

Pengaruh Temperatur Pelat Landasan Selama Proses *Friction Stir Welding* Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Lembaran HDPE

Agus Setiawan¹⁾, Yudy Surya Irawan²⁾, Anindito Purnowidodo²⁾

Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang¹⁾

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang²⁾

Jl. MT.Haryono 167 Malang 65145, Indonesia

E-Mail: agussetiawan_72@yahoo.com

Abstract

The purpose of this study was to determine the weld ability of HDPE sheets (High Density Polyethylene) through the method of welding FSW (Friction Stir Welding). FSW is a new welding process, where joined of the material occurs in the solid state. Samples were welded with vertical milling CNC machines, while the type of connection is a butt joint. This study used three process parameters, two parameters are combined and one parameter value is constant, the parameters combined are temperature backing plate (30; 70; 110 and 150 °C) and the welding tool rotation speed (2200; 2300 and 2400 rpm), while the parameters with constant value is the welding speed (30 mm / min). In this research experiment conducted observations and analysis of surface textures welded joints, weld surface temperature during the process in front of and behind the welding tools, macro-structure of the welded joints, the maximum tensile strength and fracture tensile test results. From the results of this study was obtained that temperature backing plate during FSW process affects the maximum tensile strength and homogeneity of HDPE sheets welded joints. The maximum tensile strength of welded joints higher is 28.52 MPa or 95.07% of the maximum tensile strength of HDPE material, the maximum ultimate tensile strength values were obtained on the condition temperature backing plate $t = 150$ °C and the welding tool rotation speed $n = 2300$ rpm. Heating the material HDPE by backing plate during FSW process insulator properties of the material that is an obstacle in the process of forming a perfect weld can be resolved.

Keyword: temperatur backing plate, friction stir welding, the tensile strength of welded joints, HDPE sheets.

PENDAHULUAN

Latar Belakang Masalah

Beberapa tahun terakhir ini, suatu studi penerapan FSW untuk material plastik telah dilakukan, tetapi untuk mendapatkan kekuatan tarik dan homogenitas yang tinggi dari sambungan las adalah tugas yang sangat sulit. Material plastik merupakan isolator panas murni atau nilai konduktivitas panasnya rendah, nilai konduktivitas panas yang rendah merupakan kendala dalam proses FSW karena diketahui bahwa konduktivitas panas merupakan faktor penentu cepat atau tidaknya proses pelunakan material di dekat *pin* [1]. Terdapat beberapa penelitian yang menerapkan FSW untuk pengelasan material plastik, yaitu pada 2005, Arici dan Sinmaz [2] mempelajari pengaruh *tool double pass* pada FSW dari *polyethylene*, dan menyatakan

bahwa *double pass* memungkinkan meningkatkan sifat mekanik sambungan. Sedangkan Kiss dan Czigany, 2007 [3] mempelajari aplikasi FSW dalam material *polymer* dan menyatakan bahwa teknologi FSW dapat diterapkan pada material *polymer*, tetapi optimasi parameter dan geometri alat masih perlu banyak perbaikan. FSW dari lembaran *polyethylene* dan menyatakan bahwa teknologi FSW dapat digunakan untuk penyambungan material *thermoplastic*, tetapi kualitas sambungan tidak mencukupi karena homogenitas tidak memuaskan, sehingga menyebabkan suatu *embrittlement* pada sambungan diteliti oleh Squeo *et al.*, 2009 [1]. Yang terakhir Aydin, 2010 [4] mempelajari pengaruh parameter pengelasan dan *pre-heating* pada FSW terhadap material *UHMW-polyethelene* dan menyatakan bahwa dengan perlakuan *pre-heating* pada temperatur

tertentu menghasilkan sifat mekanis maupun homogenitas yang lebih baik dari pada tanpa perlakuan *pre-heating*.

Perlu adanya penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan kekuatan tarik dan tingkat homogenitas sambungan las dari material plastik. Untuk menindaklanjuti penelitian sebelumnya maka pada penelitian ini dilakukan modifikasi proses *friction stir welding* terhadap material plastik yaitu dengan pengkondisian temperatur pelat landasan selama proses *friction stir welding*. Proses pengkondisian temperatur pelat landasan pada penelitian ini tidak sama dengan proses *pre-heating* pada penelitian sebelum ini yaitu oleh [4], yang membedakan adalah proses pemanasannya, dimana dalam penelitian ini material dipanasi oleh pelat landasan selama proses pengelasan dan temperatur pelat landasan dikontrol stabil, sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Aydin [4] menggunakan pelat landasan dengan memanasi material sampai temperatur tertentu, proses ini dilakukan sebelum proses *friction stir welding*. Dengan proses pengkondisian temperatur pelat landasan selama proses *friction stir welding* temperatur material menjadi lebih stabil sehingga konduktivitas panas material plastik yang merupakan kendala dalam proses pelunakan material di dekat *pin* dapat teratasi.

Tujuan dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh temperatur pelat landasan selama proses *friction stir welding* terhadap kekuatan tarik maksimum dan homogenitas sambungan las lembaran HDPE.

TINJAUAN PUSTAKA

Friction Stir Welding

Friction Stir Welding (FSW) adalah suatu proses pengelasan terbaru, dimana penggabungan terjadi dalam keadaan padat (*solid state*) dan dalam proses tersebut tanpa diperlukan bahan tambah. FSW dikembangkan dan dipatenkan oleh *Welding Institute* (TWI, *Cambridge*, Inggris) pada tahun 1991.[5]

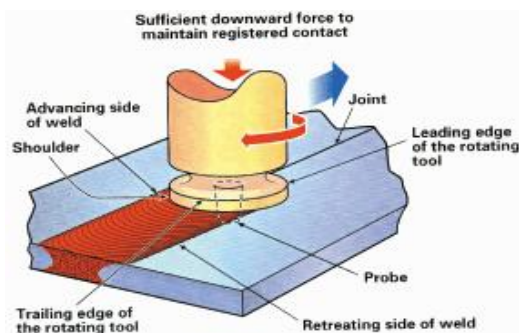
Prinsip Operasi Friction Stir Welding

Dalam proses *friction stir welding*, alat las yaitu silinder *shoulder* dan *probe* (*pin*) yang berulir/tanpa ulir diputar pada kecepatan rotasi dan *feeding* (kecepatan pengelasan) yang konstan terhadap garis sambungan antara dua buah lembaran pelat atau material. Bagian-bagian lembaran pelat tersebut harus dalam keadaan kaku untuk itu dijepit pada sebuah bidang dukungan, tujuan prosedur ini adalah mencegah posisi pertemuan

sambungan tidak terpisah selama proses penyambungan. Panjang *probe/ pin* yang diperlukan adalah kurang sedikit dari kedalaman las dan *shoulder* harus berada dalam kontak langsung dengan permukaan benda kerja. *Pin* tersebut kemudian dipindahkan terhadap benda kerja atau sebaliknya.[6]

Pada proses *friction stir welding* panas dihasilkan oleh gesekan antara alat las (*shoulder* dan *pin*) dengan benda kerja. Panas ini, bersama dengan panas yang dihasilkan oleh proses pencampuran mekanis dan panas adiabatik dalam material, menyebabkan bahan mengalami proses pengadukan dan melunak tanpa mencapai temperatur leleh (0.6 sampai dengan 0.8 temperatur leleh).[7]

Proses pelunakan ini memungkinkan alat melintas sepanjang garis pengelasan. Pada proses perpindahan tersebut bagian depan dari *pin* (*face of the pin*) dibantu oleh profil khusus *pin* (ulir), gaya memplastisasikan material ke belakang *pin* sambil menerapkan gaya tanpa substansial untuk mengkonsolidasikan material las. Pengelasan material difasilitasi oleh deformasi plastik dalam keadaan padat dan melibatkan kristalisasi dinamis dari bahan dasar.[8]



Gambar 1. Diagram skematik dari proses FSW: Dua benda kerja disambung secara *butt joint*, dengan *tool* (*shoulder* dan *probe*).

Sumber: Kallee, 2006

Parameter Kecepatan Rotasi dan Kecepatan Traverse Alat

Ada dua parameter kecepatan alat yang harus dipertimbangkan dalam proses *friction stir welding* yaitu seberapa cepat alat berputar dan seberapa cepat alat melintasi antarmuka dari material yang disambung. Kedua parameter tersebut mempunyai peranan yang cukup penting dan harus dipilih dengan hati-hati untuk memastikan siklus pengelasan berhasil dan efisien. Hubungan antara kecepatan pengelasan dan masukan panas selama pengelasan sangat kompleks, tetapi secara umum dapat dikatakan bahwa

peningkatan kecepatan rotasi atau menurunkan kecepatan pengelasan (*traverse*) akan menghasilkan lasan lebih panas. Untuk menghasilkan lasan yang sukses maka perlu suatu kondisi dimana material sekitar alat ini cukup panas untuk mengaktifkan aliran plastis *extensive* dan meminimalkan gaya yang bekerja pada alat.

METODE PENELITIAN

Proses *friction stir welding* dikerjakan dengan mesin CNC milling vertikal Dahlih MCV-1020BA. Lembaran *high density polyethylene* (HDPE) warna putih dengan tebal 5,26 mm digunakan sebagai sampel dalam penelitian ini. Sampel dipotong dengan ukuran 80 x 120 mm, untuk setiap proses pengelasan dua sampel diikat pada *fixture* dengan konfigurasi *butt joint* tanpa celah. Alat las menggunakan baja AISI H13 dengan diameter *shoulder* 20 mm dan diameter pin 5 mm, dalam proses *set-up* jarak minimum antara permukaan pin datar dengan permukaan bawah sampel 0,2 mm. Temperatur pelat landasan dikondisikan stabil selama proses dengan pengontrol temperatur sedangkan pengukuran temperatur permukaan lasan di depan dan belakang alat las selama proses diukur oleh *infra red thermometer* pada posisi sambungan yang telah ditentukan.

Parameter dalam proses yaitu temperatur pelat landasan dan kecepatan rotasi alat las dengan nilai masing-masing variasi sebagai berikut: temperatur pelat landasan (30°, 70°, 110° dan 150°C) dan kecepatan rotasi (2200, 2300 dan 2400 rpm). Sedangkan kecepatan pengelasan (*traverse*) pada semua perlakuan proses *friction stir welding* ditentukan sama yaitu 30 mm/ menit.

Beberapa hal yang diamati yaitu tekstur permukaan sambungan las, temperatur permukaan lasan di depan dan belakang alat las, kekuatan tarik maksimum dan homogenitas sambungan las.

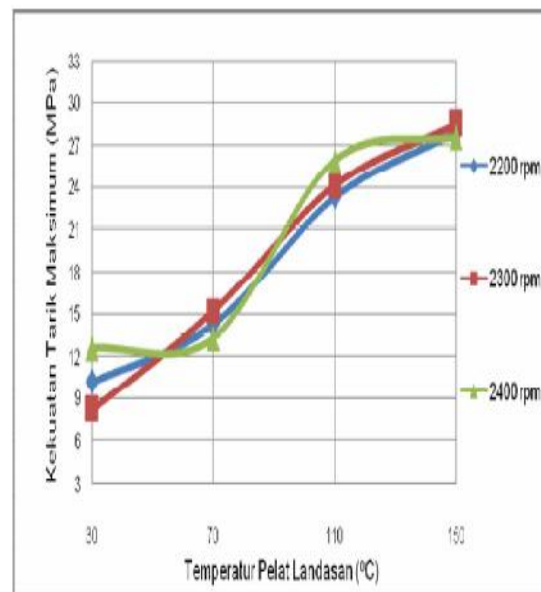
Standart pengujian tari hasil sambungan las lembaran HDPE menggunakan ASTM D638 Type I modifikasi yaitu menambahkan *necking* pada bagian tengah sambungan las, dimana dimensi spesimen untuk uji tarik adalah 165 x 19 mm.

Hasil dan Pembahasan Kekuatan Tarik Maksimum Sambungan Las Lembaran HDPE

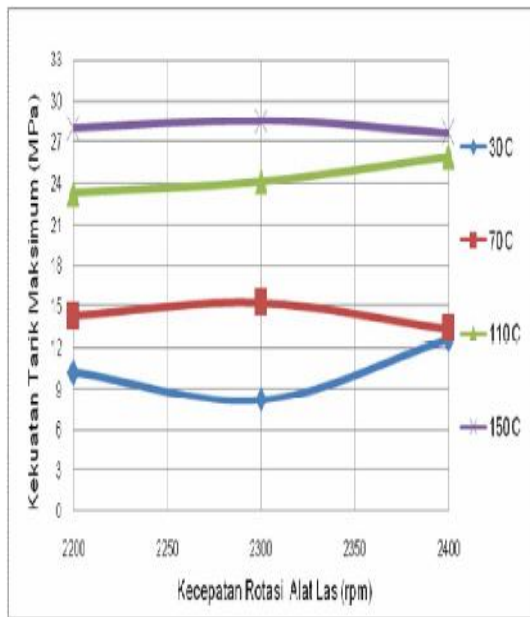
Gambar 2. menunjukkan hubungan antara kekuatan tarik maksimum dan temperatur pelat landasan. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa semakin

besar temperatur pelat landasan maka kekuatan tarik maksimumnya juga meningkat, ini terjadi pada semua variasi putaran per menit (rpm) alat las. Tidak ada pengaruh kecepatan rotasi alat las yang signifikan terhadap kekuatan tarik maksimum, hal ini bisa ditunjukkan pada gambar 3. Dari gambar 4 dan 5 kecepatan rotasi alat las tidak mempunyai pengaruh pada kekuatan tarik maksimum. Oleh karena itu, dapat dinyatakan bahwa hanya temperatur pelat landasan saja yang mempengaruhi kekuatan tarik maksimum.

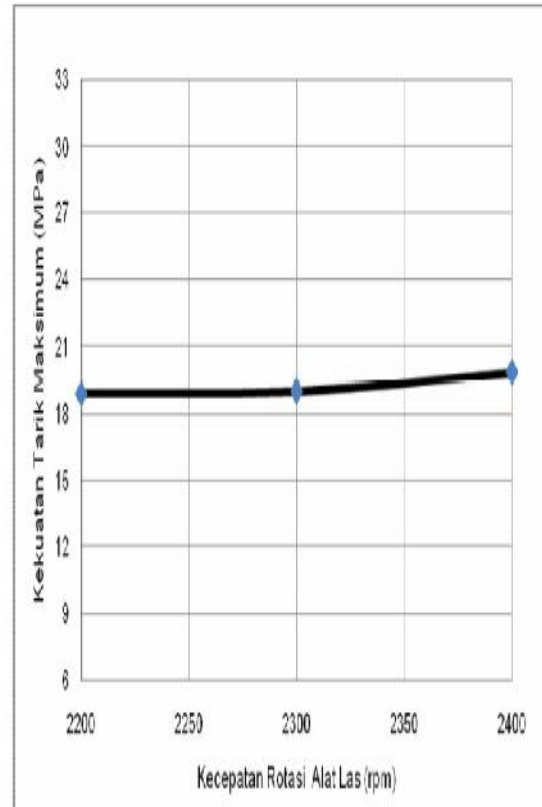
Dari gambar 2, 3, 4 dan 5 menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik maksimum sambungan las lembaran HDPE untuk kondisi temperatur pelat landasan $t = 30^\circ\text{C}$ pada semua nilai kecepatan rotasi alat las adalah paling rendah secara rata-rata. Sedangkan untuk kondisi temperatur pelat landasan $t = 150^\circ\text{C}$ pada semua nilai kecepatan rotasi adalah yang tertinggi secara rata-rata.



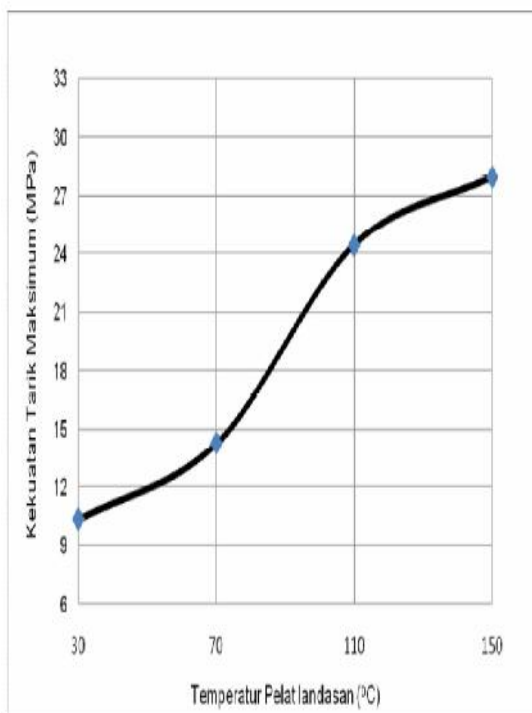
Gambar 2. Hubungan temperature pelat landasan dengan kekuatan tarik maksimum pada masing-masing kecepatan rotasi alat las.



Gambar 3. Hubungan kecepatan rotasi dengan kekuatan tarik maksimum pada masing-masing temperatur pelat landasan.



Gambar 5. Hubungan kecepatan rotasi dengan kekuatan tarik maksimum rata-rata dari semua temperatur pelat landasan.



Gambar 4. Hubungan temperatur pelat landasan dengan kekuatan tarik maksimum rata-rata dari semua kecepatan rotasi alat las.

Selama proses *friction stir welding* pada kondisi pelat landasan $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ atau kondisi pelat landasan tanpa perlakuan sifat material HDPE sebagai isolator masih menjadi penghambat proses merambatnya panas hasil gesekan antara alat las (*shoulder* dan *pin*) dengan material di daerah sambungan. Panas hasil gesekan tersebut tidak mudah merambat pada daerah material disekitar alat las, hal ini ditunjukkan pada gambar 6(a) yaitu dengan terdapatnya jarak atau range temperatur yang lebar antara temperatur permukaan lasan di depan dan belakang alat las, dimana temperatur permukaan lasan di depan alat las dinyatakan dengan garis biru dan temperatur permukaan lasan di belakang alat las dinyatakan dengan garis merah. Dengan semakin meningkatnya temperatur pelat landasan sifat isolator dari material yang menghambat proses merambatnya panas hasil gesekan antara alat las dan material sedikit demi sedikit berkurang pengaruhnya hal ini ditunjukkan dari gambar 6 bahwa jarak atau range temperatur antara temperatur permukaan lasan di depan dan belakang alat las semakin pendek.

Pada kondisi pelat landasan $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, panas yang dihasilkan oleh gesekan alat las

dengan material di sisi sambungan telah diketahui tidak mudah merambat di sekitar alat las hal ini mengakibatkan proses pelunakan material di sekitar alat las tidak mudah terjadi. Material menjadi bersifat kurang plastis sehingga proses pergerakan material dari satu sisi ke sisi yang lain menjadi tidak mudah. Proses ekstrusi dan penempaan yang merupakan kombinasi dari rotasi dan gerak *traverse* (gerak melintas) alat las dalam proses *friction stir welding* untuk menghasilkan sambungan las yang padat berjalan tidak sempurna. Tetapi dengan pengkondisian pelat landasan yang semakin meningkat mengakibatkan proses pelunakan material di sekitar alat las semakin mudah, material semakin plastis, proses pergerakan material semakin mudah, sehingga proses ekstrusi dan penempaan yang merupakan kombinasi dari rotasi dan gerak *traverse* (gerak melintas) alat las dalam proses *friction stir welding* untuk menghasilkan sambungan las yang padat berjalan semakin sempurna.

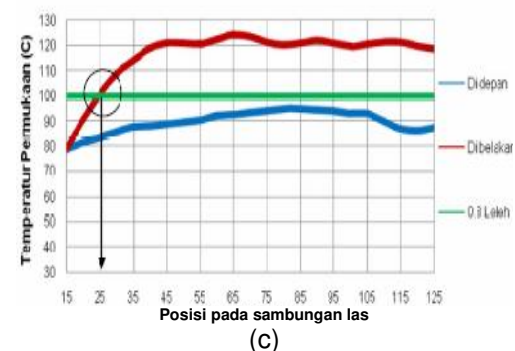
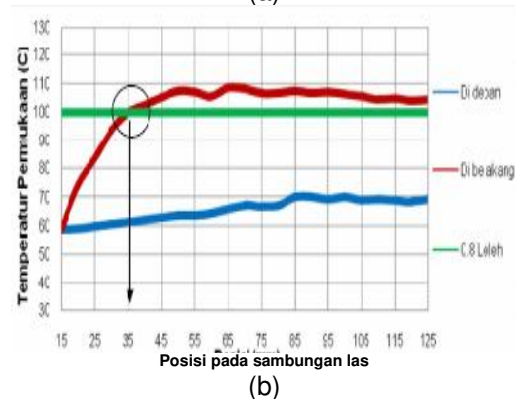
Bila diamati dari gambar 2 dan 6 pengaruh semakin besar temperatur pelat landasan akan meningkatkan kekuatan tarik maksimum sambungan las dan menurunkan jarak atau *range* temperatur permukaan lasan di depan dan belakang alat las.

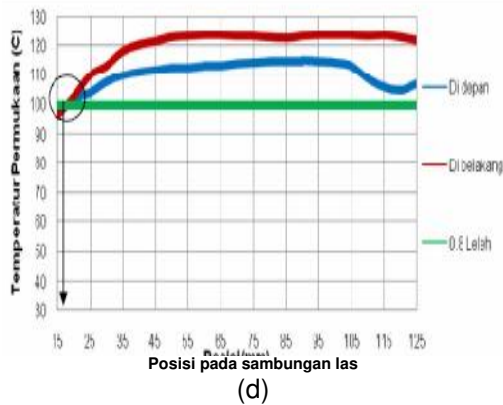
Ditinjau dari gambar 6 terbentuknya lebar kampuh las yang tidak diharapkan (lebar sama dengan diameter *pin*) mulai terbentuk dari posisi awal pengelasan (posisi 15 mm) sampai garis temperatur permukaan lasan di belakang alat las (garis merah) memotong garis temperatur 0.8 temperatur leleh (garis hijau), pada lebar kampuh las yang tidak diharapkan ini terdeteksi terjadinya cacat las porositas pada sisi *advancing*. Sedangkan untuk lebar kampuh las yang diharapkan (lebar sama dengan diameter *shoulder*) mulai terbentuk dari awal terjadinya perpotongan antara garis temperatur permukaan lasan di belakang alat las (garis merah) dengan garis 0.8 temperatur leleh (garis hijau) sampai akhir pengelasan (posisi 125 mm). Dari gambar 4.5 (a) menunjukkan bahwa sifat isolator dari material HDPE mengakibatkan terjadinya fluktuasi temperatur pada posisi setelah terjadinya perpotongan garis temperatur permukaan lasan di belakang alat las dengan garis 0.8 temperatur leleh, dimana proses fluktuasi tersebut terdeteksi beberapa kali memotong garis 0.8 temperatur leleh. Fluktuasi temperatur ini memicu terjadinya cacat las permukaan yang berbentuk celah (lembah) dengan kedalaman bervariasi. Peningkatan temperatur pelat landasan mengakibatkan posisi perpotongan antara garis temperatur permukaan lasan di

belakang alat las dengan garis temperatur 0.8 temperatur leleh semakin maju sehingga kampuh las yang diharapkan proses terbentuknya menjadi bergeser ke posisi yang lebih awal. Dampak lain dari peningkatan temperatur pelat landasan adalah fluktuasi temperatur setelah posisi perpotongan tidak sampai memotong garis 0.8 temperatur leleh sehingga cacat las celah kedalamannya semakin dangkal bahkan mulai kondisi temperature pelat landasan $t = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ sudah mulai tidak terdeteksi, hal ini dapat diamati pada gambar 6(b), (c) dan (d).



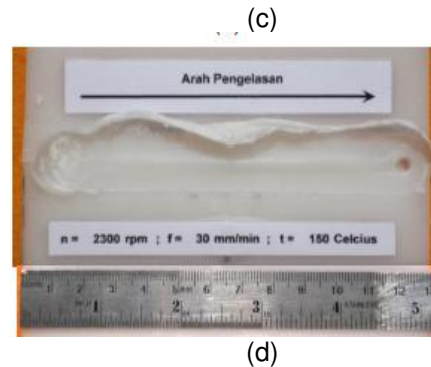
Posisi pada sambungan las (mm)
(a)





Gambar 6. Temperatur permukaan las di depan dan belakang alat las pada temperatur pelat landasan (a) $t = 30^{\circ}\text{C}$ (b) $t = 70^{\circ}\text{C}$ (c) $t = 110^{\circ}\text{C}$ dan (d) $t = 150^{\circ}\text{C}$.

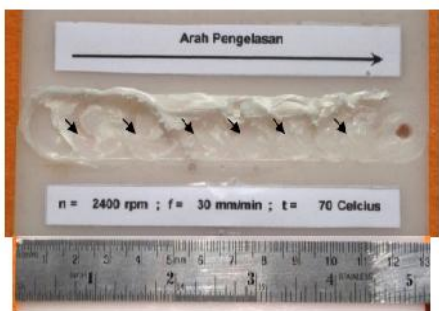
Dari Gambar 7. menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya temperatur pelat landasan mengakibatkan tekstur permukaan hasil lasan semakin sempurna, hal ini ditunjukkan dengan semakin menghilangnya cacat las permukaan (cacat las porositas pada sisi *advancing* dan cacat las yang berbentuk celah) serta dimensi lebar kampuh las terlihat tidak seragam di sepanjang sambungan las.



Gambar 7. Tekstur permukaan hasil lasan lembaran HDPE pada pada temperatur pelat landasan (a) $t = 30^{\circ}\text{C}$ (b) $t = 70^{\circ}\text{C}$ (c) $t = 110^{\circ}\text{C}$ dan (d) $t = 150^{\circ}\text{C}$.



(a)

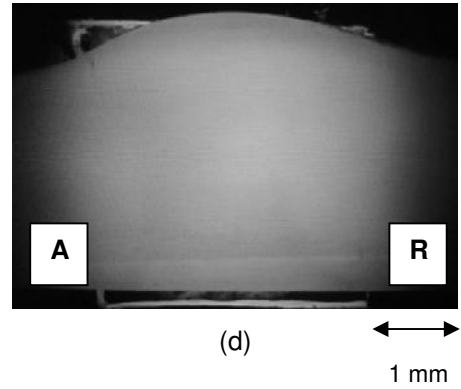
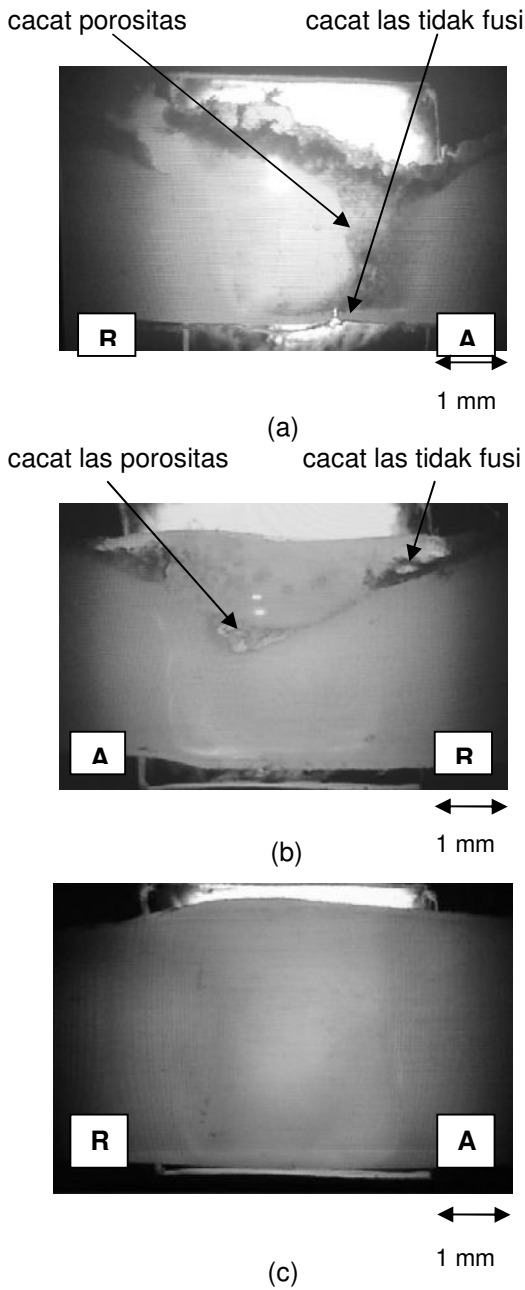


(b)

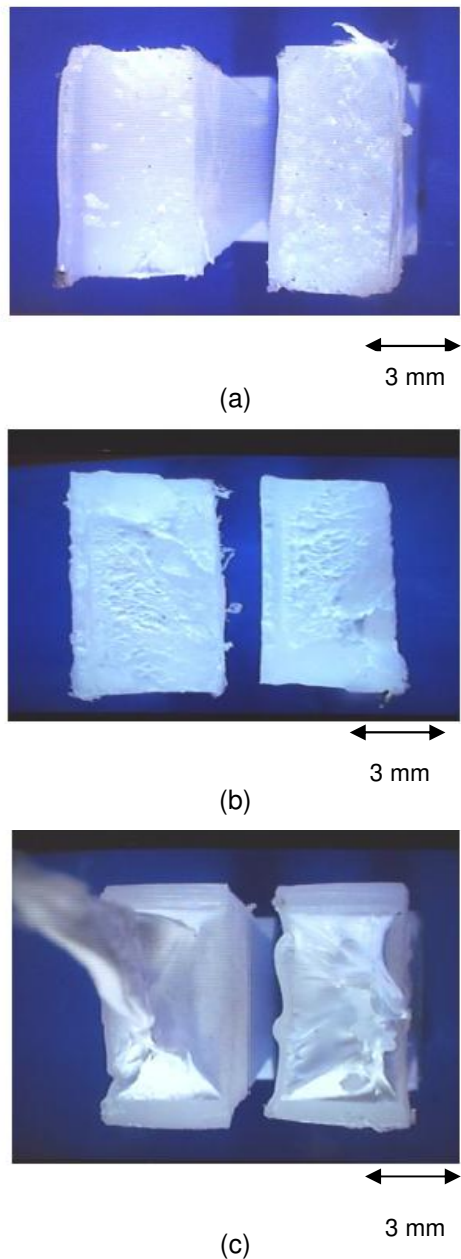
Pada Gambar 8. menunjukkan bahwa pada struktur makro penampang melintang sambungan las pada kondisi temperatur pelat landasan $t = 30$ dan 70°C terlihat cacat las porositas dan cacat las tidak fusi. Sedangkan untuk tingkat homogenitasnya untuk kondisi temperatur pelat landasan $t = 30, 70$ dan 110°C terlihat masih belum seragam, hal ini ditunjukkan densitas sambungan las pada daerah lintasan alat las dan sisi *advancing* (A) masih lebih rendah (terlihat terang) dari pada densitas material induk. Dengan meningkatnya temperatur pelat landasan maka cacat las dalam semakin kecil muncul dan homogenitas sambungan lasnya semakin meningkat. Homogenitas sambungan las benar-benar sama dengan material induk terjadi pada temperature pelat landasan $t = 150^{\circ}\text{C}$.

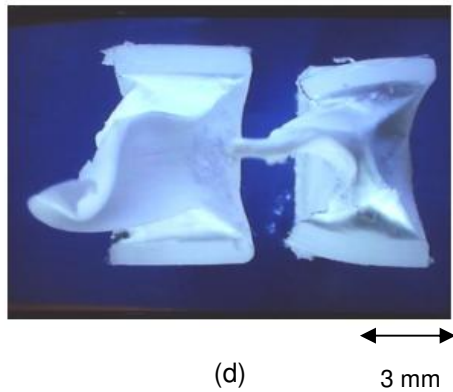
Pada Gambar 9. terlihat bahwa penampang patahan spesimen uji tarik sambungan las pada kondisi temperatur pelat landasan $t = 30^{\circ}\text{C}$ tekstur patahannya halus tanpa ada serabut, sehingga dapat diidentifikasi bahwa sambungan lasnya adalah getas atau tidak ulet. Untuk kondisi temperatur pelat landasan $t = 70^{\circ}\text{C}$ penampang patahannya terdapat dua daerah yang teksturnya berbeda, yaitu tekstur halus dan serabut, sehingga dapat diidentifikasi bahwa sifat sambungan lasnya adalah antara getas dan ulet. Untuk kondisi pelat landasan $t = 110^{\circ}\text{C}$ dan 150°C patahannya seragam dan halus.

= 110 dan 150 °C penampang patahannya teksturnya elastis, sehingga dapat diidentifikasi bahwa sifat sambungan lasnya adalah ulet. Dari gambar 9 dapat terlihat bahwa peningkatan temperatur pelat landasan berpengaruh terhadap keelastisan sambungan las, semakin tinggi temperatur pelat landasan semakin elastis sambungan las yang dihasilkan.



Gambar 8. Struktur makro penampang melintang sambungan las lembaran HDPE pada temperatur pelat landasan (a) $t = 30^{\circ}\text{C}$ (b) $t = 70^{\circ}\text{C}$ (c) $t = 110^{\circ}\text{C}$ dan (d) $t = 150^{\circ}\text{C}$.





Gambar 9. Penampang patahan hasil uji tarik sambungan las lembaran HDPE dengan kondisi temperatur pelat landasan (a) $t = 30^{\circ}\text{C}$ (b) $t = 70^{\circ}\text{C}$ (c) $t = 110^{\circ}\text{C}$ dan (d) $t = 150^{\circ}\text{C}$.

Parameter Temperatur Pelat Landasan dan Kecepatan Rotasi Alat Las yang Menghasilkan Kekuatan Tarik Maksimum Sambungan Las Lembaran HDPE yang Tertinggi

Berdasarkan gambar 2 dan 3 menunjukkan bahwa parameter dari pelat landasan dan kecepatan rotasi alat las yang menghasilkan kekuatan tarik maksimum sambungan las lembaran HDPE yang tertinggi adalah pada kondisi temperatur pelat landasan $t = 150^{\circ}\text{C}$ dan kecepatan rotasi alat las $n = 2300$ rpm. Adapun hasil kekuatan tarik maksimum sambungan las lembaran HDPE yang tertinggi rata-ratanya adalah 28,52 MPa atau 95,07% dari kekuatan tarik maksimum material HDPE, dimana kekuatan tarik maksimum dari material HDPE adalah 30 MPa. Kekuatan tarik maksimum yang samadengan material HDPE tanpa sambungan pada kondisi optimum belum bisa tercapai, hal ini terjadi karena proses pengelupasan sebagian material di sepanjang sambungan oleh putaran tinggi dari alat las, sehingga mengurangi luas penampang melintang di sisi *retreating* sambungan las.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meningkatnya temperatur pelat landasan mengakibatkan kekuatan tarik maksimum sambungan las lembaran HDPE semakin meningkat.
2. Meningkatnya temperatur pelat landasan mengakibatkan homogenitas sambungan las lembaran HDPE semakin meningkat.
3. Kondisi temperatur pelat landasan dan kecepatan rotasi alat las yang menghasilkan kekuatan tarik maksimum

dengan nilai tertinggi adalah nilai temperatur pelat landasan $t = 150^{\circ}\text{C}$ dan kecepatan rotasi alat las $n = 2300$ rpm adapun hasil kekuatan tarik maksimum rata-ratanya 28,52 MPa (95,07% dari kekuatan tarik maksimum material HDPE).

Saran

Adapun saran dalam menindaklanjuti penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk variasi temperatur pelat landasan yang lebih besar dari 150°C dengan tujuan mengetahui kondisi optimum dari hubungan temperatur pelat landasan dengan kekuatan tarik maksimum.
2. Adanya penyempurnaan alat terutama pada material pelat landasan, agar tidak terjadi penempelan material HDPE pada pelat landasan selama proses *friction stir welding* dengan kondisi temperatur pelat landasan di atas 150°C .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Squeo, E., A., Bruno, G., Guglielmotti, A., Quadrini, F. 2009. *Friction Stir Welding of Polyethylene Sheets*, The Annals of "Dunarea De Jos" University of Galaty Fascicle V, Technologies Machine Building, ISSN 1221-4566: 241-246.
- [2] Arici, A., Sinmaz, T. 2005. *Efect of Double Passes of the Tool on Friction Stir Welding of Polyethylene*, Journal of Material Science. 40: 3313-3316.
- [3] Kiss, Z., Czigany, T. 2007. *Applicability of Friction Stir Welding in Polymeric Material*, Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering. 51/1: 15-18.
- [4] Aydin, M. 2010. *Effects of Welding Parameter and Pre-Heating on the Friction Stir Welding of UHMW Polyethylene*, Polymer-Plastics Technology and Engineering. 49:6, 595-601.
- [5] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G, TempleSmith, P., Dawes, CJ. 1991. *Friction-stir butt welding*, GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203.
- [6] Kallee, S.W. 2006. *Friction Stir Welding at TWI*
- [7] Li, Y., Murr, LE., McClude, JC., *Flow visualization ang residual microstructures associated with the friction stir welding of 2024 aluminium alloy to 6061 aluminium*, Materail Science and Engineering, 1999, Vol. 271 No 1-2. Pp. 213-223.

- [8] Jeff, D., Carter, B., Lawless, K., Nunes, A., Russell, C., Suites, M., Shcneider J. 2008. *A Decade of Friction Stir Welding R&D at NASA's Marshall Space Flight Center and a Glance into Future.*