

## Model Kegagalan Sambungan Las Titik (*Resistance Spot Welding*) Material Baja Tahan Karat

Triyono<sup>1</sup>, Yustiasih Purwaningrum<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Surakarta  
Jl. Ir. Sutami 36A Surakarta 57126

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta  
Email: triyonomesin@uns.ac.id

### Abstrak

Diameter *nugget* minimum sambungan las titik menurut standar AWS (*American Welding Society*) dinyatakan dengan  $d = 4\sqrt{t}$  dengan  $t$  adalah tebal plat yang disambung. Diameter *nugget* minimum adalah diameter terkecil yang menyebabkan sambungan las titik mengalami model kegagalan *pullout*, yang menunjukkan bahwa kekuatan sambungan lebih kuat dibandingkan dengan kekuatan plat yang disambung. Sambungan las titik dengan diameter lebih kecil dari diameter minimum akan mengalami model kegagalan *interfacial*, yang menunjukkan bahwa kekuatan sambungan lebih lemah dibandingkan dengan kekuatan plat yang disambung. Standar ini digunakan untuk material yang mempunyai tegangan luluh 140-420 Mpa dan tebal 0,6-3,0 mm. Baja tahan karat banyak digunakan pada struktur yang mempersyaratkan kekuatan dan ketahanan korosi misalnya pada gerbong kereta api. Struktur ini biasanya terdiri dari *frame* dan *sheet* dimana keduanya mempunyai ketebalan yang berbeda. Dalam kasus seperti ini, seorang welding engineer dan operator biasanya mengalami kesulitan jika menggunakan standar AWS ketika memilih ukuran plat yang tebal, tipis atau tebal rata-rata dari kedua plat yang disambung, untuk dimasukkan ke rumus diameter. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi formula AWS jika diterapkan pada sambungan las titik baja tahan karat dengan tebal yang berbeda. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja tahan karat SUS304. Tiga pasang sambungan las titik dengan ketebalan berbeda yaitu 1-1 mm, 2-1 mm dan 3-1 mm dilas titik dengan menggunakan arus listrik yang bervariasi dari 1,79 Volt sampai dengan 2,30 Volt untuk membuat diameter sambungan las titik bervariasi. Sambungan las titik ini diuji tarik-geser dan dievaluasi model kegagalannya serta diukur diameter sambungannya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa diameter *nugget* minimum hasil formulasi AWS lebih kecil dari diameter *nugget* minimum hasil pengujian dan tidak bisa menjamin sambungan gagal *pullout* walaupun tebal plat yang dimasukkan dalam rumus adalah tebal plat yang terbesar. Ini menunjukkan bahwa penggunaan formula AWS untuk aplikasi sambungan las titik material beda tebal harus hati-hati.

**Keywords:** Las titik, baja tahan karat, *pullout*, *interfacial*, diameter *nugget* minimum, beda tebal

### Pendahuluan

Baja tahan karat austenitik digunakan secara luas pada berbagai bidang terutama pada struktur kendaraan, kereta api, kapal dan pesawat terbang, terutama jika kombinasi ketahanan korosi dan kekuatan menjadi persyaratan struktur. Struktur ini biasanya terdiri dari plat tipis (*sheet*) yang diperkuat dengan *frame*, dimana *frame* biasanya lebih tebal dibandingkan dengan plat tipis yang diperkuat. Struktur *frame-sheet* ini biasanya disambung dengan metode las titik tahanan listrik (*resistance spot welding*/RSW). Struktur ini merupakan kasus sambungan las titik beda ketebalan. Penggunaan RSW mempunyai beberapa keuntungan antara lain prosesnya cepat, tanpa logam pengisi dan distorsi/ deformasi yang dihasilkan rendah.

Umumnya, jika sambungan las titik dikenai beban, maka kombinasi beban geser dan tarik akan terjadi pada sambungan las titik tersebut. Dalam kondisi ini, dua model kegagalan yang berbeda akan mungkin terjadi jika sambungan tersebut selama pengujian tarik-geser yaitu model kegagalan antar muka (*interfacial failure*/IF) dan model kegagalan tarik (*pullout failure*/PF). Kegagalan antar muka adalah kegagalan yang terjadi apabila retak merambat pada batas muka antara dua plat yang disambung dan melewati *nugget*, sedangkan kegagalan *pullout* terjadi jika retak terjadi di batas *nugget* lalu merambat di sepanjang batas *nugget* sehingga salah satu plat yang disambung berlubang. Sambungan las titik yang mengalami kegagalan antar muka menunjukkan bahwa kekuatan sambungan lebih rendah dibandingkan dengan kekuatan plat yang disambung dan biasanya sambungan ini mempunyai kapasitas dukung beban yang rendah. Sebaliknya,

sambungan las titik yang mengalami kegagalan pullout menunjukkan bahwa kekuatan sambungan lebih tinggi dibandingkan dengan kekuatan plat yang disambung. Sambungan las titik dengan kegagalan pullout mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sambungan las titik dengan kegagalan antar muka. Untuk alasan ini, parameter pengelasan titik harus dikontrol sedemikian rupa sehingga menghasilkan sambungan las yang mempunyai kegagalan pullout. [1].

Organisasi pengelasan American Welding Society (AWS) dan Society of Automotive Engineering (SAE) sudah menerbitkan dokumen standar untuk pengelasan RSW yaitu D8.9. Standar ini terbatas untuk material baja yang mempunyai kekuatan tarik maksimum 140 MPa sampai dengan 420 MPa. Sayangnya, standar ini tetap dipakai oleh operator las untuk menentukan parameter pengelasan titik material baja tahan karat. Standar AWS tersebut merupakan rumus yang digunakan untuk menentukan diameter nugget kritis berdasarkan tebal material yang disambung. Diameter nugget kritis menurut rumus tersebut dinyatakan sebagai  $d = 4\sqrt{t}$  dimana  $t$  adalah tebal plat yang disambung dengan satuan millimeter. Rumus ini memang sangat membantu para praktisi pengendalian kualitas di industri manufaktur jika sambungan melibatkan dua material yang mempunyai ketebalan sama. Namun, jika plat yang disambung mempunyai ketebalan yang berbeda, seorang *welding engineer* dan operator biasanya mengalami kesulitan jika menggunakan standar AWS ketika memilih ukuran plat yang tebal, tipis atau tebal rata-rata dari kedua plat yang disambung, untuk dimasukkan ke rumus diameter. Dalam kasus ini biasanya, operator menentukan sendiri rumusan yang dipakai [1, 2]. Untuk material baja, diameter nugget kritis sambungan las titik beda tebal lebih tinggi jika dibandingkan dengan diameter *nugget* berdasarkan rumus AWS [3]. Karena hampir semua struktur teknik melibatkan sambungan las titik beda material, maka makalah ini bertujuan untuk menentukan diameter nugget kritis sambungan las titik beda tebal untuk material baja tahan karat austenitik, dan hasilnya dibandingkan dengan diameter nugget berdasarkan rumus AWS.

### Metode Penelitian Material dan proses pengelasan

Tiga pasang baja tahan karat austenitik SUS304 dengan variasi ketebalan yang berbeda dilas dengan menggunakan las titik tahanan listrik (RSW) membentuk sambungan tumpang (*lap*

*joint*). Parameter pengelasan RSW ditunjukkan oleh tabel 1, sedangkan komposisi kimia dan sifat fisik-mekanik material baja tahan karat austenitik SUS304 masing-masing ditunjukkan oleh tabel 2 dan tabel 3.

**Tabel 1. Tebal plat dan parameter pengelasan RSW**

No.	Tebal $t_1$ (mm)	Tebal $t_2$ (mm)	Tegangan listrik (Volt)
1	3	1	1.79
			2.02
			2.30
			2.67
2	2	1	1.79
			2.02
			2.30
			2.67
3	1	1	1.60
			1.79
			2.02
			2.30

**Tabel 2. Komposisi kimia material baja tahan karat SUS304 (% berat)**

Material	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo	Cu
SUS304	0,08	0,25	0,4	18,1	8,2	0,031	0,02	0,49	0,21

**Tabel 3. Sifat fisik-mekanik baja tahan karat SUS304**

Alloy	Melting Point [°C]	Thermal Conductivity [W/m °K]	Thermal Expansion [ $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ ]	Electrical Conductivity [ $\Omega\text{m}$ ]	Tensile Strength [Mpa]
SUS 304	1450	9.4	17.2	$2 \times 10^6$	480

### Pengamatan struktur mikro dan uji kekerasan

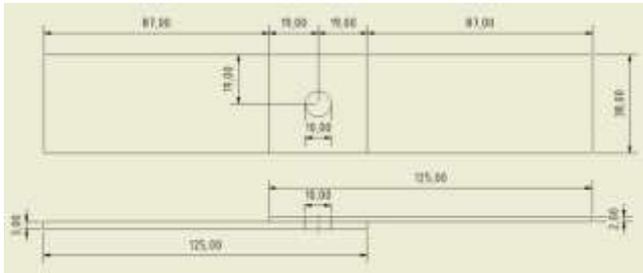
Prosedur standar metalografi ASTM E3 dan ASTM E407 digunakan untuk mempersiapkan spesimen dan untuk mengambil gambar struktur makro. Hasil pengelasan RSW dipotong melintang pada tengah-tengah nugget. Larutan 10 mL HNO<sub>3</sub>, 20 mL HCl dan 30 mL air digunakan untuk memunculkan struktur makro. Struktur makro ini diamati dengan mikroskop stereo zoom.

Distribusi kekerasan nugget, daerah terpengaruh panas (HAZ) dan material induk diukur dengan uji kekerasan microvickers dengan beban 500 g.

### Uji tarik-geser

Spesimen uji tarik-geser mempunyai dimensi yang sama dengan spesimen uji tarik-geser yang dilakukan oleh Gean dkk. [4]. Dimensi spesimen uji tarik-geser diilustrasikan oleh Gambar 1. Nugget digambarkan sebagai lingkaran yang berwarna gelap yang berada ditengah-tengah sambungan. Besarnya overlap adalah

sama dengan lebar spesimen. Uji tarik-geser dilakukan dengan mesin UTM (universal testing machine). Pengujian ini digunakan untuk menentukan kapasitas dukung beban geser pada sambungan. Untuk meminimalkan beban bending selama pengujian tarik-geser, plat dengan panjang 38 mm ditempelkan pada ujung spesimen dan dicekam bersama dengan spesimen.



**Gambar 1.** Dimensi spesimen uji tarik-geser (mm)

### Hasil Penelitian dan Pembahasan

Energi panas pada pengelasan titik tahanan listrik bersumber dari aliran listrik yang melewati suatu tahanan listrik. Semakin besar tahanan listrik suatu material maka energi panas yang dibangkitkan juga semakin tinggi. Setiap material mempunyai tahanan listrik yang berbeda-beda, dan untuk material yang sama semakin tebal material maka tahanan listriknya akan semakin besar pula. Hal ini menunjukkan bahwa kasus sambungan las titik beda tebal akan menyebabkan perbedaan tahanan listrik pada masing-masing material yang disambung. Energi panas yang dibangkitkan pada masing-masing plat yang disambung juga menjadi berbeda. Karena energi panas pengelasan akan mengontrol pembentukan dan pertumbuhan nugget maka tebal material secara tidak langsung berpengaruh terhadap ukuran nugget yang terbentuk. Material yang lebih tebal akan mengalami panas yang lebih besar sehingga nugget yang terbentuk pada plat yang lebih tebal menjadi lebih besar, sebaliknya plat yang lebih tipis akan terkena energi panas yang lebih rendah sehingga nugget yang terbentuk juga lebih kecil. Ini berarti ada ketidakseimbangan panas antara plat yang lebih tebal dan plat yang lebih tipis. Konsekuensinya adalah nugget yang terbentuk menjadi tidak simetri, dimana pada plat tebal akan terbentuk nugget yang lebih luas dan lebih dalam dan pada plat yang tipis akan terbentuk nugget yang lebih kecil dan lebih dangkal. Fenomena ini nampak pada Gambar 2. Gambar tersebut menunjukkan bahwa nugget pada sambungan pasangan tebal plat 2-1 mm dan 3-1 mm mempunyai bentuk nugget yang tidak simetri,

sedangkan pada sambungan pasangan tebal plat 1-1 mm mempunyai nugget yang simetri. Ketidak seimbangan panas ini bisa terjadi pada sambungan las logam tak sejenis, sambungan beda tebal atau kombinasi antara keduanya yaitu sambungan beda tebal dan beda jenis [5].



(a)

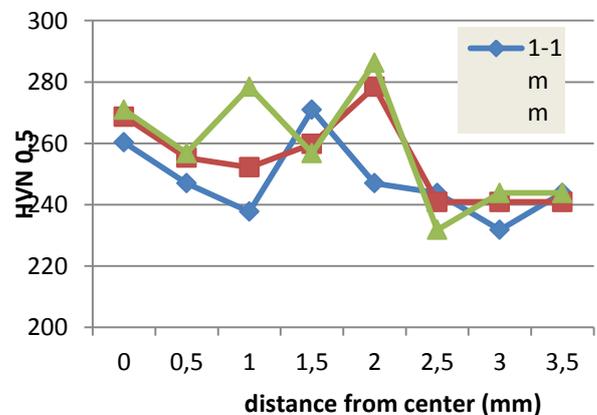


(b)



(c)

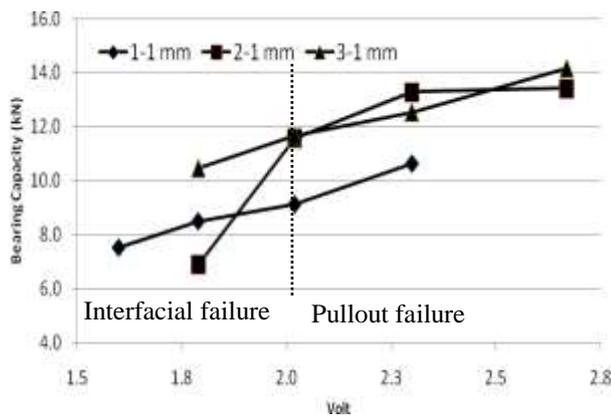
**Gambar 2.** Struktur makro sambungan las dengan pasangan tebal (a) 1-1 mm (b) 2-1 mm (c) 3-1 mm



**Gambar 3.** Distribusi kekerasan

Kekerasan daerah nugget, daerah terpengaruh panas (HAZ) dan logam induk pada sisi plat yang tipis

ditunjukkan pada Gambar. 3. Kekerasan daerah nugget lebih tinggi daripada kekerasan HAZ dan logam induk. Kekerasan tertinggi adalah 280 HV0.5 yang terdapat pada batas nugget. Hal ini lebih dipengaruhi oleh pengerasan regangan karena tekanan elektroda. Seperti diketahui tekanan pada elektroda dipertahankan selama proses pengelasan yaitu pada saat material mengalami pemanasan, peleburan, fusi dan pembekuan. Ketika arus listrik dimatikan secara otomatis pembekuan logam las terjadi di bawah tekanan elektroda. Selama periode ini, pengerasan regangan berlangsung di zona pengelasan karena pendinginan cepat logam las [5].

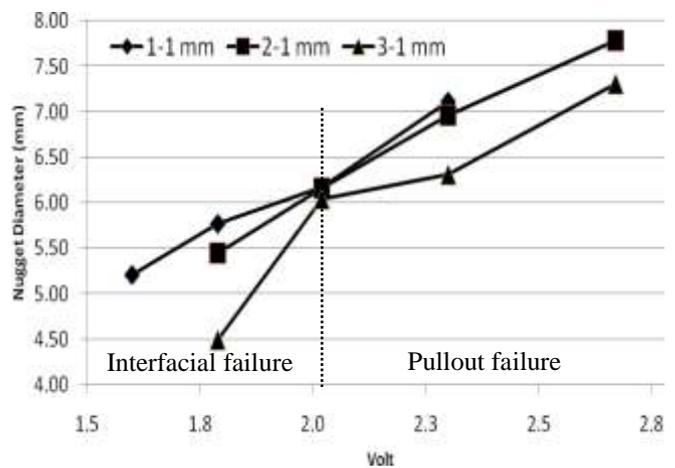


**Gambar 4.** Pengaruh tegangan listrik terhadap kapasitas dukung sambungan las titik

Kapasitas dukung biasanya digunakan untuk mengungkapkan kekuatan sambungan las titik. Kapasitas dukung adalah besaran yang menyatakan kemampuan las titik untuk meneruskan beban antara bagian tersambung. Hasil percobaan menunjukkan bahwa tegangan listrik pengelasan memiliki dampak yang signifikan terhadap kapasitas dukung beban geser sambungan las titik berdasarkan uji statik tarik-geser. Seperti dapat dilihat pada Gambar 4, untuk semua pasangan ketebalan plat, peningkatan tegangan listrik pengelasan membuat kapasitas dukung beban geser sambungan RSW meningkat. Hal ini terutama dikarenakan meningkatnya luasan daerah nugget dan ditunjukkan oleh Gambar. 5. Hal ini juga diketahui bahwa peningkatan parameter RSW seperti arus listrik, tegangan listrik pengelasan dan waktu tahan akan membuat peningkatan luasan daerah nugget. Gambar. 5 menunjukkan bahwa peningkatan tegangan listrik pengelasan menyebabkan peningkatan diameter nugget.

Kombinasi beban geser dan tarik akan terjadi ketika sambungan tumpang (lap joint) terkena beban. Dalam kondisi ini, dua mode kegagalan yang terjadi selama pengujian statis tarik-geser yaitu kegagalan antar muka (IF) dan kegagalan

penarikan nugget (PF) seperti ditunjukkan pada Gambar. 6. Modus kegagalan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kapasitas dukung sambungan las titik. Gambar 4 menunjukkan bahwa kapasitas dukung spesimen dengan model kegagalan tarik lebih tinggi daripada kapasitas dukung spesimen yang gagal dengan model antar muka. Selain itu, kapasitas dukung meningkat jika ketebalan material yang disambung juga meningkat. Alasan utamanya adalah komponen beban dalam arah tebal akibat kekakuan yang meningkat menjadi lebih kecil sehingga rotasi plat akan menurun [6]. Ada kondisi transisi di mana kegagalan antarmuka (IF) berubah menjadi kegagalan penarikan (PF). Itu disebut kondisi kritis dan umumnya ditentukan oleh diameter nugget kritis. Sambungan las titik yang memiliki nugget diameter lebih kecil dari diameter kritis nugget akan gagal dalam model IF sedangkan yang memiliki diameter lebih besar akan gagal dalam model PF.



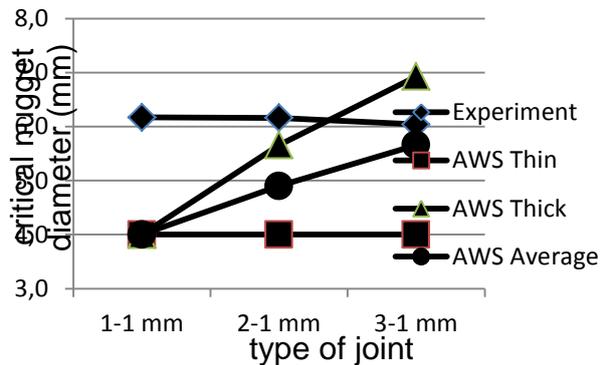
**Gambar 5.** Pengaruh tegangan listrik terhadap diameter nugget



**Gambar 6** (a) Model Interfacial failure (IF),  
(b) model pullout failure (PF)

Berdasarkan hasil penelitian, diameter nugget kritis sambungan las tidak berubah secara signifikan untuk semua pasangan ketebalan. Itu tidak sesuai dengan rumus AWS yang menyatakan bahwa  $d = 4\sqrt{t}$  di mana  $t$  adalah ketebalan pelat dalam milimeter. Diameter nugget kritis hasil eksperimen lebih tinggi dari diameter nugget hasil rumus AWS. Gambar 7 menunjukkan perbandingan diameter nugget kritis hasil eksperimen dan diameter nugget yang ditentukan dengan menggunakan rumus AWS tersebut. Jika menggunakan tebal plat tertipis untuk rumus AWS, diameter nugget

akan konstan yaitu 4 mm yang berlaku untuk semua pasangan ketebalan. Diameter nugget berdasarkan rumus AWS akan meningkat jika menggunakan tebal plat yang paling tebal atau rata-rata ketebalan plat yang disambung. Seperti dapat dilihat pada Gambar 7, jika rumus AWS digunakan untuk sambungan 1-1 mm dan 2-1 mm, sambungan akan gagal dalam model kegagalan antar muka (IF) dan memiliki kapasitas dukung yang rendah. Rumus AWS dengan pelat tertebal atau rata-rata ketebalan plat akan memiliki model kegagalan penarikan (PF) untuk sambungan 3-1 mm. Hal ini menunjukkan bahwa rumus AWS harus digunakan dengan hati-hati dalam menentukan diameter nugget sambungan las titik baja tahan karat austenitik beda tebal.



**Gambar 7.** Perbandingan diameter nugget kritis dengan diameter nugget menurut rumus AWS

### Kesimpulan

Nugget sambungan las titik tahanan listrik (RSW) material beda tebal berbentuk tidak simetri karena tahanan listrik material yang disambung berbeda. Meningkatnya tegangan listrik pengelasan membuat kapasitas dukung beban geser RSW meningkat. Selain itu, kapasitas dukung beban geser akan meningkat jika ketebalan material yang disambung juga meningkat. Diameter *nugget* minimum hasil formulasi AWS lebih kecil dari diameter *nugget* minimum hasil pengujian dan tidak bisa menjamin sambungan gagal *pullout* walaupun tebal plat yang dimasukkan dalam rumus adalah tebal plat yang terbesar. Ini menunjukkan bahwa penggunaan formula AWS untuk aplikasi sambungan las titik material beda tebal harus hati-hati..

### Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (Dikti) yang telah memberi

dukungan dana penelitian ini melalui hibah fundamental tahun 2012.

### Referensi

- [1] M. Pouranvari and P. Marashi, Resistance Spot Welding of Unequal Thickness Low Carbon Steel Sheet. *Advanced Materials Research*. 83 (2010) 1205-1211.
- [2] S. Agashe and H. Zhang, Selection of Schedule Based on Heat Balance in Resistance Spot Welding. *Welding Journal*. 82(7) (2003) 18-s to 23-s..
- [3] Triyono, Y. Purwaningrum and I. Chamid, Critical Nugget Diameter of Resistance Spot Welded Stiffened Thin Plate Structure, *Modern Applied Science*, 7 (7) (2013) 17-22.
- [4] A. Gean, S. A. Westgate, J. C. Kucza, and J. C. Ehrstrom, Static and Fatigue Behavior of Spot Welded 5182-0 Aluminium Alloy Sheet. *Welding Journal*. 78 (3), (1999) 80-s to 86-s.
- [5] A. Hasanbasoglu, and R Kacar, Resistance Spot Weldability of Dissimilar Materials (AISI 316L-DIN EN 10130-99 Steels). *Material and Design*. 28, (2007) 1794-1800.
- [6] H. Nordberg, Fatigue Properties of Stainless Steel Lap Joints. *SAE Transactions: Journal of Materials & Manufacturing* 114 (2006) 675-s to 690-s.