

TEGANGAN AMBANG PADA SAMBUNGAN LAS CDW ANTARA BAJA DAN KUNINGAN DALAM LINGKUNGAN KOROSIF

Osmar Buntu Lobo

Tenaga Pengajar (Dosen)
Politeknik Negeri Fakfak
Jurusan Teknik Mesin
osmar@polinef.id

Djarot B. Darmadi

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
b_darmadi_djarot@ub.ac.id

Oyong Novareza

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Industri
novareza15@ub.ac.id

Failure at the welded joint can be occurs due to the Stress Corrosion Cracking (SCC) phenomenon. Dissimilar welding is more susceptible to SCC when compared to similar welding. This can be occurs because the material or metal that connected is non-homogeneous material. which causes the material will be difficult to be combined perfectly. This study aims to determine the threshold stress (σ_{Th}) at the dissimilar welded joint between steel and brass which have SCC loads. Both materials were connected by the welding method by using a Capacitive Discharge Welding (CDW) welding machine. Surface preparation or surface treatment is applied to one of the basic materials (low carbon steel) to obtain optimal joint results. The welded joint was tested by using Constant Load Test (CLT) methods, which is engineered in such a way that the welded joint get the stress, corrosive environment (1M NH_3 solutions) and voids produced by the weld joint itself. The result shows that the threshold stress of the dissimilar welding joint between steel and brass by the CDW method is 330 MPa.

Keywords: *Threshold Stress, Stress Corrosion Cracking, Constant Load Test, Capacitive Discharge Welding.*

1. PENDAHULUAN

Bersama dengan perkembangan pengetahuan akan fenomena SCC, diketahui terdapat suatu nilai ambang batas ketahanan material terhadap kondisi sinergis antara tegangan, lingkungan korosif dan kerentanan material yang digunakan. Sebelum fenomena SCC muncul ke permukaan, para pekerja teknik menduga bahwa ketahanan suatu material khususnya sambungan logam terhadap umur konstruksi diukur berdasarkan parameter sifat mekaniknya saja. SCC merupakan kegagalan yang datang secara tidak terduga karena sulit untuk memprediksi keberadaannya. Oleh karena itu perlu untuk melakukan pengujian material atau sambungan terhadap fenomena SCC yang kemungkinan besar akan dialami oleh setiap material dalam penggunaannya. Setelah kegagalan sambungan las pada pipa [1], para engineer mulai menyadari perlunya mengantisipasi kegagalan material akibat tiga fenomena yang ada secara bersamaan yang mengakibatkan kegagalan material terutama pada sambungan las yakni: adanya tegangan (terutama tegangan tarik), keberadaan cacat material (yang akan memicu retak) serta lingkungan korosif. Biasanya tegangan yang dimaksud berada di bawah tegangan luluh makroskopik tetapi cukup untuk menginduksi strain plastik mikroskopis lokal, dan merupakan kunci dalam proses *crack initiation* dan *propagation* [2]. Menurut Jones dan Raja pada penelitian masing-masing bahwa, kegagalan material karena SCC menyebabkan pertumbuhan retak sebagai akibat dari bersinergi nya beban mekanik eksternal dan lingkungan yang korosif [3], [4]. SCC juga dapat menyebabkan kegagalan *catastrophic* pada konstruksi, pesawat udara, dan saluran pipa [5]–[7]. Pada penelitian lain SCC dianggap sebagai fenomena utama dalam kebocoran pipa dan bahkan terdapat sambungan pipa yang meledak dengan konsekuensi bencana [1]. Darmadi pada penelitiannya mengungkapkan bahwa proses pengelasan menyebabkan siklus thermal yang tidak seragam pada lasan yang merupakan pemicu SCC [8]. Untuk bahan tertentu SCC bergantung pada lingkungan korosi yang agresif dan tegangan sisa [9]. Untuk mengetahui ketahanan suatu material terhadap beban SCC dapat dilakukan dengan berbagai metode. Menurut peneliti, metode CLT merupakan metode yang paling sederhana dan mudah dilakukan, meskipun demikian metode ini juga mempunyai kekurangan yaitu membutuhkan waktu pengujian yang relatif lebih lama. Metode pengujian ini tentunya harus disesuaikan dengan lingkungan dimana sambungan logam tersebut akan ditempatkan dan yang tidak kalah penting adalah menyesuaikan beban yang akan diterapkan pada material atau sambungan tersebut karena SCC tergantung pada

kombinasi kritis bahan, lingkungan, dan tegangan [2]. Tegangan sisa pada sambungan las akan selalu ada karena melalui proses pengerjaan panas yang menyebabkan deformasi yang tidak merata dan akan meninggalkan tegangan sisa. Void yang diproduksi dalam proses pengelasan memicu pertumbuhan retak. Karena pentingnya mempertimbangkan ketahanan SCC pada sambungan las, maka sambungan las antara baja dan kuningan pada penelitian ini akan dievaluasi dari sudut pandang SCC.

Jika ditinjau dari bahan yang disambung, pengelasan dapat dibagi menjadi dua jenis pengelasan yaitu pengelasan *similar* dan pengelasan *dissimilar*. Pengelasan *dissimilar* adalah pengelasan atau penyambungan terhadap material yang berbeda (*non homogen*), dan pengelasan *dissimilar* ini tentunya akan lebih rentan terhadap kegagalan karena material yang berbeda akan mempunyai sifat mampu las yang berbeda pula. Penelitian mengenai pengelasan *dissimilar* oleh Long [10] menginvestigasi pengaruh *holding time* terhadap sifat mekanik (struktur mikro dan uji kekerasan) antara sambungan las baja karbon rendah dan baja berkekuatan tinggi. Struktur mikro pada daerah *nugget* las menunjukkan pengaruh panas yang berbeda dengan logam dasar. Sedangkan kekerasan pada daerah fusi baik pada baja karbon maupun baja berkekuatan tinggi menunjukkan sedikit variasi dan jauh lebih tinggi dibandingkan logam dasar. Analisis nonlinear finite elemen diterapkan untuk menyimulasikan prosedur uji tarik. Simulasi menunjukkan fenomena necking dan proses kegagalan pada logam dasar di sekitar nugget las.

Pengelasan *dissimilar* pada penelitian ini dilakukan menggunakan jenis mesin (*Capacitive discharge welding*-CDW). Schotmer dalam penelitiannya mengungkapkan bahwa, industri otomotif di daerah Amerika Utara sudah mulai bergerak menggunakan jenis pengelasan CDW ini, dan mempopulerkan CDW karena mempunyai banyak kelebihan [11]. Beberapa kelebihan yang dimiliki oleh pengelasan ini adalah: menggunakan sedikit energi dan dapat dilakukan berkali-kali atau untuk produksi massal, tergantung dari kapasitas mesin las.

Peneliti menyadari bahwa jenis dan bentuk geometri benda kerja untuk pengelasan CDW khususnya untuk *stud* dan *pins welding* yang ada di pasaran berbeda-beda karena standar geometri yang dikeluarkan tergantung dari produsen mesin las [12]–[14]. Berikut beberapa makalah yang mencoba membahas topik mengenai bentuk geometri dengan tujuan untuk mendapatkan bentuk geometri yang tepat dalam pengelasan CDW [15]–[19]. Dattoma melakukan penelitian dengan cara memvariasikan *igniter dimension* pada spesimen CDW yang selanjutnya dikelompokkan kedalam beberapa kelas [16]. Sebelumnya Casalino melakukan penelitian yang membandingkan permukaan yang berbentuk *sawtooth* dan *wave profile*. Dari penelitian ini Casalino mendapatkan kesimpulan bahwa *sawtooth profile* mendapatkan nilai uji tarik yang lebih baik dibandingkan dengan *wave profile* [17]. Dimana dari beberapa makalah tersebut belum dapat disimpulkan bentuk permukaan yang paling sesuai untuk CDW.

Penelitian ini sangat penting untuk dilakukan sebagai pertimbangan dalam memilih material karena melalui penelitian ini, tegangan ambang yang terdapat pada material dapat diketahui. Tegangan ambang suatu material dianggap sebagai batas kemampuan material untuk bertahan terhadap SCC, dengan mengetahui batas kemampuan tersebut maka fenomena SCC dapat diantisipasi secara dini.

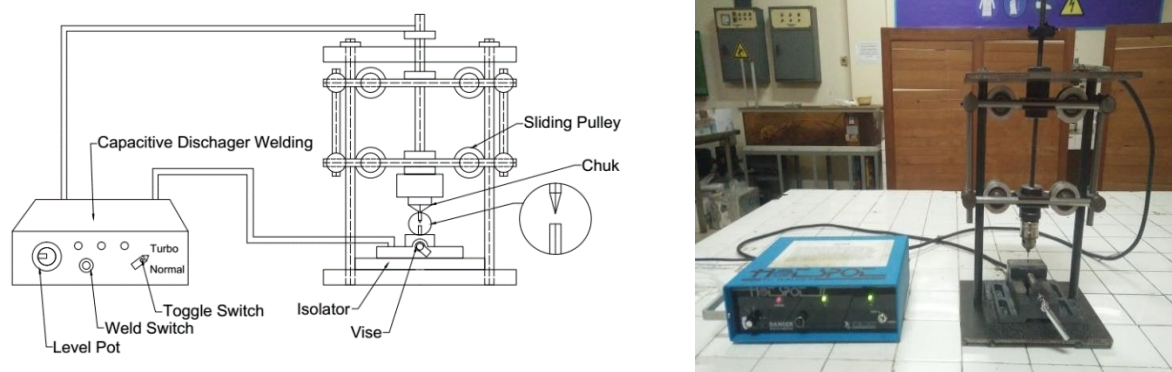
2. METODE DAN BAHAN

Metode pengujian SCC yang diterapkan dalam penelitian ini adalah *Constant Load Test* (CLT) yang merupakan salah satu pengujian SCC khusus pada bentuk pejal tanpa perlakuan retak (*precrack*). Peneliti menggunakan metode CLT karena sesuai dengan penerapan dari aplikasi benda yang dilas. Alasan lain karena metode ini membutuhkan peralatan yang sederhana dan ringkas serta mudah dilakukan. Adapun waktu yang dibutuhkan untuk pengujian ini relatif lebih lama dibandingkan beberapa metode pengujian yang lainnya karena pada pengujian ini yang menjadi perhatian utama adalah *time to failure* (waktu patah). Waktu patah tersebut dalam satuan menit, jam bahkan hari tergantung dari luas penampang spesimen dan beban yang diberikan.

CLT atau pemberian beban secara konstan pada spesimen yang terendam di dalam konsentrasi 1 Molar larutan korosif NH_3OH akan diterapkan terhadap hasil sambungan tersebut sehingga dapat terpapar tegangan dan lingkungan korosif secara bersamaan. Pengujian SCC dengan metode CLT didefinisikan sebagai pemberian beban atau tegangan tarik kepada material dengan tujuan mengetahui atau mendeteksi kekuatan daripada material tersebut. Prinsip dari pengujian ini, secara garis besar dapat dijelaskan sebagai berikut: spesimen yang telah dibentuk sedemikian rupa akan diregangkan secara merata dengan laju dan tingkat pembebanan yang telah ditentukan terlebih dahulu. Selanjutnya akan dilakukan pencatatan waktu peregangan daripada spesimen tersebut hingga mengalami kegagalan atau patah [20]. Pengujian CLT ini cocok untuk kegagalan SCC yang disebabkan oleh tegangan yang terjadi dalam penerapannya. Penampang efektif spesimen berkurang karena adanya retak, pengujian dengan beban konstan mencakup situasi tegangan yang

diintensipkan. Oleh karena itu, kemungkinan besar pengujian tersebut akan menyebabkan kegagalan atau patah lebih cepat dibandingkan dengan pengujian perpanjangan konstan. Sebagai akibatnya, dalam sistem tertentu, nilai ambang tegangan kritis mungkin lebih rendah ketika ditentukan di bawah beban konstan daripada di bawah regangan konstan [21].

Penyambungan logam dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya adalah penyambungan melalui proses pengelasan. Pengelasan adalah metode penyambungan dengan cara membuat logam menjadi panas hingga titik lebur kemudian disambungkan. Metode pengelasan juga terbagi dalam beberapa jenis dan pada penelitian ini proses pengelasan yang diterapkan untuk menyambungkan kedua material adalah jenis mesin *capacitive discharge welding*. CDW adalah salah satu anggota dari *heat resistance welding process* [17]. Teknik ini menggunakan energi yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan pengelasan titik resistensi konvensional (RSW) [22]. Mesin las CDW menghasilkan api elektrik untuk meleburkan atau menggabungkan dua buah logam dari material yang sama maupun yang berbeda dan menyambungkan ke berbagai logam lainnya. Menurut Scotmer industri otomotif di sekitaran Amerika Utara juga sudah mulai bergerak dan mempopulerkan pengelasan CDW ini karena kelebihan yang dimilikinya [11].



Gambar 1. Proses CDW, Skema pengelasan (kiri) dan photo mesin CDW(kanan).

Parameter untuk mesin las CDW adalah kuat tekan las, energi yang digunakan dalam melakukan pengelasan, diameter material, tegangan listrik, serta jarak atau tinggi material sebelum disambung. Kuat tekan las yang digunakan pada penelitian ini sebesar 4 kg atau 39,2 N. Sedangkan untuk energi digunakan 120 J, karena energi tersebut (120 J) menghasilkan pembakaran yang stabil dan sesuai dengan diameter spesimen. Tegangan listrik pada mesin las ada dua yaitu pengelasan normal 35 VDC untuk material yang berukuran kecil seperti *thermocouple* dan 75 VDC untuk material solid seperti baut dll. Parameter yang terakhir adalah *drop height* atau jarak antara material saat dilakukan pengelasan, hal ini juga merupakan hal penting karena menentukan waktu pengelasan dan berpengaruh terhadap keluaran energi mesin las.

Beberapa hal penting yang harus diperhatikan pada setiap mesin las adalah energi yang digunakan, seperti pada mesin las CDW ini terdapat kontrol energi yang dilepaskan oleh kapasitor. Dimana energi yang digunakan akan menentukan besar diameter benda kerja yang dilas, namun bisa juga diasumsikan bahwa semakin tinggi energi yang digunakan dalam pengelasan akan membuat material yang dilas melebur terlalu banyak. Proses pengelasan CDW berlangsung 1 sampai dengan 3 ms, hal ini membuat proses pengelasan efektif untuk produksi massal [23]. Menurut Lou [24] pada penelitiannya, ketika tegangan las melebihi 450V, sambungan las cenderung gagal.

2.1 Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan material baja karbon rendah dan kuningan sebagai bahan dasar. Baja karbon rendah dan kuningan diangkat sebagai material penelitian karena material tersebut banyak tersedia di pasaran dan juga sangat mudah kita temui pada penggunaan sehari-hari. Salah satu contoh penggunaan material ini adalah pada alat kelistrikan. Selain sebagai bahan utama alat kelistrikan, kuningan juga baik digunakan dalam bidang kesehatan karena unsur utama yang terkandung dalam kuningan adalah Cu yang sudah terbukti dari beberapa penelitian dapat digunakan sebagai bahan anti bakteri [25] [26]. Sedangkan baja karbon adalah material yang kuat sehingga jika keduanya digabungkan maka menghasilkan kombinasi yang sangat baik dalam berbagai bidang. Terdapat berbagai macam spesifikasi dan komposisi baja karbon dan kuningan pasaran saat ini. Berikut adalah komposisi dan sifat mekanik dari material yang digunakan.

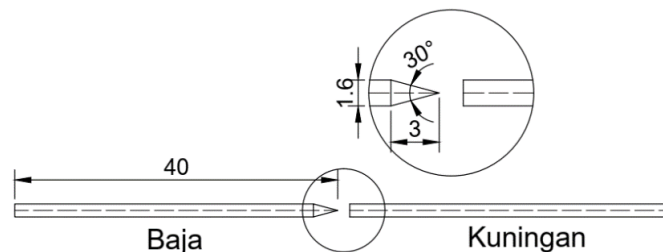
Tabel 1 : Komposisi Kimia Material

MATERIAL	KOMPOSISI KIMIA % WEIGHT						
	Fe	C	Si	Mn	Cu	Zn	Sn
Baja Karbon	Balance	0,1	1	1,40	-	-	-
Kuningan	-	-	0.3	-	Balance	5.9	0.8

Tabel 2 : Sifat Mekanik Material

MATERIAL	SIFAT MEKANIK			
	MELTING POINT °C	UTS N/mm ²	HARDNESS BHN	DENSITY(g/cm ³)
Baja Karbon	1450	1036	120	-
Kuningan	899	888	-	8.4

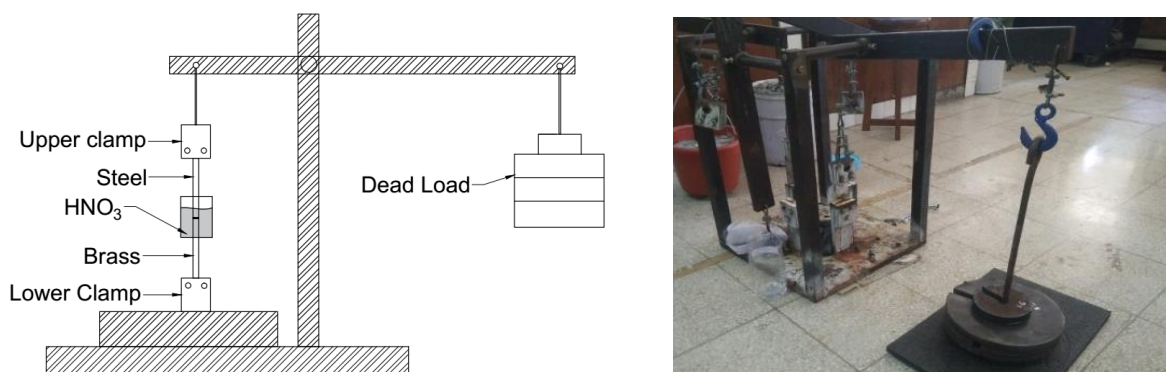
Sebelum kedua material tersebut disambung, terlebih dahulu dilakukan perlakuan persiapan permukaan (*surface preparation*). Hal ini dilakukan agar kedua material tersebut tersambung dengan baik, karena baja memiliki sifat mampu las yang lebih baik dibandingkan dengan kuningan, maka baja tersebut dibuat lancip 30° agar ujung baja dapat melebur lebih banyak dan mengikat logam kuningan lebih erat. Replika sambungan setiap variasi dibuat sebanyak lima untuk membuat penelitian semakin akurat.



Gambar 2 : Spesimen α_1

2.2 Instalasi Penelitian

Berikut di Gambarkan instalasi alat uji SCC yang merupakan alat untuk melakukan pengujian utama dari penelitian ini. Alat uji SCC yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat uji yang dibuat secara manual namun dalam pembuatan alat uji ini selalu mempertimbangkan aspek teknis dan ilmu mekanika guna mendapatkan hasil uji yang akurat. Aspek teknis yang dimaksud salah satunya yang paling penting adalah panjang lengan pengungkit untuk menghitung diagram benda bebas seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Rujukan untuk uji tarik SCC ini adalah standar ASTM-G49-85 [27].



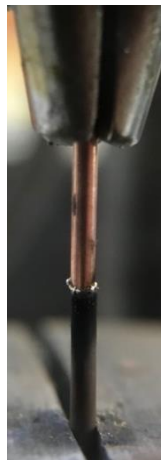
Gambar 3. Instalasi CLT, skema (kiri) dan photo CLT (kanan).

Dalam melakukan pengujian SCC ini, ujung baja karbon rendah diletakkan pada bagian penjepit atas dan ujung kuningan diletakkan pada penjepit bagian bawah. Suhu ruangan dan tekanan udara dalam melakukan penelitian juga diusahakan agar tidak berubah. Hal ini perlu dilakukan untuk menjaga agar setiap pengambilan data dilakukan secara konsisten.

Parameter dalam melakukan pengujian CLT ini adalah beban yang diterapkan terhadap spesimen, panjang lengan pengungkit pada alat uji, serta jenis dan konsentrasi larutan korosif. Untuk mendapatkan tegangan ambang maka pada spesimen harus diberikan beban yang bervariasi tergantung dari tegangan maksimum spesimen. Beban yang diterapkan terhadap benda uji dimulai dari 16 kg sampai 24 kg karena pada beban 24kg sambungan sudah tidak dapat menahan beban tersebut. Selanjutnya untuk mempermudah perhitungan tegangan aplikasi maka digunakan panjang lengan pengungkit 500mm. HNO₃ 1 molar digunakan sebagai larutan korosif karena larutan tersebut sangat efektif untuk membuat material baja dan kuningan terkorosi dengan cepat.

3. HASIL DAN DISKUSI

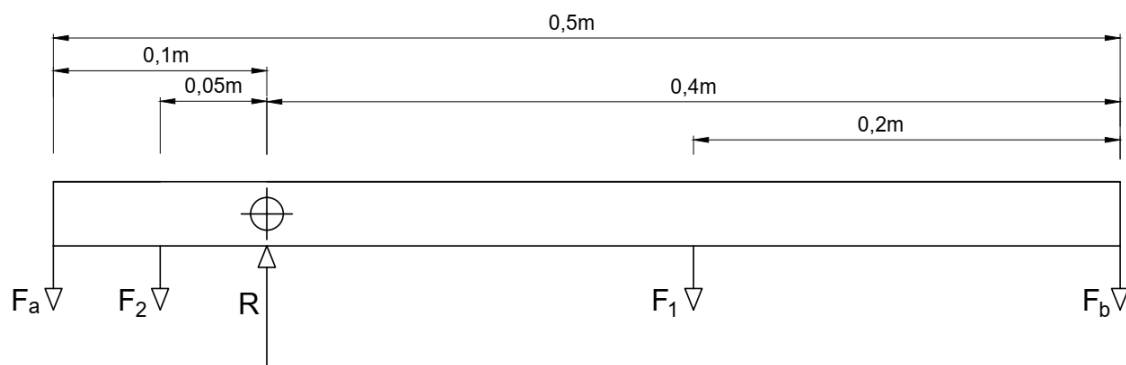
Hasil sambungan las CDW dapat dilihat pada Gambar 4. Gambar tersebut menunjukkan sambungan yang baik karena pada pinggiran daerah kontak las terdapat *flush* yang beraturan dan terlihat kuat. Argumen ini juga diperkuat pada saat proses pengelasan berlangsung terdengar suara pengelasan yang baik.



Gambar 4. Hasil sambungan CDW 120J

Acuan pada pengujian SCC dengan metode CLT adalah waktu patah [28]. Waktu patah pada setiap tegangan dicatat sebagai dasar untuk menentukan nilai tegangan ambang. Parameter pengelasan pada penelitian ini telah dijelaskan pada poin metode dan bahan. Sambungan las kemudian dibawa ke laboratorium untuk diuji dengan metode CLT agar ketahanan sambungan terhadap beban SCC dapat diukur.

Selanjutnya dilakukan perhitungan diagram benda bebas pada sistem pengungkit alat uji. Perhitungan ini dilakukan untuk mendapatkan nilai gaya aplikasi pada masing-masing beban tersebut. Nilai gaya aplikasi ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penentuan tegangan ambang.



Gambar 5. Diagram benda bebas

Berikut disajikan contoh untuk pembebanan 18kg:

$$\sum M_R = 0 \tag{1}$$

$$(F_b \cdot 0,4m) + (F_1 \cdot 0,2m) - (F_2 \cdot 0,05m) - (F_a \cdot 0,1m) = 0$$

Keterangan:

F_b = Gaya akibat beban (18kg ≈ 176,58N)

F₁ = Gaya dari 4/5 beban lengan pengungkit (2,25kg ≈ 22,0725N)

F₂ = Gaya dari 1/5 beban lengan pengungkit (0,5625kg ≈ 5,51813N)

Gaya aplikasi (F_a) yang terjadi akibat beban 18kg adalah:

$$(176,58N \cdot 0,4m) + (22,0649N \cdot 0,2m) - (5,5162N \cdot 0,05m) = F_a \cdot 0,1m$$

$$F_a = 747,7068N$$

Nilai tegangan akibat pembebanan

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2}$$

A = Luas penampang spesimen, dapat diperoleh berdasarkan rumus

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = \pi \times (0,8 \text{ mm})^2$$

$$A = 2,011 \text{ mm}^2$$

Selanjutnya dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan tegangan akibat pembebanan

$$\sigma = \frac{748,6198N}{2,011 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 371,878 \text{ MPa}$$

Berikut adalah Tabel hasil penelitian dan nilai tegangan pada masing-masing beban.

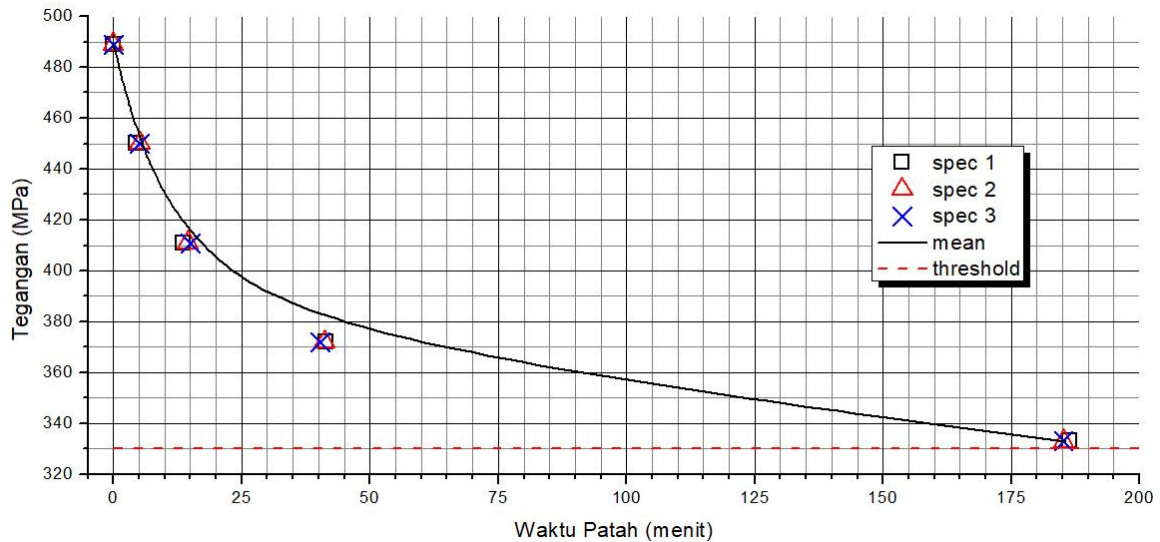
Tabel 2 : Data Pengujian SCC

PEMBEBANAN (Kg)	TEGANGAN (MPa)	WAKTU PATAH (menit)
16	332,846	186,47
		185,23
		185,19
18	371,878	41,41
		41,13
		40,26
20	410,911	13,56
		14,47
		15,05
22	449,944	4,47
		5,09
		5,16
24	488,977	0
		0
		0

Berdasarkan data pada Tabel 2, dapat dikatakan bahwa semakin berat beban besar tegangan yang

diberikan terhadap sambungan las menyebabkan waktu patah akan semakin cepat. Seperti pada beban 16 kg, membuat sambungan las patah dalam waktu 185.26 menit (rata-rata). Ketika beban ditambah menjadi 18, 20, dan 22 kg maka sambungan las tersebut akan patah dalam waktu masing-masing 42,11 menit, 14,36 menit, 5,18 menit dan pada beban 24kg, sambungan las langsung patah.

Data yang telah diperoleh kemudian disajikan dalam bentuk grafik sehingga akan diperoleh nilai tegangan ambang. Nilai tersebut diperoleh dari grafik hubungan antara waktu patah terhadap tegangan yang terjadi pada spesimen. Berikut ini adalah grafik tegangan ambang yang dimaksud ;



Gambar 6 : Grafik nilai tegangan ambang

Grafik 6 diatas menunjukkan bahwa tegangan ambang (σ_{Th}) untuk sambungan las dissimilar antara baja dan kuningan yang disambung menggunakan metode CDW dengan parameter 120J berada pada pembebanan 16kg atau jika di konversi ke nilai tegangan yang bekerja pada sambungan las berdiameter 1.6mm adalah 330 MPa.

4. KESIMPULAN

Nilai tegangan ambang pada pengelasan dissimilar CDW antara baja karbon rendah dan kuningan yang berdiameter 1.6mm adalah 330 MPa. Semakin tinggi tegangan yang diberikan pada sambungan las maka umur material atau sambungan tersebut juga akan semakin rendah.

5. PERNYATAAN TERIMAKASIH

Melalui pernyataan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pembimbing Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D dan Oyong Novareza ST., MT., Ph.D yang telah membantu penulis dalam merampungkan artikel pada *Jurnal Rekayasa Mesin* ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] NATIONAL ENERGY BOARD, "Stress Corrosion Cracking on Canadian Oil and Gas Pipelines." MH-2-95, NEB, Calgary, Alberta, Canada, 1996.
- [2] A. TURNBULL, "Stress Corrosion Cracking : Mechanisms," in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, no. I, Elsevier Ltd, 2001, pp. 1–6.
- [3] R. H. JONES, "Materials Performance and Evaluation," in *Stress Corrosion Cracking*, Ohio: ASM, Materials Park, 1992.
- [4] V. S. RAJA and T. SHOJI, *Stress corrosion cracking-Theory and practice*. New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [5] D. B. DARMADI, N. A. SUGIARTO, and F. GAPSARI, "Stress Corrosion Cracking at ASTM A36 Plate with Varied Grain Orientation," *Int. Rev. Mech. Eng.*, vol. 12, p. 987, Dec. 2018.

- [6] SUDARSONO, D. B. DARMADI, and F. GAPSARI, “Analisis Stress Corrosion Cracking Sambungan Las Gas Tungsten Arc Welding Spesimen Aluminium sebelum dan sesudah Stress Relieving,” Universitas Brawijaya, 2018.
- [7] R. A. COTTIS, “Guides to Good Practice in Corrosion Control-Stress Corrosion Cracking,” in *Corrosion and Protection Centre*, United Kingdom: National Physical Laboratory, 2000.
- [8] D. B. DARMADI, F. TEKNIK, and J. MESIN, “Model Termal Proses Pengelasan Keliling Multipass Pada Sambungan Pipa API-X70,” *Rekayasa Mesin*, vol. 5, no. 3, pp. 253–261, 2014.
- [9] Y. F. CHENG, *Stress Corrosion Cracking of Pipelines*, 1st ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [10] H. LONG, Y. HU, X. JIN, J. SHAO, and H. ZHU, “Effect of holding time on microstructure and mechanical properties of resistance spot welds between low carbon steel and advanced high strength steel,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 117, pp. 556–563, 2016.
- [11] N. SCOTCHMER, “The Current Rise in the Use of Capacitor Discharge Welding,” *Weld. J.*, vol. 94, no. 2, pp. 32–36, 2015.
- [12] DCC CORPORATION, “Stud Welding Equipment, Stud Welders, Weld Stud Fasteners, Parts, Stud Welder Rentals & Repairs,” *DCC Corporation*, 2013. [Online]. Available: <http://catalog.dcccorporation.com/viewitems/thermocouple-wire/thermocouple-wire-2>. [Accessed: 12-Sep-2019].
- [13] SUNBELT, *SUNBELT Master Catalog-Product Specification and Application Guide*. Texas: Sunbelt Stud Welding, Inc.
- [14] IMAGE, “The Stud Welding Process,” *IMAGE INDUSTRI INC.* [Online]. Available: <https://www.imageindustries.com/what-is-stud-welding/>. [Accessed: 12-Sep-2019].
- [15] F. W. PANELLA, V. DATTOMA, M. DE GIORGI, F. PALANO, and A. CAROFALO, “CDW aluminium joints welding and optimisation with NDT/mechanical testing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, no. 102, pp. 3689–3698, 2019.
- [16] V. DATTOMA, F. PALANO, and F. W. PANELLA, “Mechanical and technological analysis of AISI 304 butt joints welded with capacitor discharge process,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 176–184, 2010.
- [17] G. CASALINO and F. W. PANELLA, “Numerical simulation of multi-point capacitor discharge welding of AISI 304 bars,” *J. Eng. Manuf.*, vol. 220, pp. 647–655, 2006.
- [18] G. CASALINO and F. W. PANELLA, “Microstructural analysis of AISI 304 bars welded with high speed pulsed discharges,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 191, pp. 149–152, 2007.
- [19] F. PALANO, S. CHIOZZI, F. W. PANELLA, and V. DATTOMA, “Characterization of Steel Welded Joints with Hybrid Projection and Processes,” *Mater. Manuf. Processes*, 2012.
- [20] K. R. TRETWEY and J. CHAMBERLAIN, *Corrosion for Science and Engineering*. England: Pub. Longman Scientific & Technical, 1996.
- [21] B. ISECKE, “Test Methods for Assessing the Susceptibility of Prestressing Steels to Hydrogen Induced SCC,” *Eur. Fed. Corros. Publ.*, 2004.
- [22] M. SHAKIL, N. H. TARIQ, M. AHMAD, M. A. CHOUDHARY, J. I. AKHTER, and S. S. BABU, “Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints,” *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 263–273, 2014.
- [23] S. M. PATNAIK, “Development of an Automated Capacitor Discharge Welding System,” Oregon State University, 1996.
- [24] J. LUO, Z. ZHOU, X. CAO, C. ZOU, and C. ZOU, “Microstructure and Failure Analysis of Resistance Projection Welding of Nuts to AHSS with Capacitor Discharge Welding,” vol. 59, no. 2, pp. 305–311, 2019.
- [25] L. P. ARENSEN, R. THAKAR, and H. SULTAN, “The Use of Copper as an Antimicrobial Agent in Health Care , Including Obstetrics and Gynecology,” *Clin. Microbiol. Rev.*, vol. 32, no. 4, pp. 1–28, 2019.
- [26] N. CIACOTICH, K. N. KRAGH, M. LICHTENBERG, J. E. TESDORPF, T. BJARNSHOLT, and L. GRAM, “In Situ Monitoring of the Antibacterial Activity of a Copper – Silver Alloy Using Confocal Laser Scanning Microscopy and pH Microsensors,” *Glob. Challenges*, 2019.
- [27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, *ASTM G49 - 85(2000), Standard Practice for*

Preparation and Use of Direct Tension Stress-Corrosion Test Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2000.

- [28] W. DIETZEL, A. TURNBULL, S. S. RAMANAN, and S. ARUN, *Stress Corrosion Cracking*, no. February 2016. Elsevier Inc., 2017.