

Pengaruh Kecepatan Putar *Tool* dan Sudut *Shoulder* Sambungan *Friction Stir Spot Welding* pada Bahan Polypropylene

(The Effect of Tool Speed and Shoulder Angle on the Mechanical Properties of Polypropylene Friction Stir Spot Welded Joint)

ARIS WIDYO NUGROHO, MUHAMMAD RIFAI DWI SAPUTRA, CAHYO BUDIANTORO

ABSTRAK

Penyambungan bahan thermoplastic polypropilen dengan teknik Friction stir spot welding (FSSW) telah banyak dilakukan. Walaupun kekuatannya sudah mencukupi, masih dihasilkan keyhole dan bekas shoulder yang cukup besar karena penggunaan ukuran soulder dan pin besar. Penelitian ini menginvestigasi sambungan polypropylene dengan teknik FSSW menggunakan shoulder dan pin lebih kecil pada geometri shoulder yang berbeda. Penelitian diawali dengan pemotongan lembaran polypropylene dengan panjang 150mm, lebar 30mm dan tebal 5mm. Sambungan tumpang sesuai dengan standar EN 12814-2 digunakan dalam penyambungan ini. Proses penyambungan dilakukan pada kecepatan putar 985, 1660, 2350 rpm dengan dua jenis tool (*shoulder angle* 0° dan 5°). Sambungan diamati struktur makro, kekerasan dan kapasitas beban tariknya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua sambungan memiliki kegagalan getas. Seiring bertambahnya sudut *shoulder* dan kecepatan putar tool, ukuran *nugget* dan *welding zone* meningkat, sehingga meningkatkan kapasitas beban tarik mencapai 2116 N. Geometri *tool* 2 berpotensi untuk dapat diaplikasikan dalam sambungan FSSW.

Kata kunci: FSSW, polypropylene, sudut shoulder, kapasitas beban tarik

ABSTRACT

The joining of thermoplastic polypropylene material using the Friction stir spot welding (FSSW) technique has been developed. Although the strength is sufficient, it still produces a large keyhole and shoulder marks due to the use of a large shoulder and pin size. This research investigates polypropylene joint with the FSSW technique using smaller shoulders and pins on different shoulder geometries. The research began by cutting of polypropylene sheets into 150 mm long and 30 mm wide and 5 mm thick. Specimens according to EN 12814-2 were used in this welding joint. The welding process is carried out at rotational speeds of 985, 1660, 2350 rpm with two types of tools (shoulder angle of 0° and 5°). The welding joint was then observed for macrostructure, hardness, and tensile load-bearing capacity. The results showed that all welding joints had a brittle failure. The increasing of the shoulder angle and the rotational speed increase the nugget size and welding zone thickness resulting in a higher tensile load-bearing capacity which reaches up to 2116 N. The tool with the geometric being used has the potential to be applied in the FSSW joint.

Keywords: FSSW, shoulder angle, polypropylene, tensile load bearing capacity

PENDAHULUAN

Spot welding merupakan salah satu teknik pengelasan yang umum diaplikasikan dalam industri otomotif (Aslanlar et al., 2008). Proses pengelasan ini banyak digunakan untuk

menyambung lembaran logam karena memiliki keunggulan pada efisiensi pengelasan dan kesesuaian untuk otomatisasi (Goodarzi et al., 2009). Tren global mendorong industri otomotif untuk memproduksi kendaraan yang lebih ringan, lebih aman, lebih ramah lingkungan dan

lebih murah (Blawert et al., 2004). Pengurangan berat kendaraan dapat diperoleh dengan mengganti baja konvensional dan besi cor dengan baja *advanced* yang berkekuatan tinggi dan material ringan, seperti aluminium, magnesium, dan komposit polimer yang diperkuat (Davies, 2003, Cole and Sherman, 1995). Namun, bahan-bahan ini memiliki karakteristik kemampuan las yang terbatas sehingga masih terbuka peluang untuk dilakukan peningkatan dan perbaikan baik melalui proses pengelasan konvensional maupun teknik pengelasan yang dikembangkan belakangan (Matsuyama, 2007).

Tahun 2001, didasarkan teknik *friction stir welding* kemudian dikembangkan teknik *friction stir spot welding* (FSSW) di industri otomotif sebagai alternatif untuk menggantikan pengelasan titik resistensi (*resistance spot welding*) untuk lembaran aluminium (Aota and Ikeuchi, 2009). Pada perkembangannya, FSSW ini telah digunakan untuk menggabungkan bahan logam seperti aluminium (Buffa et al., 2008, Merzoug et al., 2010, Su et al., 2007), dan baja (Khan et al., 2007, Aota and Ikeuchi, 2009). Penggunaan FSSW untuk penyambungan material polimer berkembang kemudian, antara lain polietilen (Bilici and Yukler, 2012), polipropilen (Kurtulmus, 2012, Bilici, 2012, Bilici et al., 2014), nilon (Yan et al., 2017), HDPE, dan polipropilen (Bilici et al., 2016) dissimilar ABS dan PMMA (Dashatan et al., 2013). Proses FSSW pada material *thermoplastic* terdiri atas empat tahap yaitu *plunging* (penembusan), *stirring*, (pengadukan), *solidifying* (pemadatan), dan *retracting* (penarikan) (Bilici and Yukler, 2012). Pada proses *plunging*, *tool* yang berputar digerakkan dan menembus material sampai dengan kedalaman tertentu. Pada tahap *stirring*, *tool* berputar namun tidak bergeser. Gesekan antara *tool* di bagian *pin* dan *shoulder* dengan material di sekitarnya membangkitkan panas dan meleburkannya. Hasil peleburan antara material bagian atas dan bawah tercampur pada proses *stirring* ini. Putaran *tool* dihentikan dan didiamkan beberapa saat untuk memberikan kesempatan proses *solidifying* di bawah tekanan dari *shoulder tool* sehingga terbentuk *nugget* yang menyambung dua material tersebut. Pada tahap *retracting* akhir, *tool* diangkat dari material dan proses penyambungan selesai. Didasarkan dari proses tersebut, FSSW pada polimer digolongkan sebagai metode pengelasan fusi (Bilici et al., 2016).

Selama proses FSSW, panas dihasilkan oleh gesekan antarmuka *tool* yang berputar dan benda kerja. Parameter proses pengelasan dan geometri *tool* sangat mempengaruhi pembentukan panas, pembentukan sambungan, dan kekuatan las (Bilici and Yüklér, 2012). *Tool* terdiri dari dua bagian yaitu *shoulder* dan *pin*. *Pin* menghasilkan panas gesekan, mendeformasi material di sekitarnya dan mengaduk material yang dipanaskan. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa geometri *pin* yaitu ukuran *pin* (Kulekci et al., 2008), sudut *pin* (Hirasawa et al., 2010), orientasi ulir *pin* (Chowdhury et al., 2010), panjang *pin* (Tozaki et al., 2007) dan profil *pin* (Vijay and Murugan, 2010, Bilici et al., 2016), berperan penting dalam pembentukan *nugget*. *Shoulder* dari *tool* menghasilkan panas selama proses pengelasan, menempa material yang dipanaskan, menahan pelontaran material, dan membantu pergerakan material di sekitar *tool* (Yang et al., 2010). Geometri *shoulder*; diameter dan sudut cekungan permukaan juga berpengaruh pada hasil FSSW (Badarinarayan et al., 2009, Bilici et al., 2016). Daerah sambungan FSSW memiliki karakteristik *keyhole* di tengah sambungan, dengan *nugget* di sekelilingnya. Ketebalan *nugget* las merupakan indikator area ikatan las. Daerah ikatan las meningkat dengan ketebalan *nugget*. Ukuran ketebalan lasan *nugget* dan area ikatan las menentukan kekuatan sambungan FSSW (Bilici and Yukler, 2012). Selain itu, ketebalan lembaran atas di bawah lekukan *shoulder* juga menentukan kekuatan sambungan FSSW (Bilici et al., 2014).

Polypropylene (PP) merupakan salah satu polimer termoplastik yang dibuat oleh industri kimia dan digunakan untuk berbagai aplikasi. *Polypropylene* sering digunakan dalam dunia industri otomotif, konstruksi, penerbangan, dan pertambangan. *Polypropylene* banyak dipilih karena memiliki kekuatan yang tinggi, antikorosi, dan performa yang baik dengan harga yang relatif murah namun *polypropylene* juga memiliki kekurangan di antaranya kekerasan yang rendah, rentan terhadap abrasi, dan memiliki kekuatan dampak yang kurang baik (Prasad dan Raghava, 2012).

Bilici dkk. (2012), (2014), dan (2016) menyatakan bahwa bentuk *tapered* silinder dari *pin* dengan sudut *concave* 4,5-7,5° dan diameter *shoulder* berkisar 20-35 mm menghasilkan kapasitas beban tarik geser tinggi pada sambungan FSSW material PP dengan tebal 4

mm. Selain itu, juga ditunjukkan bahwa parameter proses pengelasan kecepatan putar *tool* sebesar 900-1200 rpm menghasilkan sambungan dengan kualitas tinggi. Namun demikian, dari sisi estetika terlihat cacat *key hole* dan bekas *shoulder* yang besar. Hal itu diakibatkan menggunakan pin dengan diameter ujung pin 7,5 mm dan diameter *shoulder* minimal 20 mm. Untuk memperkecil cacat *key hole*, perlu dipilih ukuran pin dan *shoulder* yang lebih kecil. Namun, kapasitas sifat mekanisnya diharapkan tidak jauh berbeda.

Penelitian ini dilakukan untuk menginvestigasi efek dari *tool* geometri berupa sudut *concave*, dan parameter proses kecepatan putar *tool*. Selain itu, juga akan didiskusikan karakteristik sambungan FSSW bahan PP dengan tebal 5 mm dan diameter *tool* yang lebih kecil.

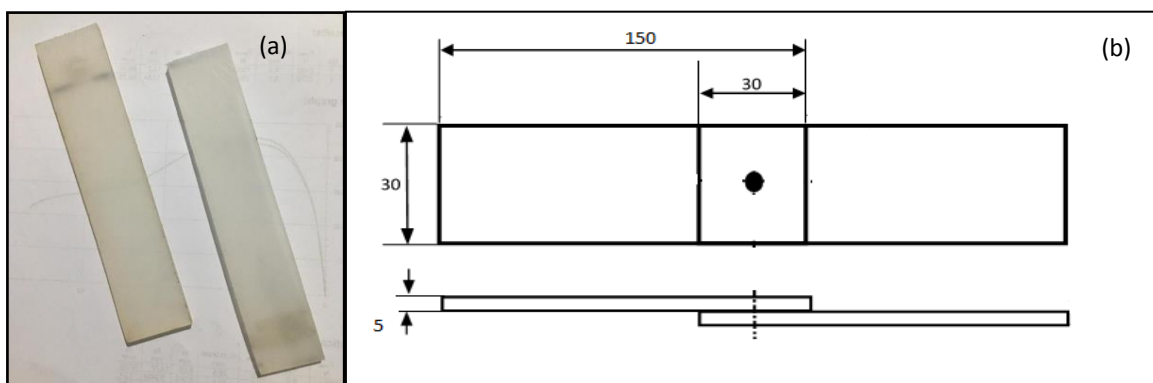
METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, material yang digunakan adalah lembaran PP dengan ketebalan 5 mm.

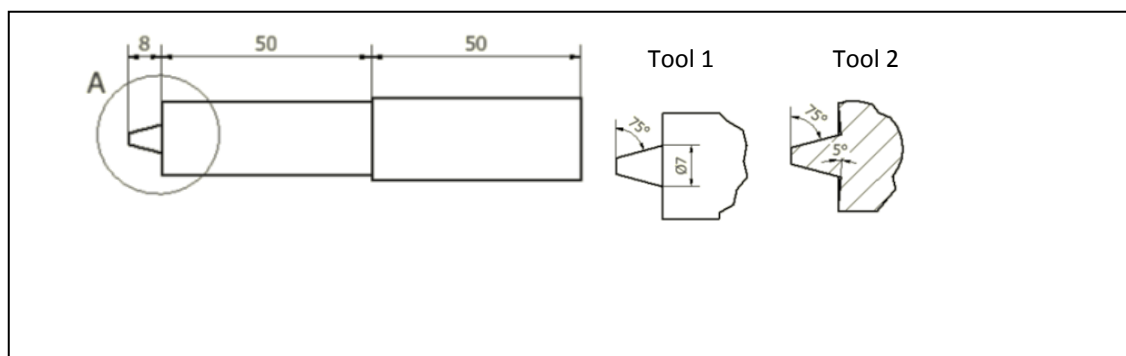
Lembaran tersebut kemudian dipotong dengan ukuran 150 mm x 30 mm x 5 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 1.a menggunakan mesin water jet. Spesimen dibentuk dengan menyusun dua buah potongan dalam bentuk sambungan *lap joint* sesuai dengan standar EN 12814-2 luasan *overlap* berukuran 30 x 30 mm.

Sebelum proses pengelasan, dilakukan penyediaan *tool* terlebih dahulu. Pembuatan *tool* menggunakan baja pejal ST30 yang dikeraskan dengan pertimbangan material tersebut banyak tersedia di pasaran dan cukup kuat. Pembuatan *tool* dilakukan sesuai dengan Gambar 2.

Dua jenis *tool* memiliki dimensi yang sama pada profil pin yang berbentuk silinder meruncing, dengan diameter pangkal pin 7 mm, panjang pin 8 mm, pin *angle* 15°, diameter *shoulder* 18 mm. Perbedaan keduanya terletak dari kecekungan permukaan dari *shoulder*. *Tool* jenis I memiliki permukaan yang rata, sudut kecekungan 0°, sedangkan *tool* jenis II memiliki kecekungan 5°.



GAMBAR 1. Spesimen pengelasan FSSW: (a) hasil potongan material PP, (b) rancangan spesimen pengelasan sesuai standar EN 12814-2



GAMBAR 2. Profile *tool* FSSW dengan sudut kecekungan 0° (*tool* 1) dan 5° (*tool* 2)

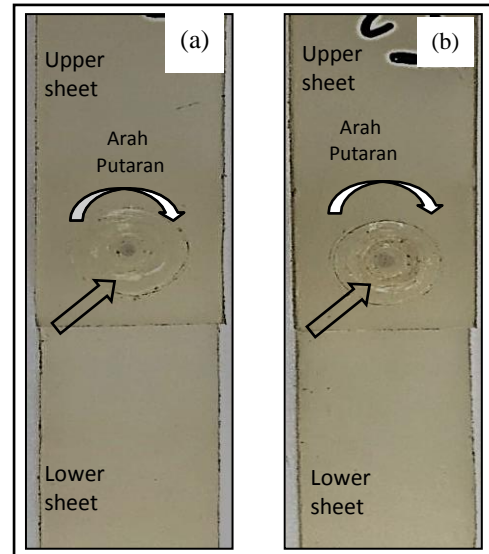
Hasil sambungan pelat *polypropylene* kemudian dikarakterisasi melalui beberapa pengujian. Pengamatan struktur makro menggunakan mikroskop optik merk Olympus. Pengamatan secara *image processing* juga dilakukan untuk mengamati daerah sambungan, seperti panjang *nugget*, *heat effected zone*, *weld bonded area*, dan juga cacat pada hasil pengelasan. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan *Durometer Shore D*. Pengujian dilakukan di beberapa titik untuk setiap spesimen meliputi daerah *raw material*, daerah lasan atas, dan bawah. Pengujian tarik dilakukan memakai standar pengujian untuk material *polypropylene* yaitu EN 12814-2 menggunakan mesin uji tarik universal Zwick/Roel Z020 dengan kecepatan pembebanan 20 mm/menit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengamatan visual

Pengamatan secara visual hasil pengelasan FSSW menggunakan *shoulder angle* yang berbeda ditunjukkan oleh Gambar 3. Secara visual hasil pengelasan dengan dua jenis *tool* tidak terlalu berbeda. Namun, apabila diamati lebih jauh, menunjukkan bahwa hasil pengelasan dengan menggunakan *tool 1* permukaan di sekitar *keyhole* relatif lebih rata dibanding dan *tool 2*. Hal itu dikarenakan *tool 2* dengan *shoulder angle* 5° memberikan kesempatan material yang terdesak pin mengalir melalui kecekungan pada permukaan *shoulder*.

Penelitian ini menggunakan pin dengan profil berbentuk konis dengan sudut 15° (*tapered pin*). Menurut Bilici (2012), sudut kemiringan pin pada pengelasan FSSW dengan bahan *thermoplastic* dapat menimbulkan efek gaya pengelasan yang sangat signifikan. Profil pin tersebut menghasilkan panas gesekan dan ketebalan las besar. Pada fase *stirring*, suhu material di sekitar pin meningkat dan koefisien gesekan material berkurang (Feng et al., 2005). Namun, apabila sudut taper lebih besar akan menghasilkan panas dan tekanan yang tinggi sehingga dapat memutus *chain structure*. Sudut pin yang terlalu besar akan menimbulkan panas gesekan yang berlebih sehingga dapat menurunkan kekuatan sambungan FSSW dari bahan *thermoplastic* (Bilici and Yüklér, 2012).



GAMBAR 3. Tipikal hasil pengelasan (a) *tool 1* dan (b) *tool 2*

B. Hasil Foto Makro

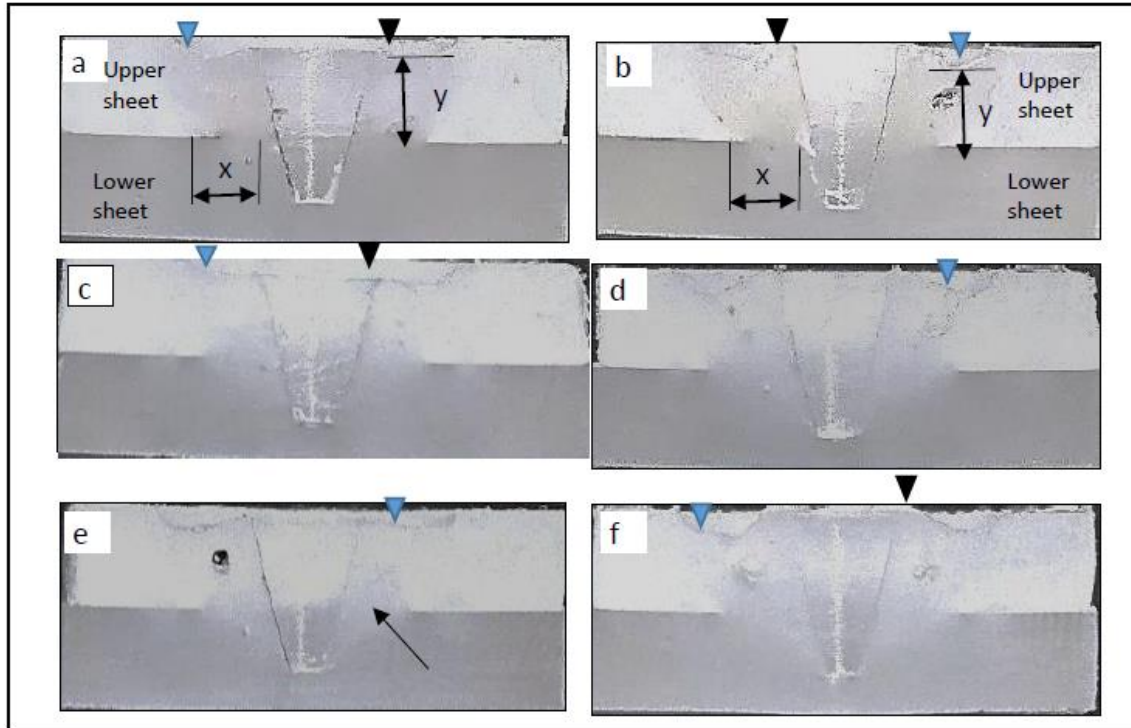
Observasi makroskopik hasil sambungan pada pengelasan FSSW pada PP ditunjukkan oleh Gambar 4. Pada penampang melintang sambungan FSSW teramati adanya *keyhole* yang terbentuk mengikuti profil *tool* dan *welding zone*. Terdapat dua bagian yang dapat diidentifikasi (Kurtulmus, 2012). Bagian pertama adalah *weld stir zone* yang menunjukkan *weld bonded area* atau dalam perspektif dua dimensi disebut ketebalan *nuged* (x). Bagian kedua adalah ketebalan *stir zone* yang terdapat pada material atas (*upper sheet*) di bawah *shoulder* (y) seperti ditunjukkan Gambar 4(a) dan (b). Tekanan dan panas yang timbul akibat profil permukaan *shoulder* sangat berpengaruh terhadap ketebalan *stir zone*. Menurut Feng et al. (2005) kapasitas beban tarik geser dari sambungan FSSW sangat dipengaruhi secara proporsional dengan *weld bond area* (x) dan ketebalan *stir zone* (y) tersebut.

Bagian permukaan *welding zone* di bawah *shoulder* dari hasil pengelasan menggunakan *tool 1* lebih rata, tetapi lebih banyak material yang tergerus oleh *shoulder* dan terlempar sehingga permukaan menjadi lebih rendah (Gambar 4 a,c dan e - lihat tanda segitiga biru) dibanding dengan penggunaan *tool 2*. Seiring dengan meningkatnya putaran *tool*, terlihat material yang tergerus dan terlempar meningkat yang ditandai dengan penurunan permukaan di bawah *shoulder* lebih besar. Di sisi lain, penggunaan *tool 2* mengakibatkan adanya

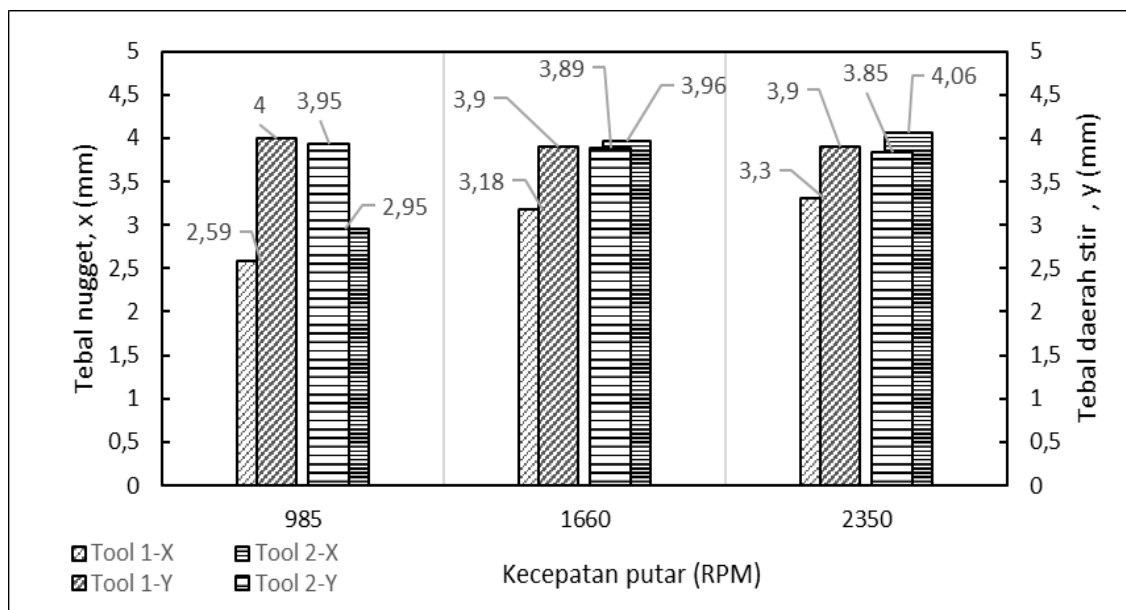
cekungan permukaan di bagian tepi *shoulder* (Gambar 4 b,d,f-tanda segitiga). Material dipermukaan terpotong sesuai sudut *shoulder* kemudian melunak karena panas gesekan pada waktu proses *stirring*. Material lunak tersebut tertahan, tidak terlempar keluar mengumpul di leher *keyhole* membentuk tonjolan dan

memadat pada waktu *delay time* di bawah *shoulder* (Bilici et al., 2016).

Dari Gambar 4, tebal *nugget* (x) dan tebal daerah *stir* (y) diukur dengan menggunakan *software ImageJ*. Hasil dari pengukurannya ditampilkan oleh Gambar 5.



GAMBAR 4. Penampang melintang hasil pengelasan FSSW pada beberapa parameter las, Tool 1: (a) 985 rpm , (c) 1160 rpm, (e) 2350 rpm, dan Tool 2: (b) 985 rpm , (d) 1160 rpm, (f) 2350 rpm



GAMBAR 5. Tebal *nugget* (x) dan tebal daerah *stir* (y) hasil pengelasan FSSW dengan tool 1 dan tool 2 pada tiga kecepatan putar tool

Pada putaran 985 rpm dengan kedua jenis *tool* menunjukkan tipikal daerah *welding zone* yang sama dengan bentuk pin *tool* yang digunakan yaitu bagian bawah mengecil dibanding bagian atas. Hal itu terjadi karena panas yang dihasilkan akibat gesekan masih belum tinggi. Pada putaran *tool* lebih tinggi, *welding zone* di bagian bawah lebih melebar seiring dengan besar putaran *tool*-nya. Hasil pengukuran tebal *nugget* (x) mendukung fenomena tersebut bahwa tebal *nugget* meningkat seiring dengan kenaikan putaran *tool* pada jenis *tool* 1 dan *tool* 2. Tebal *nugget* putaran 985 rpm 2,59 mm kemudian naik tajam menjadi 3,18 mm pada putaran 1160, lalu naik sedikit ke 3,3 mm pada putaran 2350. Perilaku yang sama juga terjadi pada pengelasan dengan *tool* 2. Namun, apabila membandingkan antara kedua jenis *tool*, *nugget* untuk *tool* 2 lebih tebal daripada *tool* 1 untuk masing-masing tiga tingkat putaran *tool*. Tekanan dan panas yang lebih terkonsentrasi terjadi pada pengelasan dengan jenis *tool* 2 dan tidak ada material yang terbuang sehingga *nugget* cenderung lebih tebal (Bilici, 2012).

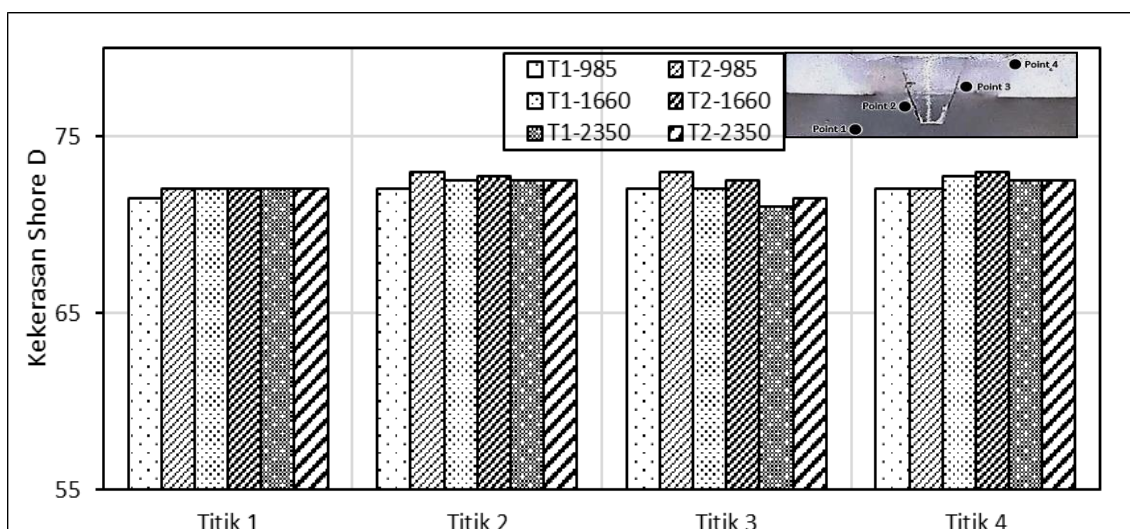
Hasil pengukuran untuk tebal *stir zone* (y) menunjukkan kondisi yang berlawanan dengan tebal *nugget* (x). Tebal (y) cenderung menurun tipis seiring dengan kenaikan putaran *tool*. Perbedaan keduanya adalah, tebal (y) untuk *tool* 1 cenderung seragam pada daerah di bawah *shoulder* karena tekanan dan gesekan sehingga ada sebagian material yang terlontar. Pada pengelasan dengan *tool* 2, penurunan tebal (y) hanya terjadi di tepi *shoulder*. Semakin ke tengah *shoulder* tebal (y) akan meningkat sampai di bibir *keyhole*. Sudut *shoulder* sangat

berperan dalam proses tersebut (Bilici and Yukler, 2012).

C. Hasil Uji Kekerasan

Sebagian besar, pengujian kekerasan pada penelitian tentang FSSW pada bahan *thermoplastic* tidak pernah dilakukan. Pada penelitian ini, pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui perubahan kekerasan akibat proses FSSW pada PP. Pengujian kekerasan dilakukan pada spesimen dengan masing-masing parameter. Titik pengujian diambil dari 4 titik, yaitu: *lower sheet* (titik 1), *welding zone lower sheet* (titik 2), *welding zone upper sheet* (titik 3), dan *upper sheet* (titik 4). Skema posisi pengujian dengan menggunakan alat *Durometer Shore D* dapat dilihat di *Inzet* pada Gambar 6. di bagian *inzet*.

Hasil pengujian kekerasan disajikan oleh Gambar 6. Secara umum, perbedaan kekerasan antartitik termasuk kecil berkisar 71-73. Apabila dilihat lebih detail, terdapat beberapa harga kekerasan yang perlu diperhatikan. Terjadinya perubahan nilai kekerasan PP karena adanya perubahan fase dari padat ke lunak dan memadat lagi karena ada tekanan dan gesekan akibat *shoulder* dan pin. Nilai kekerasan pada titik 1 cenderung seragam dengan nilai kekerasan 72 yang merupakan kekerasan dari *raw material* PP. Di titik 2 kekerasan dengan *tool* 2 cenderung lebih tinggi dari yang lainnya. Daerah ini merupakan representasi dari tebal *nugget* (x). Titik 3 merupakan representasi dari *welding zone* (y) dan merupakan daerah dengan kekerasan terendah dibanding daerah lainnya terutama pada pengelasan dengan *tool* 1.



GAMBAR 6. Nilai kekerasan pada beberapa titik pada sambungan las FSSW dengan variasi kecepatan putar dan jenis *tool* pada material PP (T=*tool*, dan rpm)

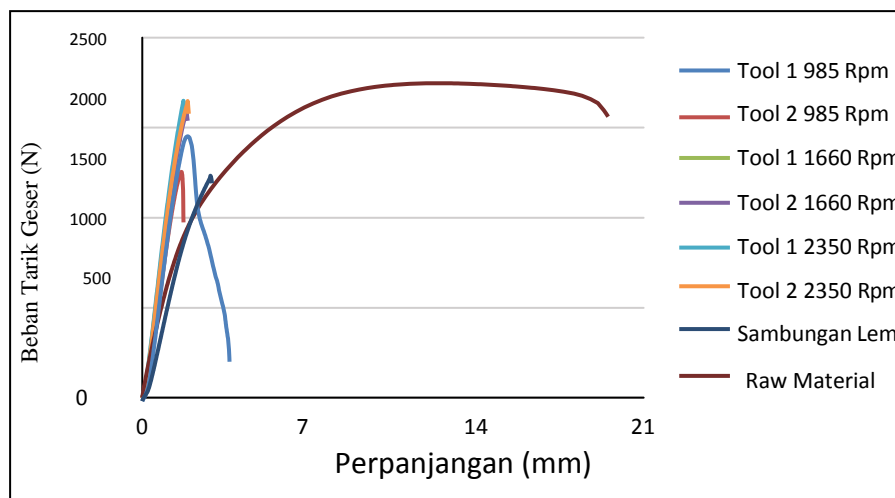
Kekerasan sedikit turun diduga akibat dari berkurangnya kepadatan akibat terlemparnya sebagian material yang lunak karena pemanasan gesekan. Selain itu, titik 3 tersebut merupakan daerah yang menerima tekanan dan gesekan paling besar dibandingkan yang lain karena posisinya berada mengalami kontak langsung dengan *shoulder* dan *pin tool*. Kekerasan semua *specimen* menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan peningkatan kecepatan putar *tool*. Pada titik 4 kekerasan umumnya sama dengan titik 1 dengan nilai 72-72,5. Ada dua *specimen* dengan nilai yang berbeda diduga karena pengambilan titik masih terlalu dekat dengan daerah tepi *welding zone*.

D. Hasil Uji Tarik

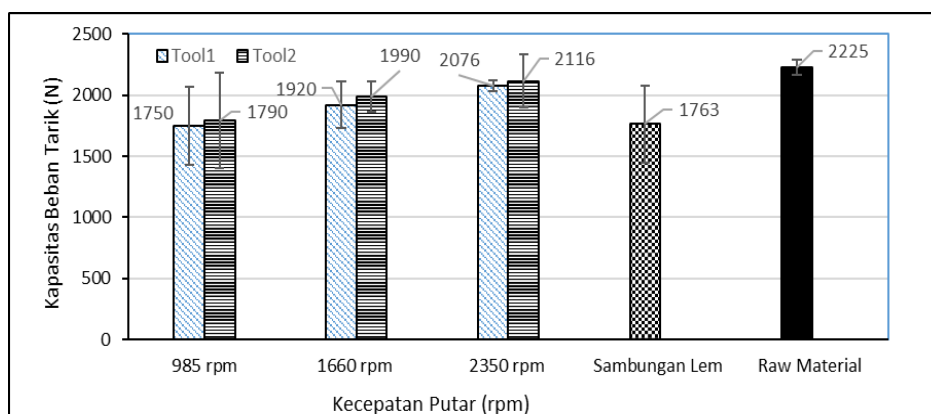
Pengujian tarik-geser pada material PP tipe sambungan *lap joint* dilakukan sesuai dengan standar EN 12814-2 sebanyak 3 *specimen* untuk masing-masing parameter. Sebagai pembandingan, diuji juga sambungan lem dengan lem G dan material PP tanpa sambungan. Perilaku keuletan dan kegetasan sambungan

FSSW direpresentasikan dengan diagram beban dan perpanjangan yang ditunjukkan oleh Gambar 7. Sebagian besar, penelitian sebelumnya tidak menyajikan gambar tersebut. Material PP tanpa sambungan menunjukkan tipikal perilaku polimer secara umum, bahwa terdapat daerah elastis dan plastis yang panjang. Besarnya deformasi plastis sebelum patah teramati sehingga dapat digolongkan sebagai patah ulet. Sementara sambungan yang lain menunjukkan perilaku patah getas, yang mana deformasi plastis teramati kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa sambungan memiliki plastisitas rendah. Spesimen mengalami patah segera setelah beban maksimum tercapai.

Hasil pengujian tarik geser yang menyajikan kapasitas beban tarik geser sambungan FSSW ditampilkan oleh Gambar 8. Gambar tersebut menunjukkan bahwa kapasitas beban tarik meningkat seiring dengan naiknya kecepatan putar *tool* tanpa membedakan jenis *tool* yang digunakan. Namun, kapasitas beban tarik untuk sambungan dengan *tool 2* lebih tinggi dibanding *tool 1* untuk setiap variasi kecepatan putarnya.



GAMBAR 7. Hubungan nilai perpanjangan dan beban pengujian tarik geser sambungan *lap joint* FSSW dengan variasi jenis *tool* dan kecepatan putar *tool*



GAMBAR 8. Kapasitas beban tarik geser hasil pengelasan FSSW dengan variasi kecepatan putar *tool* dan jenis *tool*

Hasil pengujian tarik geser yang menyajikan kapasitas beban tarik geser sambungan FSSW ditampilkan oleh Gambar 8. Gambar tersebut menunjukkan bahwa kapasitas beban tarik meningkat seiring dengan naiknya kecepatan putar *tool* tanpa membedakan jenis *tool* yang digunakan. Namun, kapasitas beban tarik untuk sambungan dengan *tool* 2 lebih tinggi dibanding *tool* 1 untuk setiap variasi kecepatan putarnya. *Tool* dengan *shoulder angle* 5° (*tool* 2) menghasilkan kapasitas beban tarik geser lebih tinggi dibanding *tool* dengan *shoulder angle* 0°. Hasil dari pengujian makro menunjukkan bahwa pada pengelasan *tool* 2 menghasilkan ukuran *weld zone* (*y*) dan *nugget* (*x*) yang lebih tebal. Hasil yang sama juga ditunjukkan oleh penelitian sebelumnya (Bilici et al., 2016, Kurtulmus, 2012, Bilici, 2012, Bilici et al., 2014). Di samping itu, hasil pengujian kekerasan yang menunjukkan sedikit perubahan kekerasan akibat penggunaan jenis *tool* 2 dan kenaikan kecepatan putar *tool* mendukung kenaikan kapasitas beban tarik sambungan.

Effisiensi sambungan berkisar antara 78,85-95,10% dengan kapasitas beban tarik geser sambungan tertinggi sebesar 2116 N dengan beban tarik maksimum *raw material* 2225 N. Efisiensi sambungan FSSW pada PP ini lebih tinggi dibanding dengan sambungan lem G. Kapasitas beban tarik geser sambungan ini lebih rendah dibanding dengan peneliti terdahulu yang mencapai 3800 N. Namun, penelitian tersebut tidak menyebutkan nilai efisiensi sambungan. Selain itu, penelitian tersebut menggunakan sambungan dengan dimensi spesimen yang lebih besar (Bilici et al., 2014).

Kecepatan putar pada penelitian terdahulu untuk mencapai kapasitas beban maksimum direkomendasikan berkisar pada 900 rpm (Bilici et al., 2016, Kurtulmus, 2012, Bilici, 2012, Bilici et al., 2014). Namun, pada penelitian ini kecepatan tersebut belum dapat mencapai kapasitas beban maksimum karena panas yang timbul belum cukup. Dimensi yang lebih kecil dari *tool* yang terdiri dari diameter *pin* (3 mm vs 7,5 mm) dan diameter *shoulder* (18 mm vs 30 mm) diduga menjadi penyebabnya.

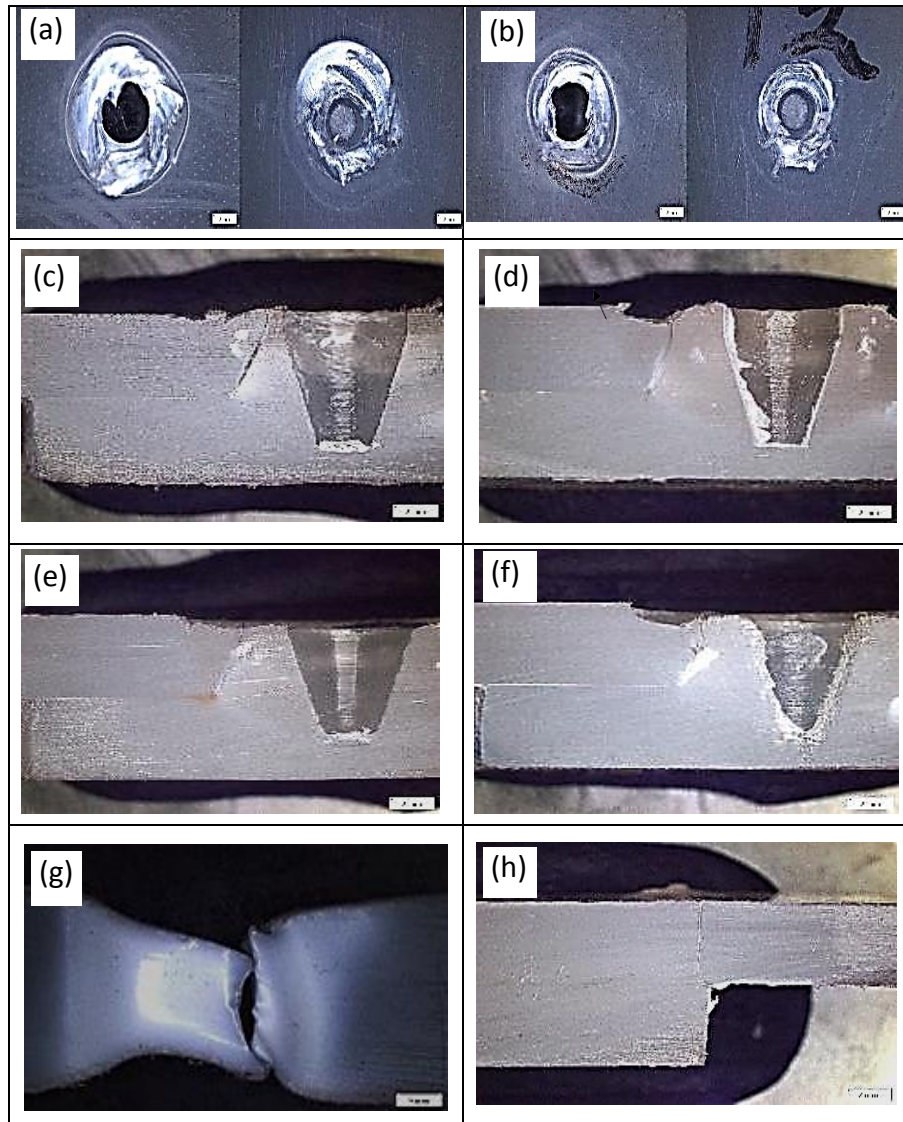
E. Mode Kegagalan

Kegagalan sambungan FSSW pada *thermoplastic* dilaporkan (Bilici et al., 2014) ada tiga tipe, yaitu (a) *nugget pull-out failure*,

(b) *cross-nugget failure*, dan (c) *mixed nugget failure*. Ketiga jenis kegagalan tersebut dipengaruhi oleh kondisi besar panas yang ditimbulkan. Kondisi tersebut meliputi kondisi tidak cukup panas, cukup panas, dan panas berlebih. Kadang kegagalan tipe *nugget pull-out failure* dapat terjadi akibat kekurangan panas, tetapi *weld zone* sudah terbentuk sehingga sebagian *lower sheet* sobek dan terbawa oleh *upper sheet*. Kegagalan tipe ini merupakan tipe kegagalan untuk kualitas sambungan pengelasan paling rendah. Jenis kegagalan pada penelitian ini disajikan oleh Gambar 9 a-f. Dari gambar tersebut kegagalan yang terjadi digolongkan menjadi dua tipe yaitu kegagalan tipe *nugget pull-out failure* dan tipe *cross-nugget failure*.

Pada kecepatan putar paling rendah, 985 rpm dengan *tool* 1 dan *tool* 2 panas yang timbul masih belum mencukupi sehingga ukuran *nugget* yang terbentuk masih pendek (2,5-2,9 mm) sehingga tidak mampu menahan beban lebih besar dan terjadi kegagalan (Gambar 9 a dan b). Pada putaran yang lebih tinggi, terjadi kegagalan tipe *cross-nugget failure*, ukuran *nugget* sudah cukup tebal sehingga mampu menahan beban. Dalam hal ini, beban geser memotong *weld zone* yang memiliki ukuran lebih pendek. Patahan pada pengelasan *tool* 1 ditunjukkan dengan retakan yang dimulai dari ujung *nugget* menuju ke arah tepi *keyhole*. Daerah tersebut mempunyai kepadatan yang terendah (diindikasikan dengan kekerasan rendah) akibat tergerus dan terlempar gaya sentrifugal dari putaran *tool*. Akan tetapi, kegagalan pada sambungan dengan *tool* 2 ditunjukkan melalui retakan yang dimulai dari ujung *nugget* sampai dengan cekungan akibat profil *tool* karena di daerah tersebut berukuran paling pendek.

Dari semua kegagalan yang terjadi, dapat diklasifikasikan ke dalam patah getas. Dalam hal jenis kegagalan, pengamatan frakrografi ini mendukung hasil dari pengujian tarik. Hal yang sama juga terjadi pada patahan untuk sambungan perekat, bahwa patahan terjadi di daerah perubahan dimensi mendadak, di daerah tersebut terjadi konsentrasi tegangan tinggi (Gambar 9.h). Di sisi lain, material PP menunjukkan patah ulet, bahwa terjadi deformasi plastis besar pada daerah patahan (Gambar 9.g).



GAMBAR 9. Mode kegagalan sambungan FSSW: (a) *upper & lower sheet Tool 1-985 rpm*, (b) *upper & lower sheet Tool 2-985 rpm*, (c) *tool1-1160 rpm*, (d) *Tool2-1160 rpm*, (e) *Tool 1-2350rpm*, (f) *Tool 2 2350 rpm*, (g) *material PP*, (h) *sambungan dengan perekat*

KESIMPULAN

Penyambungan pelat PP dengan sambungan *lap* menggunakan FSSW dengan ukuran pangkal pin dan diameter *shoulder* masing-masing 7.5 mm dan 18 mm telah berhasil dilakukan. Secara visual, cacat yang dihasilkan lebih kecil. *Tool* dengan sudut *shoulder* (5°) menghasilkan ukuran *nugget* dan *welding zone* yang lebih lebar sehingga menghasilkan kapasitas beban tarik geser yang lebih besar. Di samping itu, semakin bertambahnya kecepatan putar *tool* (985-2350 rpm) panas yang dihasilkan semakin tinggi, proses *stirring* semakin sempurna dan *welding zone* semakin lebar sehingga kapasitas beban tarik geser sambungan meningkat. Kapasitas beban tarik geser sambungan FSSW

dapat mencapai efisiensi sambungan sebesar 95,10% untuk jenis *tool 2* dan kecepatan 2350 rpm. Jenis patahan sambungan FSSW bersifat getas tipe *nugget pull out failure* untuk kecepatan putar rendah, dan tipe *cross nugget failure* untuk kecepatan putar lebih tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dapat menuliskan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penelitian ini antara lain: Laboratorium Teknik Mesin UMY, dan Workshop Amin Tech Yogyakarta.

DAFTAR PUSTAKA

- Aota, K. & Ikeuchi, K. (2009). Development of friction stir spot welding using rotating tool without probe and its application to low-carbon steel plates. *Welding International*, 23(8), 572-580.
- Aslanlar, S., Ogur, A., Ozsarac, U. & Ilhan, E. (2008). Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. *Materials & Design*, 29(7), 1427-1431.
- Badarinarayan, H., Yang, Q. & Zhu, S. (2009). Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(2), 142-148.
- Bilici, M. K. (2012). Effect of tool geometry on friction stir spot welding of polypropylene sheets. *Express Polymer Letters*, 6(10), 805-813.
- Bilici, M. K. & Yukler, A. I. (2012). Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets. *Materials & Design*, 33, 545-550.
- Bilici, M. K. & Yüklér, A. I. (2012). Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets. *Materials & Design*, 33, 145-152.
- Bilici, M. K., Yüklér, A. I. & Kurtulmuş, M. (2016). Pin Profile and Shoulder Geometry Effects in Friction Stir Spot Welded Polymer Sheets. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 5(6), 29-36.
- Bilici, M. K., Yüklér, A. İ. & Kistan, A. (2014). Effect of the tool geometry and welding parameters on the macrostructure, fracture mode and weld strength of friction-stir spot-welded polypropylene sheets. *Materiali in tehnologije*, 48, 705-711.
- Blawert, C., Hort, N. & Kainer, K. U. (2004). Automotive applications of magnesium and its alloys. *Trans. Indian Inst. Met*, 57(4), 397-408.
- Buffa, G., Fratini, L. & Piacentini, M. (2008). On the influence of tool path in friction stir spot welding of aluminum alloys. *Journal of materials processing technology*, 208(1-3), 309-317.
- Chowdhury, S. M., Chen, D. L., Bhole, S. D. & Cao, X. (2010). Effect of pin tool thread orientation on fatigue strength of friction stir welded AZ31B-H24 Mg butt joints. *Procedia Engineering*, 2(1), 825-833.
- Cole, G. S. & Sherman, A. M. (1995). Light weight materials for automotive applications. *Materials characterization*, 35(1), 3-9.
- Dashatan, S. H., Azdast, T., Ahmadi, S. R. & Bagheri, A. (2013). Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets. *Materials & Design*, 45, 135-141.
- Davies, G. (2003). Future trends in automotive body materials. *Mater Automob Bodies*, 8, 252-269.
- Feng, Z., Santella, M. L., David, S. A., Steel, R. J., Packer, S. M., Pan, T., Kuo, M. & Bhatnagar, R. S. (2005). Friction Stir Spot Welding of Advanced High-Strength Steels – A Feasibility Study. *SAE Transactions*, 114(5), 592-598.
- Goodarzi, M., Marashi, S. P. H. & Pouranvari, M. (2009). Dependence of overload performance on weld attributes for resistance spot welded galvanized low carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(9), 4379-4384.
- Hirasawa, S., Badarinarayan, H., Okamoto, K., Tomimura, T. & Kawanami, T. (2010). Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(11), 1455-1463.
- Khan, M. I., Kuntz, M. L., Su, P., Gerlich, A., North, T. & Zhou, Y. (2007). Resistance and friction stir spot welding of DP600: a comparative study. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(2), 175-182.
- Kulekci, M. K., Şik, A. & Kaluç, E. (2008). Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded lap joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(9-10), 877-882.
- Kurtulmuş, M. (2012). Friction stir spot welding parameters for polypropylene

- sheets. *Scientific Research and Essays*, 7(8), 947-956.
- Matsuyama, K. (2007). Trend of automobile vehicles and the joining technologies. *Welding in the World*, 51(3-4), 50-60.
- Merzoug, M., Mazari, M., Berrahal, L. & Imad, A. (2010). Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys. *Materials & Design*, 31(6), 3023-3028.
- Prasad, R. V., & Raghava, P. M. (2012). FSW of Polypropylene Reinforced With Al₂O₃ Nano Composites, Effect on Mechanical and Microstructural Properties. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(6), 288-296.
- Su, P., Gerlich, A., Yamamoto, M. & North, T. H. (2007). Formation and retention of local melted films in AZ91 friction stir spot welds. *Journal of materials science*, 42(24), 9954-9965.
- Tozaki, Y., Uematsu, Y. & Tokaji, K. (2007). Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(15), 2230-2236.
- Vijay, S. J. & Murugan, N. (2010). Influence of tool pin profile on the metallurgical and mechanical properties of friction stir welded Al-10 wt.% TiB₂ metal matrix composite. *Materials & Design*, 31(7), 3585-3589.
- Yan, Y., Shen, Y., Zhang, W. & Guan, W. (2017). Effects of friction stir spot welding parameters on morphology and mechanical property of modified cast nylon 6 joints produced by double-pin tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5-8), 2511-2523.
- Yang, Q., Mironov, S., Sato, Y. S. & Okamoto, K. (2010). Material flow during friction stir spot welding. *Materials Science and Engineering: A*, 527(16-17), 4389-4398.
- Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta.
Email: ariswidyo.nugroho@umy.ac.id
- Muhammad Rifai Dwi Saputra
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta.
Email: muh.rifa'i.2015@ft.umy.ac.id
- Cahyo Budiyanoro
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta.
Email: cahyo_budi@umy.ac.id

PENULIS:

Aris Widyo Nugroho

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan