

PENGARUH VARIASI TEKANAN GESEK TERHADAP STRUKTUR MIKRO, KEKERASAN DAN KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN *DISIMILLAR* PIPA *STAINLESS STEEL* (BERPUTAR) - PIPA BAJA (*STEEL*) MENGGUNAKAN METODE *CONTINUOUS DRIVE FRICTION WELDING*

Danang Cliff Rizaldi^a, Aris Widyo Nugroho^b, Totok Suwanda^c

^{a,b,c}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183

^arizalddanang@gmail.com, ^bnugrohoaris@gmail.com, ^csuwanda@umy.ac.id

Intisari

Secara umum pengelasan pipa masih menggunakan metode pengelasan *fushion* yang mana membutuhkan waktu pengelasan yang lama dan *skill* operator yang tinggi. Masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan metode pengelasan gesek. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi tekanan gesek struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik sambungan *disimillar steel* dengan pipa baja menggunakan metode *Continuous Drive Friction Welding* (CDFW). Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pipa *stainless steel* ASTM A312 TP304 dengan pipa baja ASTM A53 Gr.A. Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah variasi tekanan gesek 25, 30 dan 35 MPa. Waktu pengelasan 1 detik dimana tekanan tempa diberikan selama 5 detik sebesar 50 MPa. Kecepatan yang dipilih sebesar 1000 rpm. Kemudian hasil pengelasan gesek dilakukan pengujian struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan pada semua variasi tekanan gesek menghasilkan daerah *Thermomechanically Affected Zone* (TMAZ) dengan bentuk butiran yang halus dan rapat. Tingginya tekanan gesek membuat butiran semakin halus dan daerah TMAZ yang terbentuk juga semakin sempit. Semakin meningkatnya tekanan gesek nilai kekerasan pada daerah TMAZ juga semakin meningkat. Sedangkan pada pengujian tarik kekuatan tarik terendah pada tekanan gesek 25 MPa sebesar 296,70 MPa dan kekuatan tarik tertinggi pada tekanan gesek 35 MPa sebesar 421,73 MPa. Dari hasil pengujian tarik dapat disimpulkan semakin besar tekanan gesek maka kekuatan tarik akan semakin tinggi. Parameter yang direkomendasikan untuk pengelasan gesek pipa *stainless steel* dengan pipa baja adalah 35 MPa.

Kata Kunci: Pengelasan gesek, pipa *stainless steel*, pipa baja, struktur mikro, kekerasan, kekuatan tarik.

1. Pendahuluan

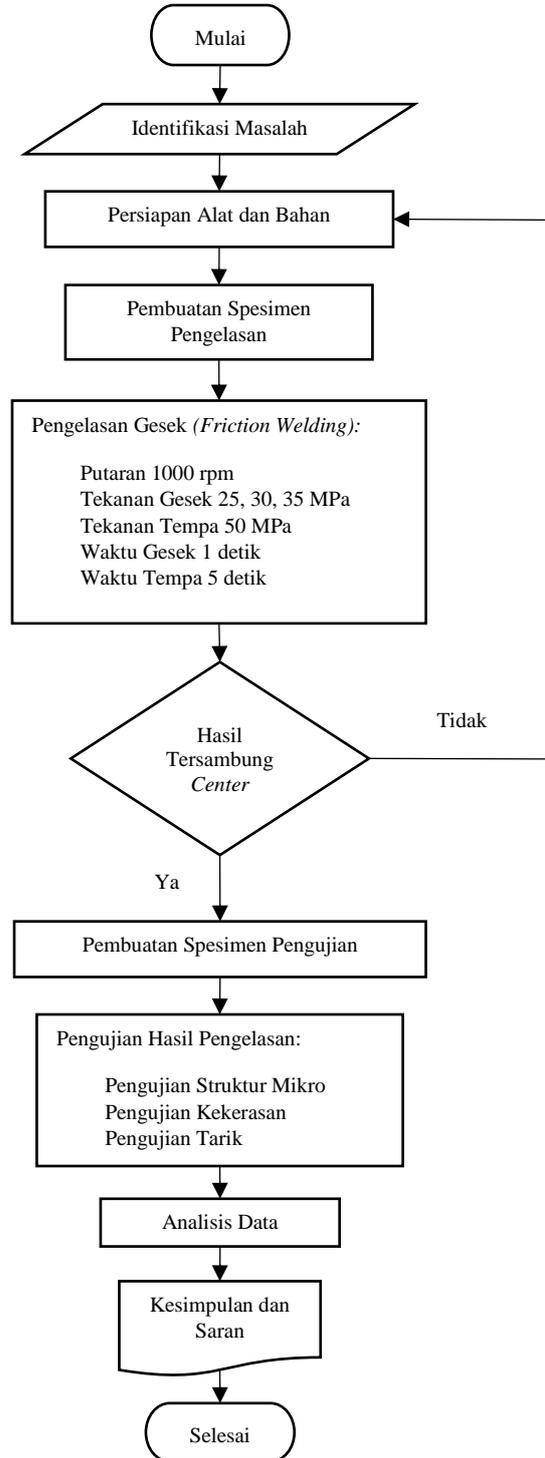
Penggunaan metode pengelasan untuk penyambungan logam sangat sering dilakukan di dunia industri manufaktur. Penyambungan logam dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu sambungan pengelasan, paku keling dan mur baut. Pada pengelasan pipa menggunakan metode *fushion welding* membutuhkan waktu penyambungan yang lama dan *skill* operator yang tinggi serta tidak mampu diaplikasikan pada sambungan beda jenis (*disimillar*). Untuk mengatasi masalah pada penyambungan pipa dengan metode *fushion welding* dapat menggunakan metode pengelasan *solid state welding*. Dengan menggunakan metode ini dua buah pipa *disimillar* dapat disambung dengan waktu yang singkat dan tidak diperlukan *skill* operator yang tinggi. Pipa *stainless steel* dan pipa baja (*carbon steel*) banyak digunakan untuk pipa pengeboran minyak dan untuk mengalirkan minyak serta gas karena memiliki ketahanan yang tinggi. Penyambungan kedua pipa ini dapat dilakukan dengan pemasangan *fitting* dan. Hal ini dikarenakan pipa *stainless steel* dengan pipa *carbon steel* sulit disambung dengan menggunakan pengelasan busur atau biasa dikenal *fushion welding*. Pipa *stainless steel* dengan *carbon steel* dapat disambung dengan metode *friction welding*.

Pada pengelasan gesek terdapat beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihan pengelasan gesek antara lain sebagai berikut: waktu yang dibutuhkan relatif singkat, dapat digunakan untuk penyambungan secara masal, mampu menyambung material yang *disimilar*, tidak memerlukan logam pengisi, tidak terjadi inklusi terak dan porositas. Disamping kelebihan, pengelasan gesek juga memiliki beberapa kekurangan antara lain adalah sebagai berikut: material yang akan disambung harus mampu menimbulkan gesekan pada permukaan dan tidak boleh bersifat getas serta harus memiliki sifat mampu tempa (Tiwana dan Ardian, 2005).

Penelitian tentang pengelasan gesek pipa *stainless steel* dengan pipa baja (*carbon steel*) masih jarang dilakukan. Kimura dkk (2012) telah meneliti tentang sifat sambungan pada *stainless steel austenitic* AISI 310S pipa berdinding tipis dengan menggunakan las gesek. Penelitian tentang struktur mikro dan sifat tarik pengelasan gesek pipa SUS 304 HCu *austenitic stainless steel* telah dilakukan oleh Vinoth dan Balasubramanian (2014). Mardiyono (2011) melakukan penelitian tentang pengelasan gesek *disimilar* material baja karbon sedang (ST 60) silinder pejal dengan *austenitic stainless steel* (AISI 304) silinder pejal menggunakan metode *direct drive friction welding*. Dari penelitian tersebut didapatkan kekuatan tarik sambungan masih dibawah kekuatan tarik logam induk. Kedua material menghasilkan HAZ, dimana HAZ pada material AISI 304 lebih kecil dibandingkan dengan HAZ pada material ST 60 dan nilai kekerasan pada ST 60 lebih tinggi dibandingkan dengan kekerasan pada AISI 304. Sanyoto dkk (2012) telah melakukan penelitian tentang penerapan teknologi las gesek dalam penyambungan dua buah pipa logam baja karbon rendah. Semakin lama waktu gesekan akan menaikkan temperatur gesekan dan kekuatan sambungan. Kenaikan temperatur gesekan akan membuat nilai upset semakin besar dan panjang uji semakin pendek. Husodo dkk (2015) juga melakukan penelitian tentang analisis kekuatan sambungan pipa baja karbon dan besi cor berbasis teknologi las gesek (*friction welding*). Hasil pengujian menunjukkan semakin tinggi tekanan tempa maka semakin tinggi kekuatan tariknya. Laksono dan Sugiyanto (2017) melakukan penelitian tentang pengujian sifat mekanik dan struktur mikro pada sambungan pengelasan gesek sama jenis baja ST 60, sama jenis AISI 201 dan beda jenis baja ST 60 dengan AISI 201. Sementara itu, Nugroho dkk (2016) meneliti tentang mikrostruktur dan kekerasan sambungan pengelasan gesek *disimilar* pipa tembaga/kuningan (Cu/Cu-Zn). Didapatkan hasil pada sambungan las tembaga/kuningan menghasilkan *flash*. *Flash* juga terjadi pada bagian dalam pipa, akan tetapi tidak terlalu besar dikarenakan adanya gaya sentrifugal saat pengelasan gesek sedang berlangsung.

Penelitian tentang pengaruh tekanan gesekan pada penyambungan material tidak sejenis (*disimilar*) pipa *stainless steel* dengan pipa baja untuk saat ini masih jarang dilakukan, maka perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang pengaruh variasi tekanan gesek terhadap kekuatan tarik, struktur mikro dan kekerasan pada sambungan *disimilar* pipa *stainless steel* dengan pipa baja (*carbon steel*).

2. Metode Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pipa *stainless steel* ASTM A312 TP304 dan pipa baja ASTM A53 Gr.A dengan ukuran 1/2 inchi dipotong dan dibubut permukaannya dengan panjang 75 mm. Pembubutan pada pipa bertujuan untuk mempermudah proses pengelasan gesek dan memperkecil kemungkinan terjadinya cacat las.

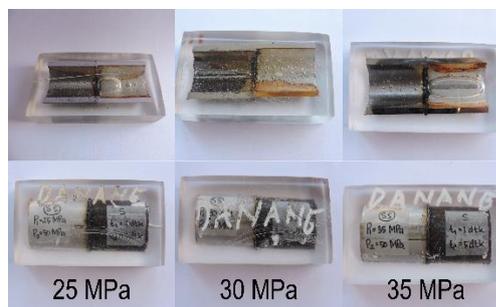
Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi tekanan gesek sebesar 25, 30 dan 35 MPa. Waktu gesek selama 1 detik dan waktu tempa selama 5 detik dengan tekanan tempa sebesar 50 MPa. Putaran mesin yang digunakan adalah 1000 rpm. Selain itu getaran yang ditimbulkan dari mesin diasumsikan tidak mempengaruhi hasil pengelasan.

Pengelasan dilakukan dengan menggunakan mesin las gesek hasil modifikasi dari mesin bubut. Mesin bubut diberikan aktuator hidrolis untuk menekan *chuck* yang diam. Pada aktuator hidrolis diberikan *load cell* yang berfungsi untuk membaca tekanan yang dihasilkan oleh aktuator hidrolis. Pipa *stainless steel* dipasang pada *chuck* yang berputar dan pipa baja dipasang pada *chuck* diam. Setelah dipasang kemudian mesin las gesek dinyalakan dan tuas hidrolis dibuka untuk mendorong aktuator hidrolis. *Chuck* diam akan bergerak mendekati *chuck* berputar dan terjadi gesekan antara pipa *stainless steel* dengan pipa baja. Pengelasan ini dilakukan sebanyak 4 kali setiap variasi tekanan geseknya.

Setelah dilakukan proses pengelasan kemudian spesimen dilepas dari mesin las gesek dan dibiarkan hingga suhu akibat pengelasan relatif mendingin. Selanjutnya spesimen dibelah dengan menggunakan gergaji dan dilakukan *mounting* dengan menggunakan resin. Spesimen ini akan digunakan untuk pengujian kekerasan dan struktur mikro. Untuk pengujian tarik spesimen hanya dihilangkan *flash* yang terbentuk dan dibubut sesuai dengan standar JIS Z 2201 No.14C untuk spesimen berbentuk pipa. Pengujian struktur mikro dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik D3 Teknik Mesin UGM. Pengujian kekuatan tarik dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin UMY.

2.1 Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengamati perubahan struktur mikro yang terjadi akibat proses pengelasan. Spesimen hasil pengelasan dibelah dengan menggunakan gergaji sebelum dilakukan proses pengamplasan dan pemolesan. Untuk memudahkan proses pengamplasan dan pemolesan perlu dilakukan *mounting* pada spesimen terlebih dahulu dengan menggunakan resin.



Gambar 2. Spesimen Pengujian Struktur Mikro dan Kekerasan

Setelah di *mounting* kemudian spesimen diampas dan dipoles. Pengamplasan menggunakan amplas dengan ukuran 120, 320, 1000, 1500 dan 2000. Pemolesan spesimen menggunakan autosol, selanjutnya spesimen dietsa menggunakan cairan *aquaregia* yang terbuat dari larutan HNO_3 + HCl dengan perbandingan 1:3 untuk pipa *stainless steel*. Sedangkan pengetsaan baja menggunakan HNO_3 dengan konsentrasi sebesar 2,5%. Hasil pengetsaan spesimen kemudian dilakukan pengujian struktur mikro menggunakan mesin merek *Olympus* tipe BX53MRF-S milik laboratorium material D3 UGM.

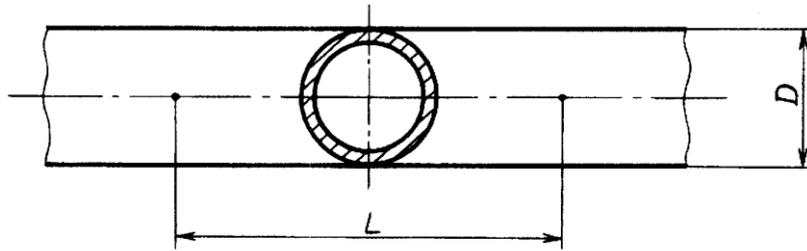
2.2 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada sambungan pengelasan gesek pipa *stainless steel* – pipa baja. Pengujian kekerasan ini menggunakan spesimen sebelumnya yang digunakan pada pengujian struktur mikro. Spesimen dilakukan pemolesan ulang untuk mendapatkan permukaan yang halus dan

rata menggunakan autosol. Setelah di poles kemudian dilakukan pengujian kekerasan menggunakan mesin merek *Shimadzu* tipe HMV-M3 milik laboratorium material D3 UGM.

2.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik yang dihasilkan oleh hasil pengelasan gesek pipa *stainless steel* – pipa baja. Spesimen uji tarik ini dibuat dengan mengacu pada standar JIS Z 2201 pengujian tarik pipa. Panjang *gauge* (L) dihitung dengan rumus $5.65\sqrt{A}$ dimana A adalah luas penampang pipa. Pembuatan spesimen dilakukan untuk menghilangkan *flash* yang terbentuk akibat proses pengelasan gesek. Selanjutnya dilakukan pembubutan sesuai dengan bentuk standar pengujian tarik pipa menurut JIS Z 2201 No.14C.



Gambar 3. Standar Pengujian Tarik JIS Z 2201 No.14C

3. Hasil dan Pembahasan

Berikut ini adalah hasil pengelasan gesek pipa *stainless steel* (berputar) dengan pipa baja dengan metode *continuous drive friction welding*. Pengelasan dilakukan pada tekanan gesek sebesar 25, 30 dan 35 MPa. Pengelasan gesek pipa *stainless steel* (berputar) dengan pipa baja menghasilkan *flash* yang sedikit. Hal ini disebabkan oleh rata-rata waktu gesek yang relatif cepat, yakni sekitar 1 detik.



Gambar 4. Hasil Pengelasan Gesek Pipa *Stainless Steel* - Pipa Baja

3.1 Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan pada variasi tekanan gesek 25, 30 dan 35 MPa. Tujuan dilakukan pengujian struktur mikro adalah untuk mengetahui perubahan struktur mikro akibat pada material pipa *stainless steel* dengan pipa baja (*steel*) setelah dilakukan pengelasan gesek. Pengujian struktur mikro dilakukan dibawah mikroskop dengan perbesaran 200x. Dari hasil foto mikro maka dapat diketahui pembagian daerah setelah dilakukan pengelasan gesek. Pada sambungan pipa *stainless steel* (berputar) – pipa baja terdapat 2 daerah lasan, 2 daerah HAZ dan 2 daerah logam induk. Gambar 5 menunjukkan bentuk struktur mikro dari hasil pengelasan pipa *stainless steel* (berputar) – pipa baja dimana sambungan terjadi pada temperatur yang tinggi dan tekanan yang tinggi.



Gambar 5. Hasil Pengujian Struktur Mikro

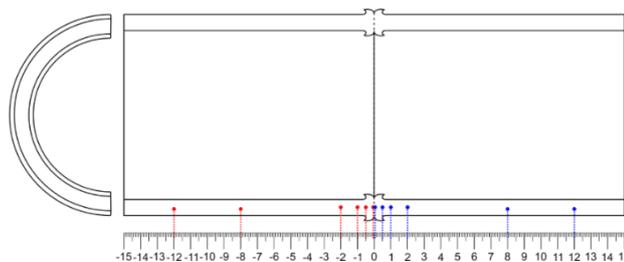
Tipe daerah hasil pengelasan ini sama dengan penelitian terdahulu (Nugroho dkk, 2016) yang terdiri dari 3 bagian, yakni:

1. *Weld Centre Zone (WCZ)* atau dapat disebut daerah pusat pengelasan dimana pada daerah ini struktur logam mengalami rekristalisasi menjadi sangat halus, dikedua sisi daerah WCZ terdapat daerah *interface stainless steel* dan daerah *interface steel* (baja).
2. *Thermomechanically Affected Zone (TMAZ)* atau daerah terpengaruh gaya mekanik dan panas. Pada daerah ini butir kristal yang terbentuk lebih rapat karena terpengaruh tekanan gesek dan tekanan tempa.
3. *Heat Affected Zone (HAZ)* atau daerah terpengaruh panas dimana pada daerah ini masih terpengaruh panas akibat pengelasan. Struktur mikro pada daerah ini hampir sama dengan struktur mikro pada logam induk atau *base metal*.
4. *Base Metal* (Logam Induk) merupakan daerah yang tidak terpengaruh panas masukan akibat proses pengelasan. Pada daerah ini struktur mikronya tidak berubah sama sekali. Struktur pada pipa baja terdiri dari struktur ferit dan perlit yang merupakan struktur dari logam baja karbon rendah. Struktur pada pipa *stainless steel* terdiri dari struktur ferit dan batas butir austenit yang merupakan struktur dari logam *stainless steel 304*.

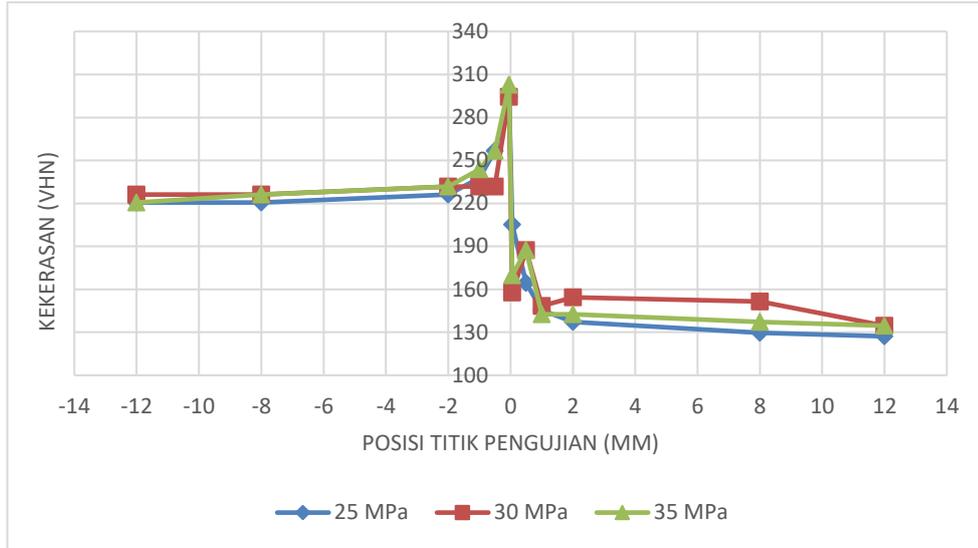
Semakin besar tekanan gesek maka daerah TMAZ pipa baja terbentuk rekristalisasi yang semakin halus. Semakin besar tekanan gesek maka daerah TMAZ pipa *stainless steel* yang terbentuk semakin sempit.

3.2 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk melihat nilai kekerasan pada daerah lasan, HAZ dan logam induk. Pada pengujian kekerasan ini diambil 12 titik di setiap variasi tekanan gesek. Posisi titik pengujian kekerasan dimulai dari titik -12, -8, -2, -1, -0.5, -0.05 dan 0.05, 0.5, 1, 2, 8, 12.



Gambar 6. Posisi Titik Pengujian Kekerasan

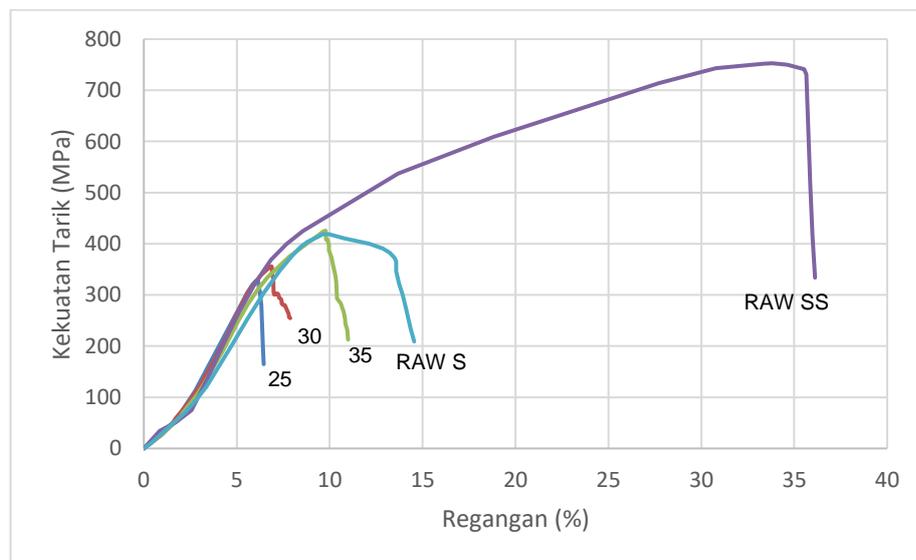


Gambar 7. Grafik Hasil Pengujian Kekerasan

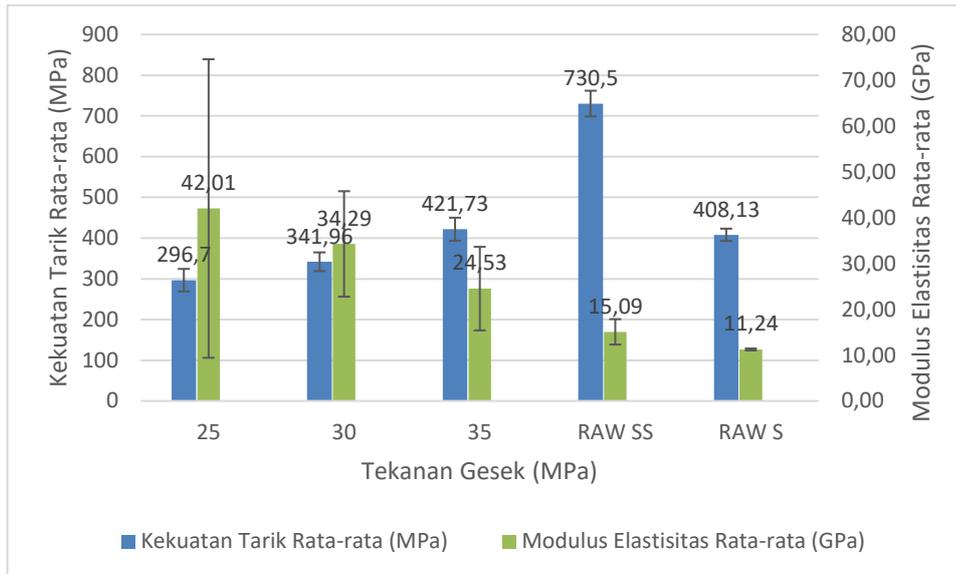
Gambar 7 menunjukkan hasil pengujian kekerasan dimana semakin besar tekanan gesek maka nilai kekerasannya juga akan meningkat pada daerah TMAZ. Secara umum nilai kekerasannya mengalami kenaikan pada daerah dekat sambungan. Nilai kekerasan terendah dihasilkan pada sambungan dengan tekanan gesek 25 MPa sebesar 294,3 VHN pada daerah TMAZ pipa *stainless steel*. Nilai kekerasan tertinggi dihasilkan sambungan dengan tekanan gesek 35 MPa sebesar 302,8 VHN pada daerah TMAZ pipa *stainless steel*. Hal ini dapat terjadi dikarenakan semakin tinggi tekanan gesek yang diberikan maka panas masukan yang dihasilkan juga akan semakin tinggi. Tingginya panas masukan dan pengaruh mekanik berupa penekanan tempa membuat struktur mikro pada daerah TMAZ menjadi lebih rapat sehingga nilai kekerasannya juga semakin meningkat.

3.3 Pengujian Tarik

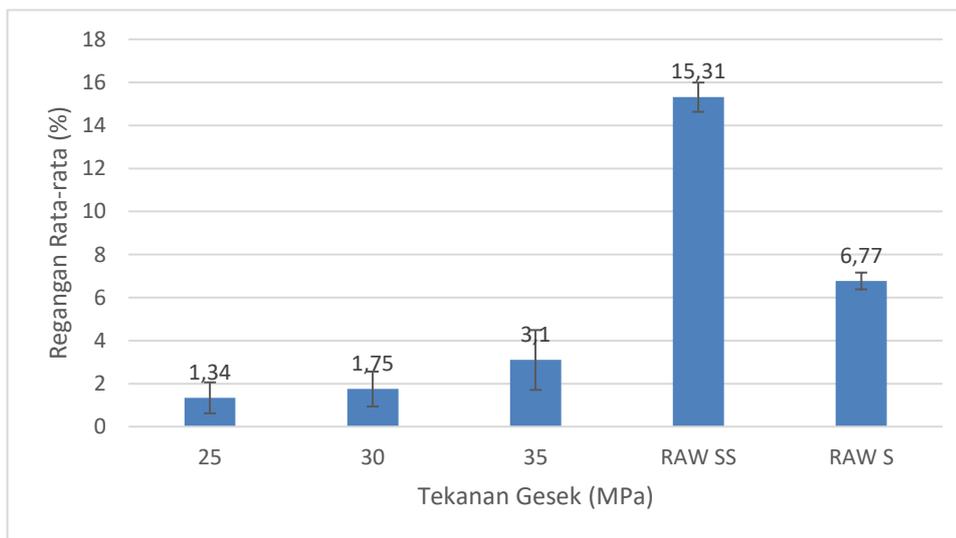
Pengujian tarik ini dilakukan untuk melihat kekuatan tarik sambungan pengelasan gesek pipa *stainless steel* – pipa baja. Pengujian dilakukan pada variasi tekanan gesek 25, 30 dan 35 MPa serta pada logam induk pipa *stainless steel* ASTM A312 TP304 dan pipa baja ASTM A53 Gr.A.



Gambar 8. Grafik Hasil Pengujian Tarik



Gambar 9. Diagram Kekuatan Tarik dan Modulus Elastisitas



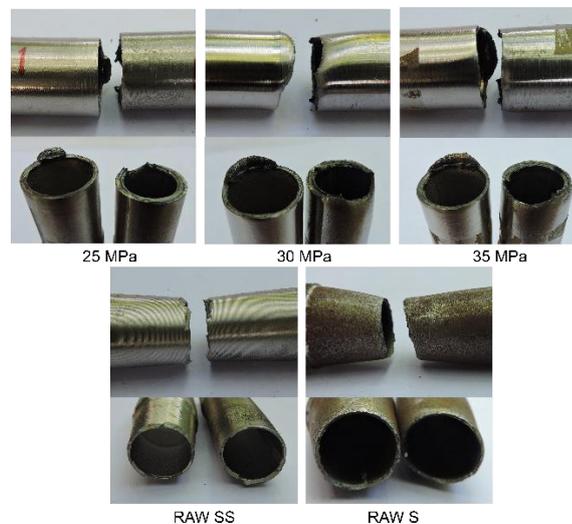
Gambar 10. Diagram Regangan Rata-rata Terhadap Variasi Tekanan Gesek

Dari gambar 9 menunjukkan hasil pengujian tarik pada setiap variasi tekanan gesek 25, 30 dan 35 MPa serta pada logam induk (Raw Material). Pada tekanan 25 MPa kekuatan tarik rata-ratanya sebesar 296,7 MPa. Kekuatan tarik ini mencapai 40,62% dari kekuatan tarik logam induk pipa *stainless steel*. Tekanan 30 MPa kekuatan tarik rata-ratanya meningkat mencapai 341,96 MPa. kekuatan tarik ini mencapai 46,81% dari logam induk pipa *stainless steel*. Tekanan 35 MPa menghasilkan kekuatan tarik rata-rata yang paling tinggi sebesar 421,73 MPa. Kekuatan tarik ini mencapai 57,73% dari logam induk pipa *stainless steel*.

Pada tekanan 35 MPa kekuatan tarik yang dihasilkan tinggi disebabkan karena pada struktur mikronya daerah TMAZ yang terbentuk hanya sedikit. Hal ini menyebabkan daerah getas pada sambungan juga sedikit dan struktur mikro pada daerah HAZ mirip dengan struktur mikro pada logam induk. Kemiripan ini menyebabkan sifat ulet dari logam induknya juga masih tinggi sehingga kekuatan tariknya juga tinggi. Hal ini didukung oleh nilai modulus elastisitasnya yang rendah dibandingkan dengan tekanan gesek 25 dan 30 MPa.

Pada tekanan 25 MPa sifat getas sambungan sangat tinggi, hal ini dapat dilihat dari grafik pengujian tarik (gambar 8) dimana grafiknya langsung menurun ketika mencapai kekuatan maksimal. Pada logam induk pipa *stainless steel* kekuatan tariknya lebih tinggi dibandingkan dengan logam induk pipa baja. Hal ini wajar karena *stainless steel* memang secara teori lebih kuat dibandingkan dengan baja.

Dilihat dari modulus elastisitasnya, variasi tekanan 25 MPa memiliki modulus elastisitas yang tinggi sebesar 42,01 GPa. Hal ini membuat tingkat kekakuan sambungan pada tekanan ini menjadi tinggi dan mudah patah. Pada tekanan 30 MPa modulusnya elastisitas menurun menjadi 34,29 GPa. Pada tekanan 35 MPa modulus elastisitas yang terbentuk hanya 24,53 GPa. Semakin besar tekanan gesek yang diberikan, maka kekakuan dari sambungan semakin kecil. Hal ini ditunjukkan dari modulus elastisitas rata-ratanya yang semakin menurun seiring bertambahnya tekanan gesek. Dari pengujian tarik diatas dapat diambil parameter optimal pengelasan yang baik yakni pada tekanan gesek 35 MPa.



Gambar 11. Foto Patahan Hasil Pengujian Tarik

Dilihat dari gambar 11 patahan yang terjadi pada variasi tekanan gesek 25, 30 dan 35 MPa tidak mengalami *necking* atau penyempitan area penampang. Hal ini menunjukkan sifat dari sambungan pengelasan gesek pipa *stainless steel* dengan pipa baja bersifat getas. Berbeda dengan patahan yang terjadi pada raw material pipa *stainless steel* dan raw baja yang mengalami *necking* sebelum terjadinya patahan. Hal ini menunjukkan bahwa sifat raw material pipa *stainless steel* dan raw material pipa baja bersifat ulet. Gambar 10 menunjukkan regangan rata-rata pada variasi tekanan gesek dan raw material. Tekanan gesek 25, 30 dan 35 MPa memiliki regangan yang kecil dibandingkan dengan regangan pada raw material. Hal ini membuktikan bahwa pada sambungan dengan tekanan gesek 25, 30 dan 35 MPa memiliki sifat getas.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tentang pengaruh variasi tekanan gesek terhadap struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik sambungan pipa *Stainless Steel* (Berputar) dengan pipa Baja (*Steel*) menggunakan metode *Continuous Drive Friction Welding (CDFW)* yang telah dilaksanakan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin besar tekanan gesek daerah TMAZ yang terbentuk pada daerah pipa *stainless steel* semakin sedikit. Semakin besar tekanan gesek daerah TMAZ pipa baja membentuk butiran yang semakin rapat.
2. Nilai kekerasan pada daerah dekat sambungan pipa *stainless steel* sebesar 294,3 VHN dan nilai kekerasan pada daerah dekat sambungan pipa baja sebesar 205,3 VHN diperoleh pada tekanan gesek 25 MPa. Nilai kekerasan pada daerah dekat sambungan pipa *stainless steel* sebesar 294,3 VHN dan

nilai kekerasan pada daerah dekat sambungan pipa baja sebesar 157,7 VHN diperoleh pada tekanan gesek 30 MPa. Nilai kekerasan pada daerah dekat sambungan pipa *stainless steel* sebesar 302,8 VHN dan nilai kekerasan pada daerah dekat sambungan pipa baja sebesar 169,7 VHN diperoleh pada tekanan gesek 35 MPa.

3. Hasil kekuatan tarik tertinggi sebesar 421,73 MPa didapat pada tekanan gesek 35 MPa. Hasil kekuatan tarik terendah sebesar 296,70 MPa didapat pada tekanan 25 MPa. Hasil kekuatan tarik semakin tinggi seiring dengan naiknya tekanan gesek.
4. Kekuatan tarik pada tekanan gesek 35 MPa mencapai 57,73% dari kekuatan tarik pipa *stainless steel* dan mencapai 103,33% dari kekuatan tarik pipa baja. Kekuatan tarik terendah pada tekanan gesek 25 MPa mencapai 40,62% dari kekuatan tarik pipa *stainless steel* dan mencapai 72,70% dari kekuatan tarik pipa baja.
5. Parameter optimal yang direkomendasikan untuk pengelasan gesek pipa *stainless steel* (berputar) dengan pipa baja adalah 35 MPa.

Daftar Pustaka

Journal:

- [1] Husodo, N., Sanyoto, B. L., Astono, H., Setyawati, S. B., Hidayat, R. (2015). Analisis Kekuatan Sambungan Pipa Baja Karbon dan Besi Cor Berbasis Teknologi Las Gesek (Friction Welding). *Jurnal Energi dan Manufaktur*, Vol. 8, 111-230.
- [2] Kimura, M., Ichihara, A., Kusaka, M., dan Kaizu, K. (2012). Joint Properties and Their Improvement of AISI 310S Austenitic Stainless Steel Thin Walled Circular Pipe Friction Welded Joint. *Materials and Design*, Vol.38, 38-46.
- [3] Kumar, M. V., dan Balasubramanian, V. (2014). Microstructure and Tensile Properties of Friction Welded SUS 304HCu Austenitic Stainless Steel Tubes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 113, 25-31.
- [4] Laksono, H. W dan Sugiyanto. (2017). Pengujian Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Pada Sambungan Pengelasan Gesek Sama Jenis Baja ST 60, Sama Jenis AISI 201 dan Beda Jenis Baja ST 60 dengan AISI 201. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, Vol.5, 124-136.
- [5] Nugroho, A. W., Suwanda, T., & Serena, S. A. (2016). Mikro Struktur dan Kekerasan Sambungan Pengelasan Gesek Disimilar Pipa Tembaga/Kuningan (Cu/Cu-Zn). *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*, Vol.19, 68-74.
- [6] Sanyoto, B. L., Husodo, N., Setyawati, S. B., dan Mursid, M. (2012). Penerapan Teknologi Las Gesek (Friction Welding) Dalam Proses Penyambungan Dua Buah Pipa Logam Baja Rendah. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, Vol.5, 51-60.

Skripsi:

- [1] Mardiyono, A. (2011). Pengujian Sambungan Pada Proses Pengelasan Gesek Beda Logam Antara ST 60 dengan AISI 304. *Skripsi. Teknik Mesin Universitas Diponegoro*, 69-80.
- [2] Tiwan. (2005). Penyambungan Baja AISI 1040 Batang Silinder Pejal dengan Friction Welding. *Skripsi. Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Yogyakarta*.

Standard:

- [1] Japanese Industrial Standard. (1998). *JIS Z 2201: Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials*. Tokyo: Japanese Industrial Standard.