap struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan tarik pada sambungan hasil pengelasan gesek (*friction welding*) pipa kuningan.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah logam pipa kuningan dengan ukuran diameter luar: 22mm, diameter dalam: 19mm, tebal: 1,5mm, dan panjang: 75mm. Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan memvariasikan waktu gesek 2 detik, 3 detik, dan 4 detik. Putaran mesin las gesek yang digunakan konstan yaitu 1000 Rpm. Tekanan gesek yang digunakan sebesar 30 MPa dan tekanan upset sebesar 50 MPa. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian metallografi, pengujian kekerasan, dan pengujian kekuatan tarik.

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan, semakin meningkatnya waktu gesek yang diberikan ukuran butir struktur mikro daerah sambungan semakin mengecil dan hasil kekerasan daerah sambungan semakin besar. Hasil kekerasan tertinggi daerah sambungan terdapat pada variasi waktu gesek 4 detik sebesar 106,5 VHN, kekerasan terndap daerah sambungan terjadi pada variasi waktu gesek 2 dan 3 detik sebesar 103,0 VHN. Hasil kekuatan tarik tertinggi terdapat pada variasi waktu gesek 3 detik sebesar 270 MPa, namun masih rendah dari hasil kekuatan tarik pada raw material sebesar 497 MPa.

Kata kunci: Pengelasan Gesek, Pipa Kuningan, waktu gesek, struktur mikro, kekerasan, kekuatan tarik.

1. Pendahuluan

Kuningan telah banyak digunakan di bidang keteknikan karena memiliki keunggulan diantaranya: sifat ketahanan korosi, konduktivitas listrik dan termal yang tinggi, penampilan yang menarik, kekuatan dan daktilitas yang cukup tinggi, juga kemudahan dalam fabrikasi (Bringas & Wayyman, 1988). Salah satu teknik penyambungan pada logam kuningan yang biasa dipakai saat ini adalah menggunakan *brazing*. Namun, metode penyambungan *brazing* ini masih memiliki

beberapa kekurangan diantaranya adalah kekuatan sambungan pada hasil *brazing* ini masih kurang, masih membutuhkan logam pengisi, terdapat asap yang timbul akibat logam pengisi, proses *brazing* masih membutuhkan waktu yang lama, dan diperlukan tenaga ahli ketika melakukan proses *brazing* ini (Schwartz, 2003). Pengelasan pada logam pipa kuningan juga dapat dilakukan dengan metode pengelasan gesek (*friction welding*) yang mampu menyambungkan dua buah material dengan hasil permukaan bahan terkena secara merata dan hasil HAZ yang pendek.

Friction welding merupakan salah satu solusi untuk mengatasi kesulitan penyambungan pada las fusi dan *brazing*. *Friction welding* adalah penyambungan material yang memanfaatkan panas yang ditimbulkan dari gesekan antara dua permukaan material (Beloshapkin, 2007). Pada *friction welding* ini, proses pengelasan dilakukan tanpa mencairkan logam. Teknik pengelasan ini dapat digunakan untuk menyambung logam yang berbeda sifat thermal dan sifat mekanisnya (Faes, dkk. 2009).

Penggunaan teknologi las gesek sudah mulai banyak digunakan karena mudah dioperasikan, proses operasinya cepat, tidak memerlukan logam pengisi, dan hasil sambungannya kuat. Proses pengoperasiannya mudah dan cepat karena bentuk mesin las gesek menyerupai mesin bubut, sehingga hanya memerlukan waktu gesek yang relatif cepat.

Purnomo (2016), melakukan penelitian tentang pengaruh variasi putaran mesin terhadap kualitas sambungan pengelasan gesek pada bahan pipa kuningan dan tembaga. Parameter yang digunakan menggunakan variasi putaran pada mesin 1000 Rpm, 1600 Rpm, dan 2000 Rpm. Tekanan gesek yang digunakan 1471,68 MPa dan tekanan tempanya 1962,24 MPa. Didapatkan hasil struktur mikro pada kuningan daerah sambungan ukuran butirannya halus dan rapat. Sedangkan pada pipa tembaga daerah sambungan tidak mengalami perubahan struktur mikro. Pada hasil uji kekerasan didapatkan kekerasan tertinggi daerah sambungan terjadi pada variasi putar mesin 2000 Rpm, jarak 1 mm pada pipa kuningan yaitu sebesar 87,6 VHN. Sedangkan kekerasan terendah daerah sambungan terjadi pada variasi putar mesin 1000 Rpm pada pipa tembaga yaitu sebesar 51,5 VHN. Semakin tinggi putaran mesin yang diberikan maka nilai kekerasannya juga semakin tinggi, dan semakin rendah putaran mesin yang diberikan maka nilai kekerasannya juga rendah.

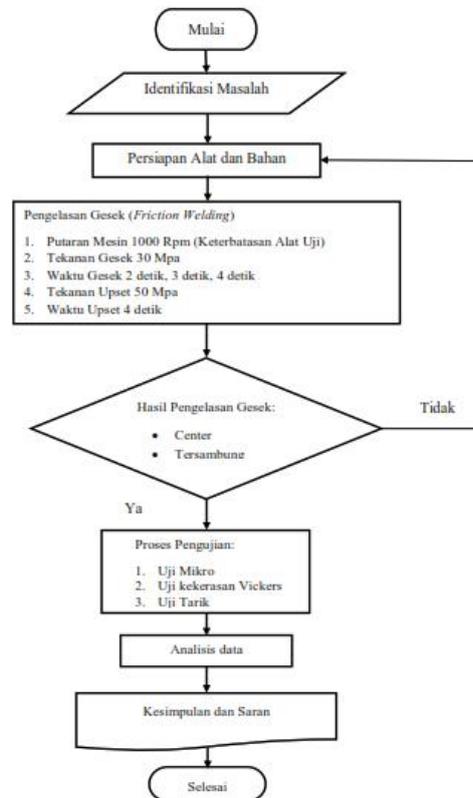
Nugroho, dkk (2016), meneliti tentang pengaruh waktu gesek pada pengelasan gesek terhadap struktur mikro dan kekerasan pada sambungan pipa tembaga dan kuningan. Parameter yang digunakan menggunakan variasi waktu 25 detik, 30 detik, 40 detik, 60 detik, dan 70 detik dengan tekanan gesek 1962,24 N dan putaran mesin 2000 Rpm. Didapatkan hasil pada pipa kuningan mempunyai tingkat kekerasan tinggi dibanding tembaga, kuningan kekerasannya 93,6 VHN dan tembaga kekerasannya 60,2 VHN. Lamanya waktu gesekan memengaruhi kekerasan hasil pengelasan. Jika waktu gesek terlalu lama maka nilai uji kekerasan pada las akan menurun kembali, hal ini dikarenakan *weld nugget* sudah mulai dingin dan proses difusi antar atom kurang.

Kolbi (2015) melakukan penelitian tentang struktur mikro dan kekerasan pada logam pipa kuningan. Parameter yang digunakan adalah variasi waktu gesekan 65 detik, 90 detik, 100 detik, 130 detik dan 150 detik dengan tekanan gesek 31,230 Mpa, tekanan tempa 46,845 Mpa dan putaran mesin 2000 Rpm. Hasilnya kuningan mempunyai tingkat kekerasan tertinggi pada pengelasan dengan waktu gesek 65 detik dengan pengujian kekerasan pada daerah *interface* yaitu 49 VHN, sedangkan nilai kekerasan terkecil terjadi pada waktu gesek 150 detik dengan pengujian kekerasan pada daerah HAZ yaitu 33 VHN. Lamanya waktu gesek memengaruhi kekerasan hasil las dikarenakan *weld nugget* sudah mulai dingin dan proses difusi antar atom kurang.

Dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penelitian mengenai sifat mekanis pada pengelasan gesek logam pipa kuningan masih tergolong jarang dilakukan. Pada penelitian sebelumnya, mekanisme pada pengelasan geseknya masih menggunakan pegas sebagai pemberian tekanan gesek, sehingga tekanan yang diberikan tidak konstan. Pada penelitian ini

mekanisme mesin las gesek telah menggunakan hidrolik yang membuat pemberian tekanan gesek menjadi lebih konstan dibandingkan dengan menggunakan pegas.

2. Metode Penelitian



Gambar 2.1. Diagram alir penelitian

Parameter yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini menggunakan variasi waktu gesek yaitu 2 detik, 3 detik, dan 4 detik. Sedangkan parameter lain yang digunakan seperti putaran mesin, dan tekanan gesek konstan. Putaran mesin yang digunakan pada penelitian ini yaitu 1000 rpm dan tekanan gesek yang digunakan yaitu 30 MPa. Pengelasan gesek dilakukan sebanyak 4 kali pada tiap masing-masing variasi waktu gesek. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah pipa kuningan dengan diameter luar 22 mm dan diameter dalam 19 mm.

Pembuatan spesimen pipa kuningan yang akan dilakukan pengelasan gesek dipotong sepanjang 75 mm menggunakan gergaji mesin kemudian permukaan spesimen diratakan dengan proses pembubutan. Selanjutnya melakukan kalibrasi pada mesin las gesek dengan tujuan untuk mendapatkan hasil pengujian yang sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah variasi waktu gesek pengelasan, kemudian untuk parameter tekanan gesek dan tekan tempa diatur pada awalnya saja, karena dianggap konstan. Cara kalibrasi mesin las gesek ini dilakukan dengan cara menyetel tekanan dengan mesin hidrolik menggunakan alat ukur yang bernama *load cell*. Penyetelan ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar tekanan setiap dilakukan pembukaan katup secara bervariasi.

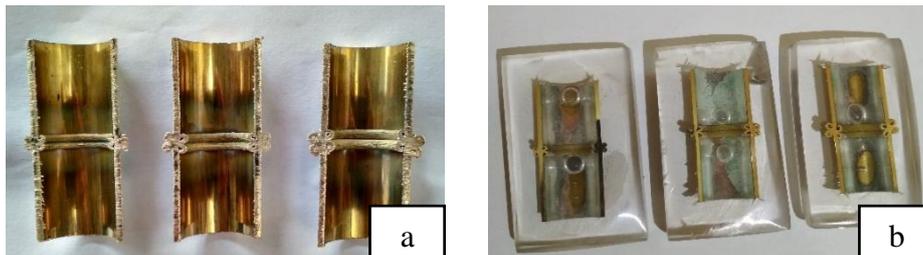
Proses pengelasan gesek dilakukan ketika proses kalibrasi untuk menentukan tekanan gesek dan tekanan upset pada mesin las gesek telah ditentukan. Pengelasan gesek dilakukan dengan memasang spesimen pada cekam yang berputar dan cekam diam pada posisi *center* (Gambar 2.2.). Tekanan gesek yang digunakan 30 MPa dan tekanan tempa 50 MPa. Tekanan tempa diberikan ketika gesekan berakhir. Pengelasan tersebut diulang dengan variasi waktu gesek 2 detik 3 detik dan 4 detik masing-masing 4 kali.



Gambar 2.2 Proses pengelasan gesek pipa kuningan.

2.1. Pengujian Metallografi

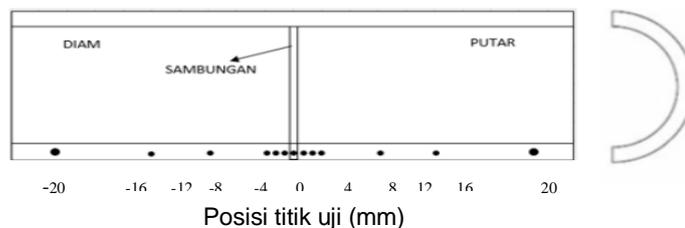
Pengujian metallografi merupakan suatu metode pengamatan untuk melihat struktur logam dengan menggunakan mikroskop. Pengamatan tersebut dilakukan pada spesimen yang telah diproses sehingga bisa diamati dengan pembesaran tertentu. Benda uji yang telah tersambung dipotong dan dibelah menjadi 2 bagian menggunakan gergaji besi untuk pengujian struktur mikro dan kekerasan. Spesimen yang sudah dibelah kemudian dicetak dengan resin. Selanjutnya dilakukan pengamplasan menggunakan mesin amplas menggunakan nomer amplas 120, 320, 800, 1000, 1500, 2000 secara berurutan agar permukaan pada benda uji benar-benar halus. Selanjutnya dilakukan pemolesan menggunakan pasta autosol secukupnya untuk persiapan pengetsaan. Proses pengetsaan menggunakan larutan kimia HNO_3 65% + Alkohol. Pengujian dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Olympus tipe PME3 yang terdapat di Lab Material D3 Universitas Gadjah Mada. Pengujian struktur mikro dilakukan pada perbesaran 200x.



Gambar 2.3. a). Hasil potongan melintang spesimen uji b). Hasil *mounting* spesimen uji

2.2. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan di Lab Material D3 UGM menggunakan alat uji kekerasan *micro vickers* dengan pembebanan 200 gf. Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan pada spesimen hasil pengelasan gesek tiap variasi waktu gesek. Pada pengujian kekerasan ini, posisi titik pengujian untuk pengambilan data pada spesimen ada 13 titik pengujian. Dimulai pada titik 0 atau tengah hasil sambungan, selanjutnya ke arah kanan dengan jarak 0.5, 1.5, 3.5, 8, 15, 20 mm, kemudian ke arah kiri dengan jarak yang sama. Posisi titik pengujian kekerasan dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Posisi titik pengujian kekerasan.

2.3. Pengujian Tarik

Pengujian tarik pada penelitian ini dilakukan di Lab Material Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Mesin uji tarik menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM). Pengujian tarik ini berfungsi untuk mengetahui kekuatan tarik hasil pengelasan gesek. Pengujian tarik ini dilakukan 3 kali pengujian pada masing-masing spesimen variasi waktu gesek. Sebelum melakukan pengujian tarik, spesimen uji tarik dilakukan proses pemesinan untuk menghilangkan *flash* pada daerah sambungan dan dibentuk sesuai standar *JIZ Z 2201*.

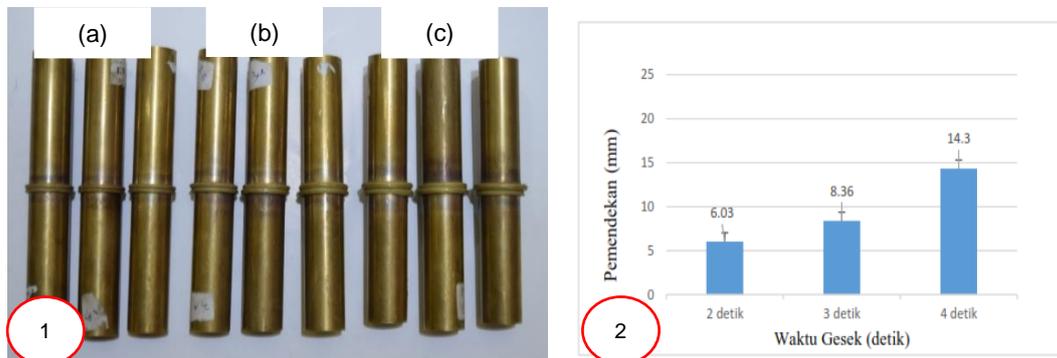


Gambar 2.5. Spesimen uji tarik (Standar *JIZ Z 2201*).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil penyambungan pengelasan gesek pipa kuningan

Hasil penyambungan pengelasan pipa kuningan secara visual.

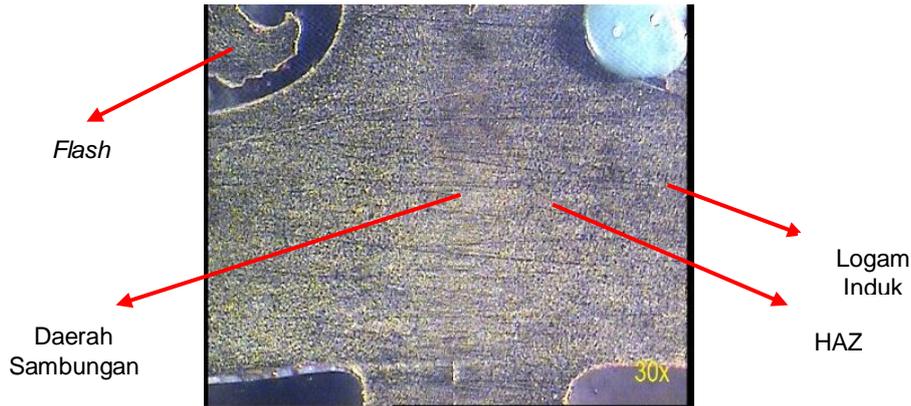


Gambar 3.1. (1) Hasil sambungan pengelasan gesek pada waktu gesek (a). 2 detik, (b). 3 detik, (c). 4 detik. (2) Diagram rata-rata pemendekan hasil sambungan las gesek.

Gambar 3.1. (1) merupakan hasil penyambungan dengan metode *continuous drive friction welding* bahan logam pipa kuningan. Variasi waktu gesek yang digunakan yaitu 2 detik, 3 detik, dan 4 detik. Terlihat *flash* yang dihasilkan pada sambungan ini berbeda-beda dikarenakan pengaruh variasi waktu gesek pada saat proses pengelasan. Pada gambar diagram 3.1. (2) dapat diamati bahwa lama durasi waktu gesek pada saat proses pengelasan sangat mempengaruhi besarnya pemendekan hasil pengelasan yang terjadi. Semakin lama waktu gesek yang digunakan, maka semakin besar pemendekan yang akan terjadi pada sambungan pengelasan.

3.2. Hasil Struktur Makro dan Mikro

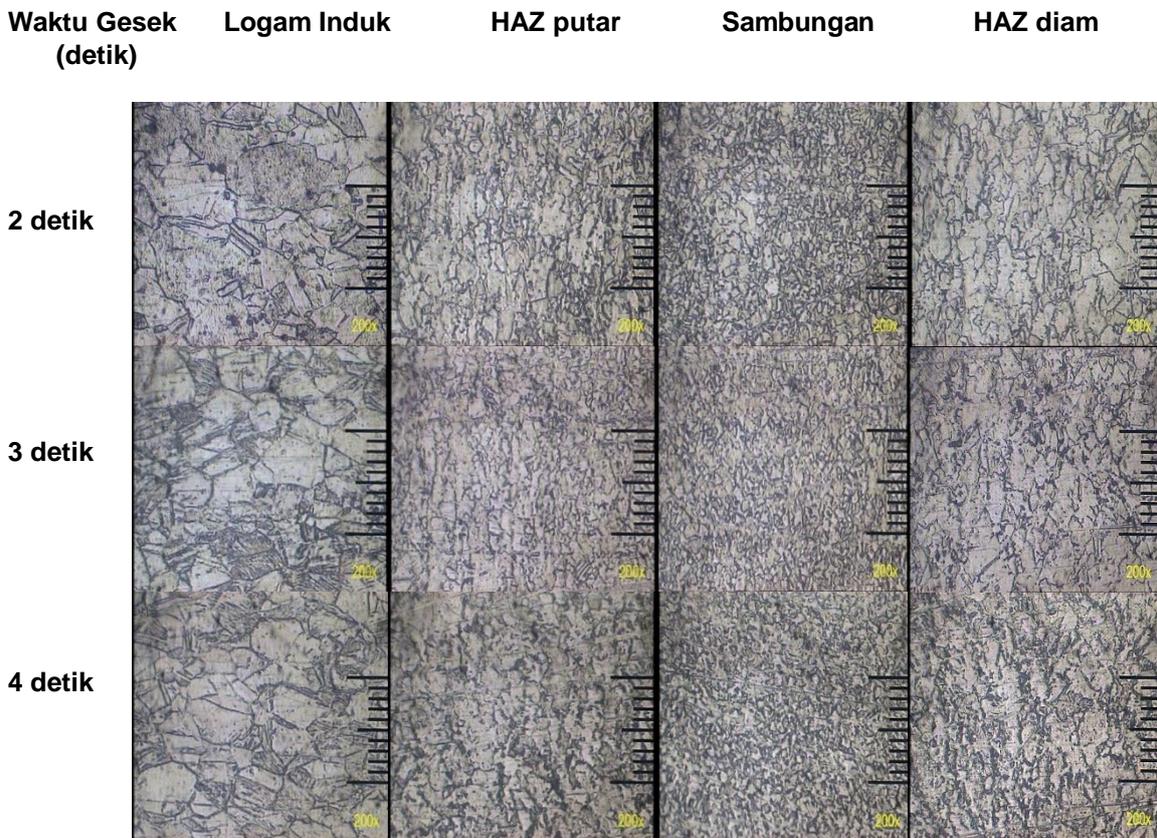
- Berikut ini merupakan hasil foto makro sambungan pipa kuningan dengan perbesaran 30x.



Gambar 3.2. Hasil foto makro pada sambungan pipa kuningan dengan perbesaran 30x

Pada gambar 3.2. merupakan hasil foto makro daerah sambungan pipa kuningan, terdapat 4 daerah yang terlihat dari hasil proses pengelasan gesek yaitu: daerah sambungan las, HAZ, logam induk, dan *flash*. Daerah sambungan merupakan daerah kedua sisi permukaan bahan yang mengalami deformasi plastis dan termoplastis akibat tekanan dan panas pengelasan. Daerah HAZ adalah daerah yang terkena efek panas pengelasan yang dihasilkan dari daerah sambungan. Logam induk adalah daerah logam dasar yang tidak terpengaruh panas dan tekanan gesek pengelasan. *Flash* adalah cairan logam yang keluar dari daerah sambungan akibat pengaruh tekanan.

- Pengujian struktur mikro hasil pengelasan gesek pipa kuningan pada variasi waktu gesek 2 detik, 3 detik, dan 4 detik dengan perbesaran 200x.

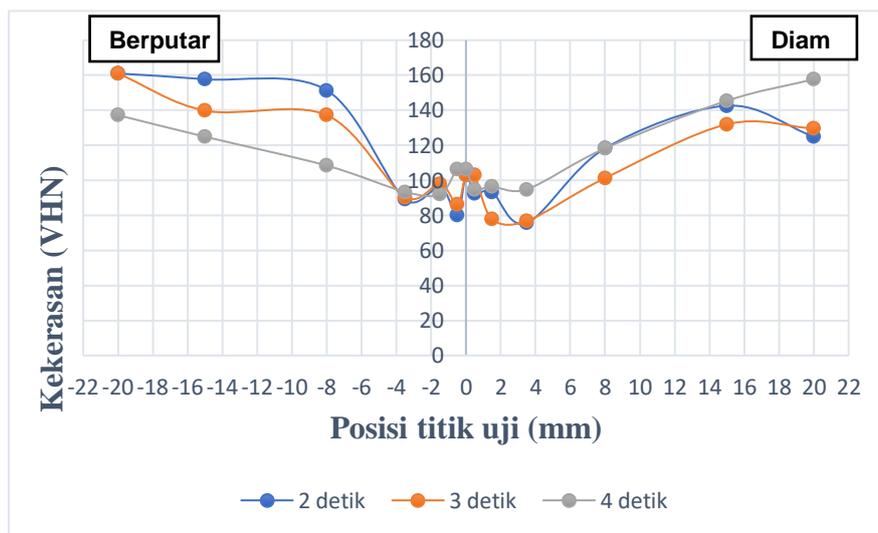


Gambar 3.3. Hasil foto struktur mikro pengelasan gesek pipa kuningan

Pada hasil pengujian mikro struktur antara variasi waktu gesek 2 detik, 3 detik dan 4 detik dapat disimpulkan bahwa pada daerah sambungan variasi waktu gesek 4 detik terlihat struktur mikronya lebih kecil dan paling rapat dibandingkan variasi waktu gesek yang lainnya. Hal ini disebabkan lama waktu pengelasan gesek mengakibatkan panas pengelasan yang semakin tinggi sehingga proses pengerjaan dingin (*cold working*) tinggi juga, yang membuat struktur mikro pada daerah sambungan variasi waktu gesek 4 detik ini lebih kecil dan rapat daripada variasi waktu gesek lainnya. Pada daerah HAZ terlihat bahwa pada tiap variasi waktu gesek memiliki ukuran butir struktur mikro yang lebih besar dan lebar dari daerah sambungan. Hal ini disebabkan masukan panas dan pengerjaan dingin (*cold working*) yang lebih rendah daripada daerah sambungan. Pada daerah logam induk pada tiap variasi waktu gesek terlihat bahwa semakin lama waktu gesek pada saat pengelasan tidak memengaruhi perubahan struktur mikro pada daerah ini. Nugroho, dkk (2014), mengatakan bahwa struktur mikro daerah logam induk dengan fasa austenit terlihat jelas dengan susunan butir yang besar sehingga material ini bersifat ulet.

3.3. Hasil Pengujian Kekerasan

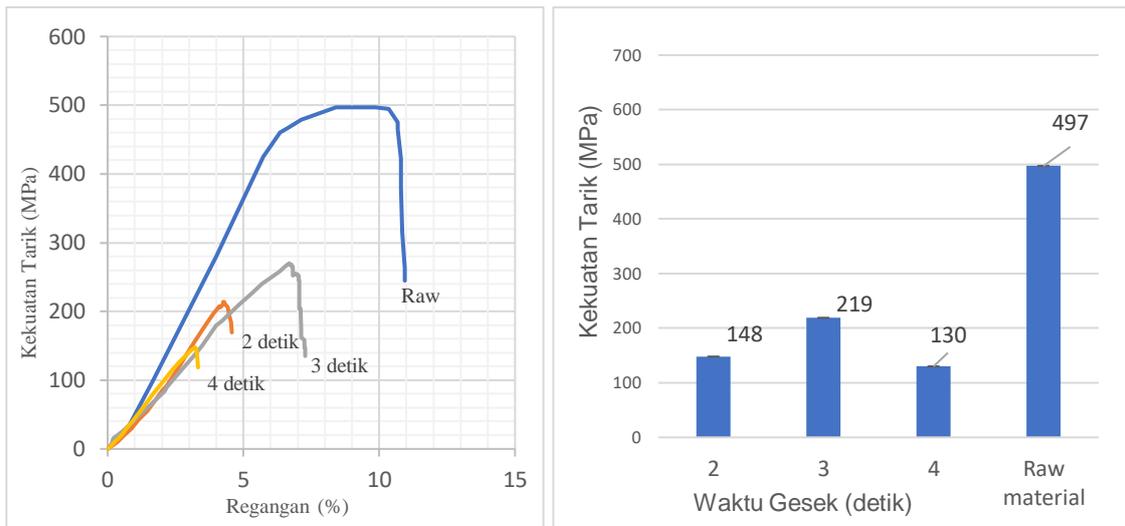
Dari pengujian struktur mikro yang telah dilakukan maka dapat diketahui posisi untuk menentukan titik pengujian kekerasan. Spesimen yang digunakan untuk pengujian kekerasan adalah hasil sambungan dengan variasi waktu gesek 2 detik, 3 detik dan 4 detik. Pengujian kekerasan ini menggunakan metode uji *Vickers* dengan pembebanan 200 gf. Hal ini bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan pada daerah yang mengalami perubahan struktur mikro.



Gambar 3.4. Grafik hasil pengujian kekerasan.

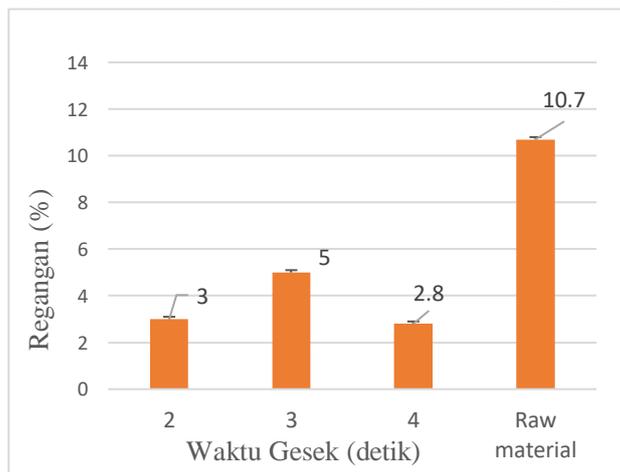
Pada gambar 3.4. dapat diamati bahwa nilai kekerasan pada daerah sambungan terlihat semakin tinggi dengan semakin lamanya waktu gesek yang diberikan. Nilai kekerasan tertinggi pada daerah sambungan terjadi pada variasi waktu gesek 4 detik yaitu sebesar 106,5 VHN. Sedangkan nilai kekerasan pada variasi waktu gesek 2 dan 3 detik daerah sambungan nilai kekerasannya cenderung menurun dan sama yaitu sebesar 103,0 VHN. Hal ini disebabkan pada saat proses pengelasan gesek terjadi deformasi plastis yang menyebabkan butiran-butiran kecil menumpuk pada daerah sambungan pengelasan. Kolbi (2015), mengatakan bahwa lama waktu gesek ketika pengelasan berlangsung akan memengaruhi kekerasan hasil las. Hal ini dikarenakan *weld nugget* sudah mulai dingin dan proses difusi antar atom kurang.

3.4. Hasil Pengujian Tarik



Gambar 3.5. (a). Diagram tegangan terhadap regangan. (b). Diagram hubungan antara waktu gesek dengan kekuatan tarik (MPa)

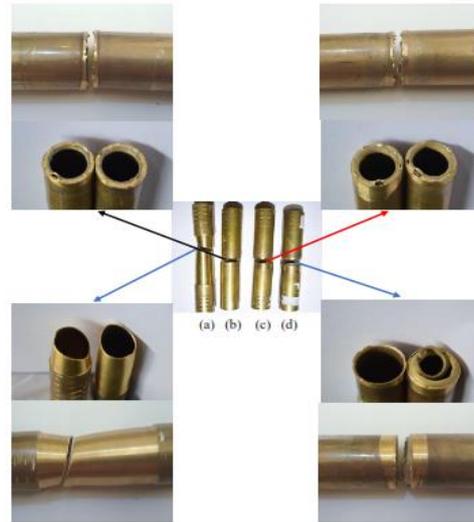
Pada gambar 3.5.(a) dapat dilihat bahwa patahan hasil kekuatan tarik pada raw material pipa kuningan lebih besar dibandingkan dengan kekuatan tarik hasil sambungan pengelasan dengan variasi waktu gesek. Gambar (b) dapat diamati bahwa kekuatan tarik tertinggi pada hasil sambungan pengelasan gesek terjadi pada variasi waktu gesek 3 detik dengan kekuatan tarik 219 MPa, sedangkan pada variasi waktu gesek 2 detik kekuatannya 148 MPa dan variasi waktu gesek 4 detik kekuatannya 130 MPa. Dapat disimpulkan bahwa pada penelitian ini variasi waktu gesek 3 detik telah mencapai kekuatan tarik maksimum. Sebab, dengan ditambahkannya waktu gesek yang lebih lama kekuatannya semakin menurun. Kekuatan tarik hasil sambungan pengelasan gesek pipa kuningan masih lebih rendah dari kekuatan tarik pipa kuningan tanpa sambungan yaitu sebesar 497 MPa. Hal ini disebabkan karena pada daerah sambungan mengalami perubahan struktur mikro akibat proses pengelasan gesek.



Gambar 3.6. Diagram hubungan antara waktu gesek dengan regangan (%)

Gambar 3.6. menunjukkan bahwa nilai regangan tertinggi pada daerah sambungan pengelasan gesek terjadi pada variasi waktu gesek 3 detik dibandingkan variasi waktu gesek yang lain. Nilai regangan pada variasi waktu gesek 3 detik yaitu 5%, namun masih lebih kecil dari nilai regangan pada raw material yang memiliki nilai regangan sebesar 10,7%. Hal ini disebabkan

pada sambungan hasil pengelasan gesek mengalami patah tepat di daerah sambungan yang merupakan daerah terkena panas pengelasan dan terjadi perubahan struktur mikro, sehingga menyebabkan kekuatannya menurun.



Gambar hasil patahan spesimen uji tarik (a) raw material (b) 2 detik (c) 3 detik (d) 4 detik

Gambar 3.7. Hasil patahan spesimen uji tarik

Gambar 3.7. dapat diamati bahwa pada raw material mengalami bentuk patahan ulet yang ditunjukkan dengan pertambahan panjang pada spesimen yang cukup panjang, sedangkan pada sambungan hasil pengelasan gesek tingkat keuletannya menurun. Hal ini disebabkan karena pada daerah sambungan mengalami perubahan struktur mikro akibat panas dari proses pengelasan gesek.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian tentang pengaruh variasi waktu gesek terhadap struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan tarik sambungan logam pipa kuningan dengan metode pengelasan gesek kontinyu (*friction welding*) yang telah dilaksanakan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Struktur mikro pada daerah sambungan memiliki butir struktur mikro yang paling kecil dibandingkan daerah HAZ dan daerah logam induk. Semakin lama waktu gesek yang diberikan, ukuran butir struktur mikro pada daerah sambungan semakin mengecil dan nilai kekerasan pada daerah sambungan semakin besar.
2. Nilai uji kekerasan tertinggi pada daerah sambungan terdapat pada variasi waktu gesek 4 detik yaitu sebesar 106,5 VHN, sedangkan nilai kekerasan terendah pada daerah sambungan terdapat pada variasi waktu gesek 2 dan 3 detik yaitu sebesar 103,0 VHN. Hal ini disebabkan pada saat proses pengelasan gesek terjadi deformasi plastis yang menyebabkan butiran-butiran kecil menumpuk pada daerah sambungan pengelasan.
3. Hasil kekuatan tarik rata-rata tertinggi terdapat pada variasi waktu gesek 3 detik yaitu sebesar 219 MPa, sedangkan kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada variasi waktu gesek 4 detik yaitu sebesar 130 MPa. Kekuatan tarik hasil sambungan las gesek pipa kuningan masih lebih rendah dibandingkan dengan kekuatan tarik pipa kuningan tanpa sambungan yaitu sebesar 497 MPa.
4. Hasil pengelasan gesek pipa kuningan saat di lakukan pengujian tarik semuanya mengalami patah getas tepat pada daerah sambungan.

5. Daftar Pustaka

Jurnal:

- Beloshapkin, G.V dkk. Friction welding of Pipes. *Welding International*. 2007; 21. (6): 458-459.
- Faes, K dkk. Parameter Optimisation for Automatic Pipeline Girth. Welding Using a New Friction Welding Method. *Material & Design*. 2009; 154: 581-589.
- Japanese Standards Association. Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials. *Standardization Journal*. 1998; 1-15.
- Husodo, N dkk. Analisa Kekuatan Sambungan Pipa Baja Karbon dan Besi Cor Berbasis Teknologi Las Gesek (Friction Welding). *Jurnal Energi dan Manufaktur*. 2015; 8. (2): 111-122.
- Mardiana., Karmiadji, D.W. Analisis Pengaruh Proses *Brazing* Kuningan Terhadap Perubahan Sifat Mekanis dari Pipa Baja Karbon Rendah. *Forum Teknik*. 2010; 33. (3): 181-187.
- Nugroho, A.W dkk. Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Pengelasan Gesek Baja Tahan Karat Austenitik AISI 304 (Mechanical Properties and Microstructure of aisi 304 Austenitic Stainless Steel Friction Welded Joint). *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*. 2014; 17. (1): 83-90.
- Nugroho, A.W dkk. Mikrostruktur dan Kekerasan Sambungan Pengelasan Gesek Disimilar Pipa Tembaga/Kuningan (Cu/Cu-Zn). *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*. 2016; 19. (1): 68-74.
- Sahin, A.Z dkk. Analysis of the Friction Welding Process in Relation to the Welding of Copper and Steel Bars. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998; 82: 127-136.
- Sanyoto, B.L dkk. Penerapan Teknologi Las Gesek (Friction Welding) dalam Proses Penyambungan Dua Buah Pipa Logam Baja Karbon Rendah. *Jurnal Energi dan Manufaktur*. 2012; 5. (1): 51-60.
- Yilbas, B.S dkk. Friction Welding of St-Al and Al-Cu Materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995; 49: 431-443.

Buku:

- Bringas, J. E., Wayman, M. L. *The Metals Red Book: Nonferrous Metals Volume 2*. Edmonton: Casti Publishing. 1998: 18.
- Japan Welding Society. *Welding and Joining Technologies*. Tokyo: Japan Welding Society. 2010: 1-3.
- Schwartz, M. M. *Brazing Second Edition*. Ohio: ASM International. 2003: 4.
- Surdia, T., Saito, S. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: Pradnya Paramita. 1999: 33.

Skripsi:

- Kolbi. Analisa Pengaruh Waktu Gesek Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan pada Sambungan Logam Pipa Kuningan 5/8" dengan Metode Pengelasan Gesek (Rotary Friction Welding). Skripsi. Teknik mesin: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta; 2015.
- Purnomo, S. Pengaruh Variasi Putaran Gesek Terhadap Kualitas Sambungan pada Pengelasan Gesek Continous Drive Friction Welding Bahan Pipa Kuningan dan Tembaga. Skripsi. Teknik mesin: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta; 2016.