

Kajian Pengaruh Parameter Proses *Friction Stir Spot Welding* Terhadap Kekuatan Tarik Lasan pada Aluminium Tipis A1050

Ario Sunar Baskoro^a, Deden Rahayu^a, A.A. Dian Nugroho^a, Suwarsono^a, Gandjar Kiswanto^b, Winarto^c

^a*Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering*

Universitas Indonesia, Depok 16424

Tel : (021) 7270032 ext 203. Fax : (021) 7270033

E-mail : ario@eng.ui.ac.id

^b*E-mail : gandjar_kiswanto@eng.ui.ac.id*

^c*E-mail : winarto@metal.ui.ac.id*

Abstrak

Teknologi *Friction stir welding* (FSW) menjadi alternatif proses penyambungan aluminium yang relatif sederhana, bahkan dalam beberapa hal memiliki kelebihan jika dibanding dengan cara konvensional (misal: proses las, proses keling). FSW bahkan bisa menggunakan mesin freis (*milling machine*) atau mesin gurdi (*drilling machine*) dengan mengganti pahat (*tools*) dan asesori yang sesuai.

Kebutuhan informasi teknologi FSW untuk penyambungan plat tipis dan konstruksi ringan sangat dibutuhkan di industri. Proses penyambungan plat aluminium tipis (ketebalan<1mm) yang optimum dan untuk membatasi kerusakan akibat gaya dan panas berlebihan, membutuhkan teknologi dan peralatan khusus.

Pada paper ini, akan membahas dua tahap penelitian, yaitu: Penelitian tahap pertama adalah mengkaji pengaruh perubahan parameter proses FSW *Lap Welding* terhadap kekuatan tarik hasil lasan, dalam hal ini menggunakan material Aluminium A1050, dengan ketebalan 0,4 mm. Material pahat adalah dari material HSS, yang mana pembentukan *pin* dengan proses gerinda mikro. Diameter *shoulder* 6 mm, dengan *pin* silindris; diameter *pin* 2 mm, sudut 0° dan panjang *pin* 0,6 mm. Variasi parameter selanjutnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi kecepatan putar pahat (2300, 2600, dan 2900 rpm), dan variasi kecepatan transversal/*Feed rate*: 50, 60, 70 mm/menit, dan variasi sudut pahat/*tilt angle*: 0°, 1°, 2°. Penelitian tahap kedua adalah mengkaji pengaruh perubahan parameter proses FSW *Spot Welding* terhadap kekuatan tarik hasil lasan. Spesifikasi material dan pahat serupa dengan penelitian *lap welding*. Variasi parameter selanjutnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi kecepatan putar pahat (2300, 2600, dan 2900 rpm), dan variasi waktu diam/*Dwell time*: 0, 1, 2 detik dan variasi sudut pahat/*tilt angle*: 0°, 1°, 2°. Kecepatan penusukan (*plunge speed*) dalam penelitian ini adalah 30 mm/menit.

Pada bagian terakhir menganalisis pengaruh variasi parameter tersebut terhadap respon sifat mekanik hasil pengelasan, yaitu kekuatan tarik sambungan las (*tensile strength*). Analisis hasil las dan interaksi antar parameter proses *Friction Stir welding* untuk mendapatkan hasil proses yang optimal, dilakukan dengan menerapkan *Response Surface Methods* (RSM).

Kata kunci: *Friction Stir Welding, Lap Welding, Spot welding, Response Surface Methods.*

I. Pendahuluan

Teknologi *Friction stir welding* (FSW) merupakan teknik penyambungan logam yang relatif baru. Teknologi FSW menjadi alternatif proses penyambungan aluminium yang relatif sederhana, bahkan dalam beberapa hal memiliki kelebihan jika dibanding dengan cara konvensional (mis.: proses las, proses riveting). FSW bahkan bisa menggunakan mesin freis (*milling machine*) atau mesin gurdi (*drilling machine*) dengan mengganti pahat (*tools*) dan asesori yang sesuai.

Perkembangan teknologi mikro dalam masyarakat industri telah mengesankan di langkah riset dan keragaman aplikasi baru. Kecenderungan sistem mikro lebih kompak dan miniaturisasi, presisi tinggi, dan

kualitas mekanik tinggi untuk peralatan, sambungan perakitan dan kemasan. Pada Sistem kemasan peralatan terintegrasi mikro, membutuhkan isolasi mekanik dan termal yang tepat serta perisai elektromagnetik dari sinyal sirkuit. Cangkang (*casing*) logam biasanya memberikan perlindungan yang sangat baik dari pengaruh mekanik dan elektromagnetik. Proses solder dan las dapat digunakan untuk menyambung potongan komponen-komponen menjadi cangkang metal yang kokoh. Shoulder biasanya melibatkan pemanasan lokal, di mana sumber-sumber pemanasan berasal. Teknik ini membutuhkan kontak dengan elektroda, hal ini kurang disukai pada aplikasi pengemasan mikro sistem. Las laser saat sering digunakan untuk berbagai produk tipis seperti alat biomedis, korek api, alat pencari mata air, laminasi

motor/trafo, kaleng baterai dan paket sirkuit hibrida. Sebagai alternatif, FSW dapat digunakan dalam aplikasi penyambungan logam tipis untuk elektronik, medis dan peralatan mikro dalam rangka untuk membatasi kerusakan akibat panas berlebihan [1]. Scialpi dkk. (2008) telah berhasil menerapkan FSW pada plastik tipis. Untuk penyambungan plat aluminium tipis ($t < 1\text{ mm}$) membutuhkan teknologi FSW dan peralatan penunjang khusus. Penelitian berkaitan plat tipis dan parameternya biasa disebut *Micro Friction Stir Welding* [2].

Penelitian proses FSW pada material tipis perlu dilakukan, karena penyambungan pelat tipis sering dilakukan di bengkel tersebut. Hal ini diperlukan untuk mempelajari jig dan teknik penyambungan, parameter yang optimum dan dampaknya pada kualitas bahan, kualitas permukaan dan stabilitas hasil las. Tujuan penelitian ini adalah untuk meneliti pengaruh perubahan parameter las terhadap kekuatan tarik hasil sambungan *Friction Stir Welding* (FSW) pada plat aluminium A1050, dengan ketebalan 0,4 mm. Proses FSW yang dilakukan adalah proses *Lap Welding* dan *Spot Welding*. Adapun variasi parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

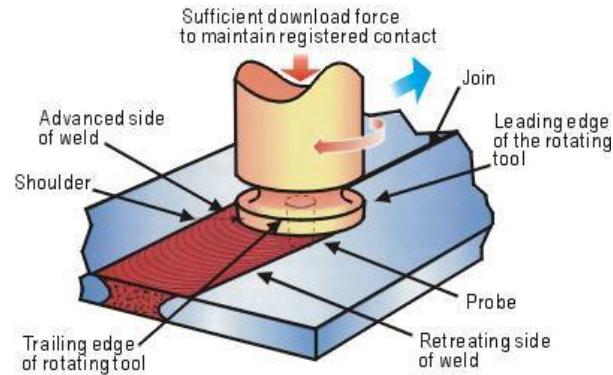
1. variasi kecepatan putar pahat/ *spindle speed*
2. variasi kecepatan transversal/*Feed rate*
3. variasi sudut pahat/*tilt angle*

Selanjutnya analisis hasil las dan interaksi antar parameter proses *Friction Stir welding* untuk mendapatkan hasil proses yang optimal, dilakukan dengan menerapkan *Response Surface Methodology* (RSM).

II. Dasar Teori

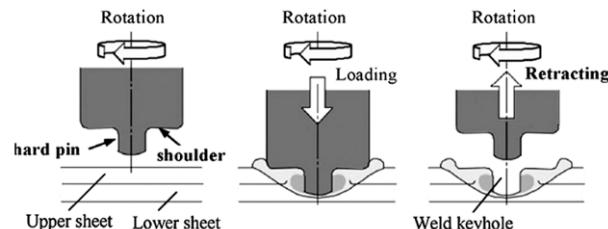
Proses *Friction Stir Welding* (FSW) digunakan untuk menggabung dua lembar metal tipis. Sebuah ilustrasi skematis dari proses FSW ditunjukkan pada Gambar 1. Sebuah pahat dengan pin berputar menusuk ke pelat atas dan pelat bawah didukung alas untuk menahan gaya ke bawah. Kecepatan rotasi dijaga dalam waktu yang tepat untuk menghasilkan panas gesekan. Kemudian, material disekitar pahat dipanaskan dan lumer sehingga terjadi deformasi plastis, dan ikatan solid-state terjadi di antara permukaan dari lembaran atas dan bawah. FSW adalah proses solid-state joining dimana material yang dilas tidak benar-benar mencair pada saat proses berlangsung, dan proses ini diaplikasikan pada saat kita ingin mempertahankan karakter awal base materialnya. Proses ini pada umumnya digunakan pada material aluminium yang berukuran besar dimana pada kondisi ini material tersebut tidak mudah untuk di *Heat-Treatment* setelah proses las untuk mengembalikan karakter awalnya. Ditemukan oleh Wayne Thomas dan rekan-rekannya di The Welding Institute UK pada desember 1991 [3]. Kawasaki Heavy Industries (Japan) mengaplikasikan

proses *friction stir spot welding* (FSSW) untuk proses penyambungan rangka penguat dan plat atap mobil. Mereka mengembangkan desain rangka mobil dari aluminium menggunakan metoda FSSW tersebut. Alasan utama adalah hasil yang lebih rata dan tampilan visual yang lebih menarik. Hal ini dimungkinkan karena input panas yang dibutuhkan lebih rendah [4].



Gambar 1. Skema proses FSW

Proses FSSW adalah proses penyambungan plat dengan cara memutar pahat dan menusukkan dengan kecepatan tertentu (*plunge speed*) (Gambar 2).



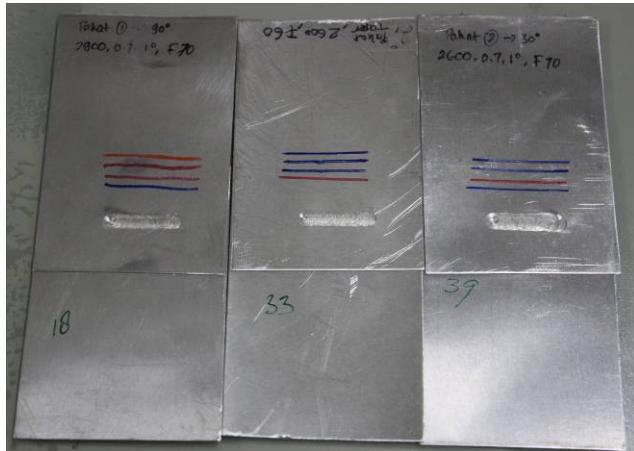
Gambar 2. Tahapan proses FSSW

III. Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Penelitian dibagi dalam dua tahap; Metoda Penelitian tahap pertama adalah mengkaji pengaruh perubahan paramater proses FSW *Lap Welding* terhadap kekuatan tarik hasil lasan, dalam hal ini menggunakan material Aluminium A1050, dengan ketebalan 0,4 mm. Material pahat adalah dari material HSS, yang mana pin dibentuk dengan proses gerinda mikro. Diameter *shoulder* 6 mm, dengan pin silindris; diameter *pin* 2 mm, sudut 0° dan panjang *pin* 0,6 mm. Variasi parameter selanjutnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi kecepatan putar pahat/*spindle speed* (2300, 2600, dan 2900 rpm), dan variasi kecepatan transversal/*Feed rate*: 50, 60, 70 mm/menit, dan variasi sudut pahat/*tilt angle*; 0° , 1° , 2° . Penelitian tahap kedua adalah mengkaji pengaruh perubahan paramater proses FSW *Spot Welding* terhadap kekuatan tarik hasil lasan. Spesifikasi material dan pahat serupa dengan penelitian *lap*

welding. Variasi parameter selanjutnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi kecepatan putar pahat (2300, 2600, dan 2900 rpm), dan variasi waktu diam/Dwell time: 0, 1, 2 detik dan variasi sudut pahat/tilt angle; 0°, 1°, 2°. Kecepatan penusukan (plunge speed) dalam penelitian ini adalah 30 mm/menit.

Spesimen penelitian adalah Plat aluminum A 1050 (Tabel 1) yang dipotong dengan ukuran 90 mm x 60 mm. Pada saat proses penyabungan las, spesimen ditumpuk dengan lebar overlap 30 mm (Gambar 3).



Gambar 3. Spesimen penelitian FSW

Pahat FSW terbuat dari material HSS, yang digerinda sehingga terbentuk pin silinder, dan shoulder rata, seperti pada Gambar 4. Diameter shoulder 6 mm, dengan pin silindris; diameter pin 2 mm, sudut 0° dan panjang pin 0,6 mm [5].



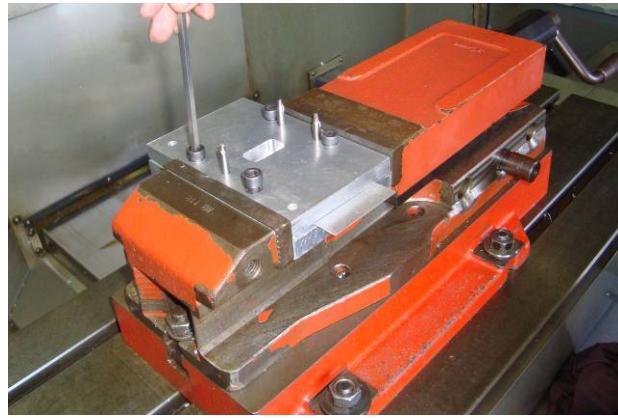
Gambar 4. Pahat-pahat FSW untuk penelitian

Tabel 1. Kandungan logam pada Aluminum A 1050

Komposisi	Prosentase
Cu	0-0.05 %
Mg	0-0.05 %
Si	0-0.25 %
Fe	0-0.40 %
Mn	0-0.05 %
Zn	0-0.07 %
Ti	0-0.05 %

Al	balance
----	---------

Mesin yang digunakan dalam proses pengelasan dengan metode FSW adalah mesin CNC model *vertical Milling machine* EMCO tipe VMC-200. Alat pemegang benda kerja pada meja mesin menggunakan *fixture* (pencekam spesimen) dan ragum. Ragum yang digunakan adalah ragum meja datar yang berfungsi untuk mencekam *fixture* (Gambar 5).



Gambar 5. Setup peralatan proses FSW

Spesimen yang sudah disambung selanjutnya dipotong menggunakan *wire cut*, melintang arah pengelasan dengan lebar 20 mm, untuk sample pengujian tarik. Pengujian kekuatan tarik (*tensile strength*) pada spesimen tersebut menggunakan Mesin Uji Tarik dengan merk Galdabini dan beban maksimal yang dapat diuji adalah 2500N, dengan kecepatan penarikan 5 mm/menit.

IV. Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini ingin mencari nilai parameter input proses di mana respon mencapai optimal. Optimal dapat berupa minimum atau maksimum fungsi tertentu dalam hal parameter masukan. *Regression Models* adalah kumpulan teknik matematis dan statistik yang berguna untuk menganalisis masalah di mana beberapa variabel bebas mempengaruhi variabel dependen atau respon dan tujuannya adalah untuk mengoptimalkan respon [6]. Dalam banyak kondisi eksperimental, adalah mungkin untuk mewakili faktor independen dalam bentuk kuantitatif seperti yang diberikan dalam persamaan (1). Kemudian faktor-faktor ini dapat dianggap sebagai memiliki hubungan fungsional atau respon sebagai berikut:

$$Y = \phi(x_1, x_2, \dots, x_k) + e_r \quad \dots (1)$$

Antara respon Y dan x_1, x_2, \dots, x_k faktor k kuantitatif, fungsi ϕ disebut permukaan respon (*response surface*) atau fungsi respon. Residu (e_r) mengukur kesalahan eksperimental. Dalam menerapkan *Model Regresi*,

variabel independen dipandang sebagai permukaan model matematika. Mewakili kekuatan tarik dari lasan, respon adalah fungsi dari kecepatan rotasi pahat, sudut pahat, kecepatan pengelasan.

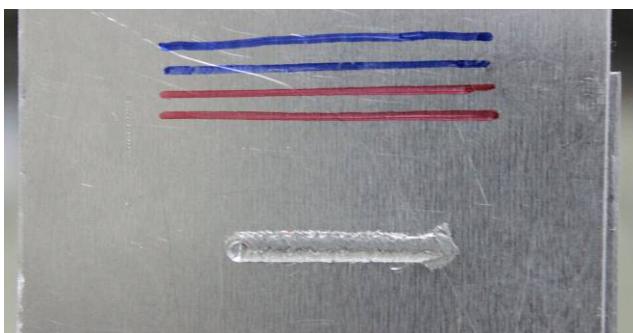
Rancangan penelitian menggunakan model desain faktorial tingkat-tiga. Desain faktorial secara luas digunakan dalam percobaan, ketika peneliti butuh untuk mengevaluasi efek gabungan dari beberapa faktor terkendali di respon. Rancangan faktorial 3^q adalah pengaturan faktorial dengan faktor q , masing-masing pada tiga tingkatan. Tingkat faktor disebut sebagai **rendah, menengah, dan tinggi**, diwakili oleh angka **-1** (rendah), **0** (intermediate), dan **1** (tinggi). Ketika pengukuran pada variabel respon berisi semua kemungkinan kombinasi dari tingkat faktor, jenis desain eksperimental disebut percobaan faktoria lengkap (*complete factorial experiment*) [6].

Secara umum, desain 3^q memerlukan banyak percobaan, oleh karena itu tidak mungkin bahwa semua 3^q percobaan dapat dilakukan dalam kondisi homogen. Sebuah percobaan faktorial lengkap dapat ditempatkan di blok unit, dimana unit-unit di blok yang sama homogen. Blok lengkap mencakup setiap perlakuan di setiap blok, sebaliknya, blok tidak lengkap tidak mencakup semua perlakuan atau kombinasi perlakuan di setiap blok. Blok tak-lengkap kurang efisien dibanding blok lengkap karena kehilangan beberapa informasi (biasanya interaksi order yang lebih tinggi) [6,7].

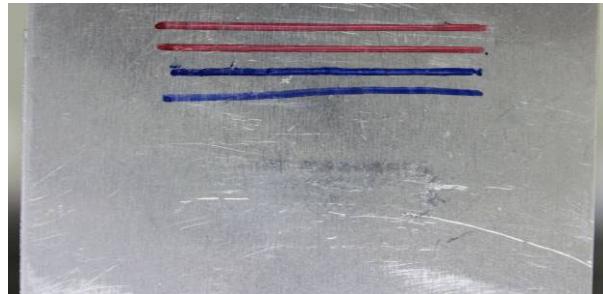
Desain yang diusulkan dan strategi analisis dengan data dari 27-percobaan, yaitu penelitian tentang kekuatan tarik (*tensile strength*) dengan 3 parameter dan 3 tingkat faktor, dijabarkan di Tabel 2.

V. Hasil dan Pembahasan

Hasil-hasil proses FSW dan proses FSSW, secara visual permukaan atas dan permukaan bawah terlihat baik dan rata (Gambar 6a dan 6b).

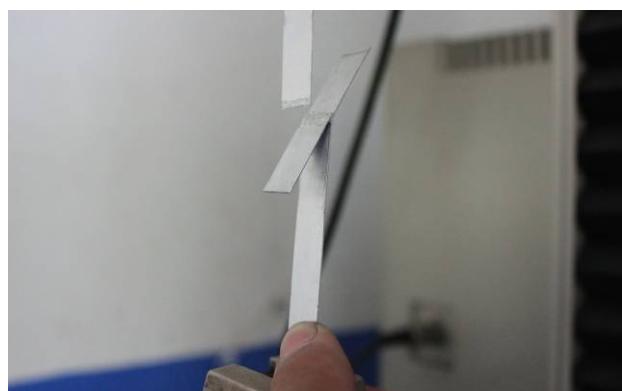


Gambar 6a. Hasil proses FSW *Lap welding*, tampak atas



Gambar 6b. Hasil proses FSW *Lap welding*, tampak bawah

Proses selanjutnya, spesimen dipotong dengan proses *wire cutting*, selebar 15 mm. Dan diuji tarik, seperti tampak pada Gambar 7.



Gambar 7. Pengujian tarik hasil FSW

Dari analisis RSM, dihasilkan persamaan (2) untuk proses *Lap welding* dan persamaan (3) untuk proses *spot welding*. Di sini terlihat adanya hubungan parameter-parameter terhadap respon (Kekuatan tarik). Pada persamaan (2) bisa diprediksi, bahwa parameter A (*Tilt angle*) dan B (*feedrate*) memberi efek signifikan untuk kenaikan kekuatan tarik. Sementara, kenaikan C (*spindle speed*) akan menurunkan kekuatan tarik. Hal ini bisa dilihat secara visual dalam grafik 2-parameter, Gambar 7a dan Gambar 8b. Kondisi optimum terjadi di sekitar A (*Tilt angle*) optimum di sekitar 2° , dan *spindle speed* rendah (Gambar 8b).

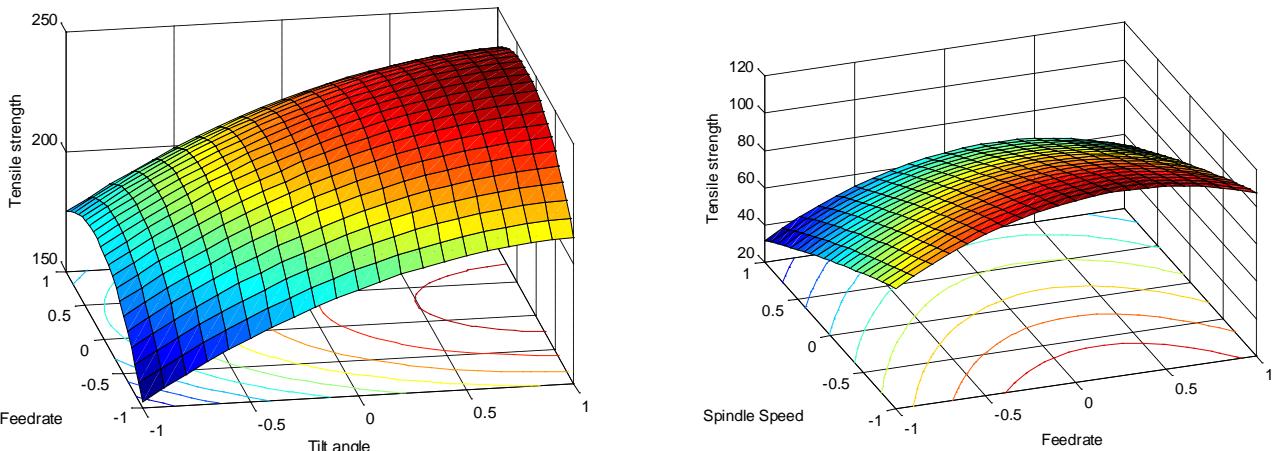
Persamaan (3) menggambarkan hubungan parameter-parameter spot welding terhadap kekuatan tarik. Disini terlihat bahwa parameter B (*spindle speed*) dan parameter C (*Dwell time*) memiliki efek signifikan terhadap kenaikan kekuatan tarik hasil las. Semakin lama dwell time, akan meningkatkan kekuatan tarik (Gambar 8a). Pada sisi lain, kemiringan pahat (*tilt angle*) sangat menurunkan kekuatan tarik. Posisi terbaik adalah pada posisi pahat tegak (Gambar 9).

Tabel 2. Rancangan percobaan dan Data parameter terhadap beban tarik pada proses *lap welding*

No	Tilt angle (°)	Code A	Feedrate (mm/mnt)	Code B	Spindle speed (rpm)	Code C	AxB	AxC	BxC	A ²	B ²	C ²	Load (N)
1	0	-1	50	-1	2300	-1	1	1	1	1	1	1	120,5
2	0	-1	50	-1	2600	0	1	0	0	1	1	0	197,8
3	0	-1	50	-1	2900	1	1	-1	-1	1	1	1	142,9
4	0	-1	60	0	2300	-1	0	1	0	1	0	1	87,1
5	0	-1	60	0	2600	0	0	0	0	1	0	0	104,8
6	0	-1	60	0	2900	1	0	-1	0	1	0	1	83,7
7	0	-1	70	1	2300	-1	-1	1	-1	1	1	1	246,6
8	0	-1	70	1	2600	0	-1	0	0	1	1	0	169,3
9	0	-1	70	1	2900	1	-1	-1	1	1	1	1	170,8
10	1	0	50	-1	2300	-1	0	0	1	0	1	1	190,5
11	1	0	50	-1	2600	0	0	0	0	0	1	0	205,4
12	1	0	50	-1	2900	1	0	0	-1	0	1	1	168,1
13	1	0	60	0	2300	-1	0	0	0	0	0	1	139,9
14	1	0	60	0	2600	0	0	0	0	0	0	0	177,6
15	1	0	60	0	2900	1	0	0	0	0	0	1	308,9
16	1	0	70	1	2300	-1	0	0	-1	0	1	1	146,1
17	1	0	70	1	2600	0	0	0	0	0	1	0	150,3
18	1	0	70	1	2900	1	0	0	1	0	1	1	218,3
19	2	1	50	-1	2300	-1	-1	-1	1	1	1	1	254,0
20	2	1	50	-1	2600	0	-1	0	0	1	1	0	56,5
21	2	1	50	-1	2900	1	-1	1	-1	1	1	1	121,5
22	2	1	60	0	2300	-1	0	-1	0	1	0	1	172,2
23	2	1	60	0	2600	0	0	0	0	1	0	0	181,6
24	2	1	60	0	2900	1	0	1	0	1	0	1	430,2
25	2	1	70	1	2300	-1	1	-1	-1	1	1	1	280,9
26	2	1	70	1	2600	0	1	0	0	1	1	0	67,2
27	2	1	70	1	2900	1	1	1	1	1	1	1	196,4

Hasil analisis RSM, hubungan parameter *lap welding* terhadap kekuatan tarik dipresentasikan dalam persamaan (2)

$$Y_{\text{lap}} = 202.94 + 29.37.A + 11.33.B - 26.57.C + 3.14.A.B - 16.48.A.C - 14.24.B.C - 12.59.A^2 - 21.55.B^2 - 2.08.C^2 \quad \dots(2)$$



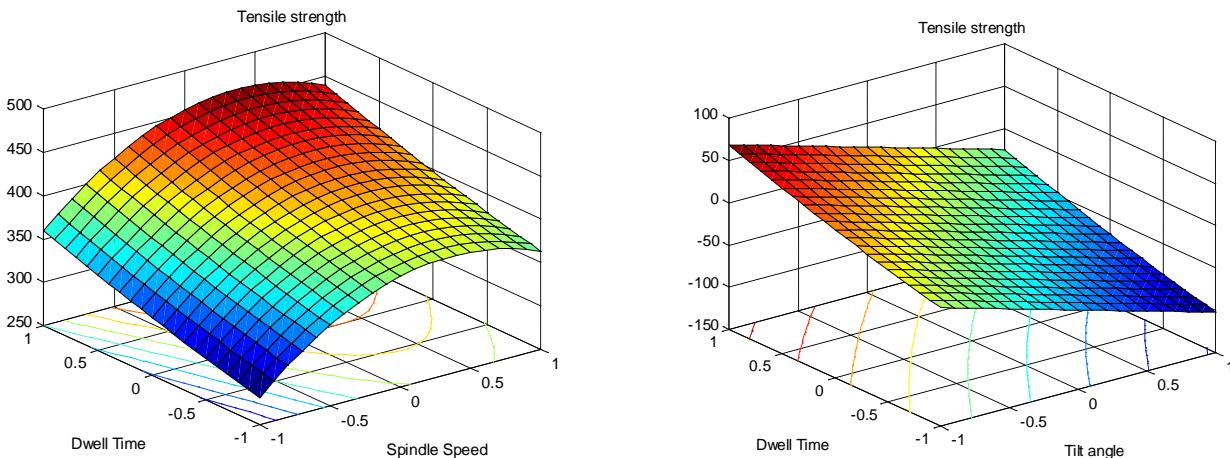
Gambar 8. grafik 2-parameter **a.** Feedrate-Tilt angle, **b.** Spindle speed-Feedrate

Tabel 3. Rancangan percobaan dan Data parameter terhadap beban tarik pada proses *spot welding*

No	Tilt angle (°)	Code A	Spindle speed (rpm)	Code B	Dwell time (sec)	Code C	AxB	AxC	BxC	A ²	B ²	C ²	Load (N)
1	0	-1	2300	-1	0	-1	1	1	1	1	1	1	160.0
2	0	-1	2300	-1	1	0	1	0	0	1	1	0	197.5
3	0	-1	2300	-1	2	1	1	-1	-1	1	1	1	130.2
4	0	-1	2600	0	0	-1	0	1	0	1	0	1	413.6
5	0	-1	2600	0	1	0	0	0	0	1	0	0	267.5
6	0	-1	2600	0	2	1	0	-1	0	1	0	1	397.0
7	0	-1	2900	1	0	-1	-1	1	-1	1	1	1	117.6
8	0	-1	2900	1	1	0	-1	0	0	1	1	0	511.0
9	0	-1	2900	1	2	1	-1	-1	1	1	1	1	59.7
10	1	0	2300	-1	0	-1	0	0	1	0	1	1	82.4
11	1	0	2300	-1	1	0	0	0	0	0	1	0	56.5
12	1	0	2300	-1	2	1	0	0	-1	0	1	1	41.6
13	1	0	2600	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	205.2
14	1	0	2600	0	1	0	0	0	0	0	0	0	175.4
15	1	0	2600	0	2	1	0	0	0	0	0	1	78.2
16	1	0	2900	1	0	-1	0	0	-1	0	1	1	81.8
17	1	0	2900	1	1	0	0	0	0	0	1	0	284.9
18	1	0	2900	1	2	1	0	0	1	0	1	1	392.3
19	2	1	2300	-1	0	-1	-1	-1	1	1	1	1	298.4
20	2	1	2300	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0	111.6
21	2	1	2300	-1	2	1	-1	1	-1	1	1	1	153.3
22	2	1	2600	0	0	-1	0	-1	0	1	0	1	115.5
23	2	1	2600	0	1	0	0	0	0	1	0	0	377.2
24	2	1	2600	0	2	1	0	1	0	1	0	1	144.1
25	2	1	2900	1	0	-1	1	-1	-1	1	1	1	55.6
26	2	1	2900	1	1	0	1	0	0	1	1	0	280.4
27	2	1	2900	1	2	1	1	1	1	1	1	1	33.7

Hasil analisis RSM, hubungan parameter *Spot welding* terhadap kekuatan tarik dipresentasikan dalam persamaan (3)

$$Y_{\text{spot}} = 191.16 - 46.71.A + 40.29.B + 39.04.C - 45.26.A.B - 27.55.A.C + 28.77.B.C + 50.48.A^2 - 55.51.B^2 + 3.98.C^2 \quad \dots(3)$$



Gambar 9. Grafik 2-parameter proses *Spot welding*. a. Feedrate-Tilt angle, b. Spindle speed-Feedrate

Kesimpulan

1. Teknologi FSW, khususnya proses *lap welding* dan *spot welding* memberi alternatif yang cukup baik untuk diaplikasikan dalam penyambungan plat tipis aluminum A1050.
2. Hubungan empiris berupa persamaan-persamaan

regresi dihasilkan antara parameter proses dan kekuatan tarik dari hasil las FSW pada plat tipis aluminum A1050. Sehingga mempermudah prediksi kekuatan hasil las, pada perubahan parameter selanjutnya.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung oleh Hibah Riset Unggulan Perguruan Tinggi (Hibah Riset Madya Universitas Indonesia Desentralisasi DIKTI) Tahun Anggaran 2012 No. Kontrak. 1915/H2.R12.1/HKP.05.00/2012 dengan judul “Pengembangan Sistem Advanced Micro Friction Stir Welding (Micro-FSW) Pada Pengelasan Plat Tipis Aluminium”.

Referensi

- [1] Wang, DA., Chao, CW., Lin, PC., Uan, JY, *Mechanical characterization of friction stir spot microwelds*, Journal of Materials Processing Technology 210 (1942–1948), 2010.
- [2] Scialpi, A., Giorgi, AD., Filippis, LAC., Nobile, R., Panella, FW., *Mechanical analysis of ultra-thin friction stir welding joined sheets with dissimilar and similar materials*, Materials and Design 29 (928–936), 2008
- [3] Khaleed, T. Khaled, *An Outsider Looks At Friction Stir Welding*, Federal Aviation Administration, Lakewood, California, 2005.
- [4] Lohwasser, D., Chen, Z., *Friction Stir Welding*, CRC Press, 2010.
- [5] Arora, A., De and T. DebRoy, *Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter*, Scripta Materialia 64 (2011) 9–12.
- [6] Montgomery, D.C., *Design and Analysis Of Experiments 5th ed.*, John Wiley & sons., 2001.
- [7] Bradley, N., *The response surface methodology*, thesis, Department of Mathematical Sciences, Indiana University of South Bend, 2007.