

Analisa Stress Corrosion Cracking Pada Sambungan Kawat Las ER70S Pada Plat Baja SS400

Djarot B. Darmadi^{a,1}, Andika Dewa Satrio^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Universitas Brawijaya, Malang

¹b_darmadi_djarot@ub.ac.id

ABSTRACT

The susceptibility of weld joints to the Stress Corrosion Cracking (SCC) load alarmed the researchers since pipeline blow-outs were initiated in the area close to the weld joints. This article evaluates the SCC resiliences of the ER70S wire filler metal to the SS400 plate. The Capacitive Discharge Welding (CDW) with a varied angle of the filler metal as an independent variable, whilst the other parameters were kept constant. The joint was then exposed to the SCC load, i.e., dipped in the 1M HCl solution with varied external tensile load to obtain the dependent variable: time to failure (time to brake). The results show that a sharper wire tip generally provides higher SCC resilience, accept what was shown by the 30°specimens. A higher weld nugget is provided with a sharper wire tip, which guarantees enough weld metal. However, the impact phenomenon in the CDW process splashed too much nugget beyond the formed joint, which is proven by the many spatters in the weld joint. This thrown-out nugget substance, in turn, decreases the intended nugget volume to form the joint. The results show that the 60-wire tip angle provides the joint with the highest SCC resiliences, indicated by the longest time to brake when loaded with an equal external load.

Keywords: Stress corrosion cracking, capacitive discharge welding, SCC resiliences, time to fail

Received 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

PENDAHULUAN

Kegagalan dari suatu konstruksi atau elemen mesin secara tradisional ditinjau dari kondisi tegangan yang terjadi pada konstruksi atau elemen mesin tersebut [1, 2] yang biasanya disebut sebagai kegagalan *catastrophic*. Selain hal itu terdapat kegagalan yang merupakan fungsi waktu, antara lain kegagalan akibat lingkungan korosif [3]. Kegagalan yang merupakan kombinasi keduanya, ditambah dengan keberadaan retak yang diinisiasi *voids*, ketidaksempurnaan struktur mikro dikenal sebagai fenomena *Stress Corrosion Cracking (SCC)* [4-6]. Kesadaran akan pentingnya tinjauan SCC pada sambungan las diawali dengan meledaknya sambungan las di Argentina [7], dan jaringan pipa yang menyalurkan gas alam dari Australia Tengah ke Sydney dan jaringan pipa Trans Canada yang meledak di Winnipeg [8].

Tegangan bisa berupa tegangan sisa dan tegangan akibat beban luar. Pada proses pengelasan selalu terjadi tegangan sisa dikarenakan tegangan thermal akibat pemanasan lokal oleh proses pengelasan [9]. Seringkali tegangan saat pemanasan menyebabkan regangan yang melebihi regangan plastis, sehingga saat sambungan las mendingin hingga suhu ruangan regangan plastis yang tersisa menyebabkan tegangan sisa. *voids*

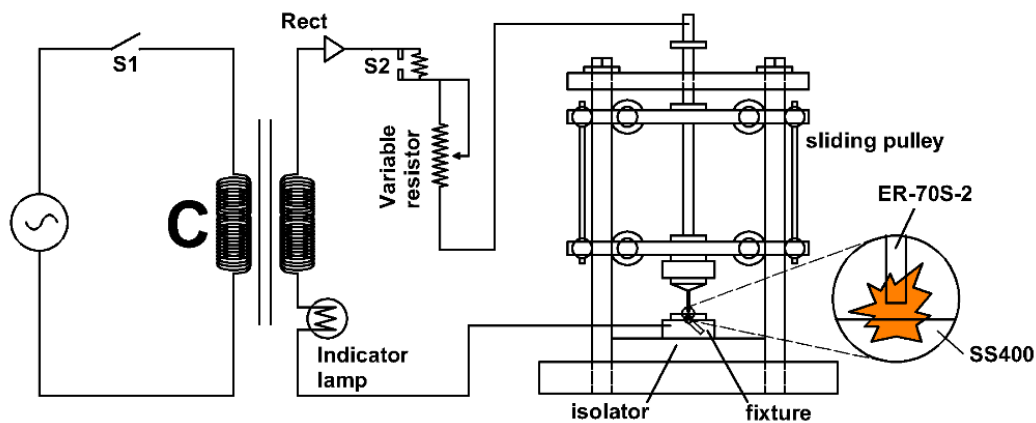
dan ketidaksempurnaan struktur mikro bisa merupakan daerah inisiasi retak, yang sejalan dengan beban luar akan tumbuh menjadi retak. Oleh karena itu dua unsur dari SCC yaitu tegangan dan retak secara alami telah ada pada sambungan las, dan begitu sambungan las terpapar dalam lingkungan korosif maka semua unsur dari SCC telah ada dan sambungan las dengan kemungkinan yang besar akan gagal dikarenakan beban SCC [10].

Logam pengisi ER70S banyak diaplikasikan dalam proses pengelasan karena kelebihan-kelebihannya dalam terminologi sifat-sifat mekanik dan kecocokannya sebagai logam pengisi dengan berbagai jenis logam [11-13]. Pengelasan CDW mulai diaplikasikan secara luas dalam industri mobil di Amerika Utara dan mengalami akselerasi dalam aplikasinya karena kebutuhan pengelasan dissimilar untuk menyediakan kendaraan berbobot ringan [14 - 15]. Pada artikel kali ini didiskusikan ketahanan terhadap SCC dari kawat ER70S yang disambungkan pada plat SS400. Hasil pada penelitian ini dapat merupakan pijakan untuk penelitian berikutnya untuk ketahanan SCC dari sambungan las secara khusus dari baja SS400 dengan logam pengisi ER70S.

METODE DAN BAHAN PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental murni dengan variabel bebas variasi sudut ujung wire dan besarnya beban yang dikonversikan menjadi tegangan pada sambungan sedangkan variabel terikatnya adalah waktu patah. Parameter lain, yaitu lingkungan korosif dibuat konstan. Langkah

ini.



Gambar 1. Proses CDW

Sambungan yang diperoleh, kemudian disetting pada alat uji SCC, diekspos dalam larutan HCl 1M dan dibebani dengan beban bervariasi untuk mendapatkan nilai waktu patah. Waktu patah untuk beban tertentu merupakan data utama dari penelitian ini. Data tambahan seperti kekuatan tarik dari sambungan, foto makro patahan, SEM-EDS ditambahkan untuk mengetahui alasan kenapa diperoleh hasil hubungan besar tegangan dan waktu patah untuk proses pengelasan dengan berbagai variasi sudut ujung wire ER70S. Pada Gambar 2 ditunjukkan alat bantu *jig and fixture* yang dirancang untuk digunakan sebagai alat uji SCC pada penelitian ini.

Bahan yang disambung adalah kawat las ER70S dengan komposisi dan sifat mekanik seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan plat SS400 dengan komposisi dan sifat mekanik seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Pada Gambar 3 ditunjukkan gambar dari kawat las ER70S dan bahan plat SS400. Pada Tabel 3 ditunjukkan parameter pengelasan yang diset pada proses CDW sebagai parameter konstan.

Proses penelitian dilakukan di Laboratorium Proses Produksi, Departemen Teknik Mesin,

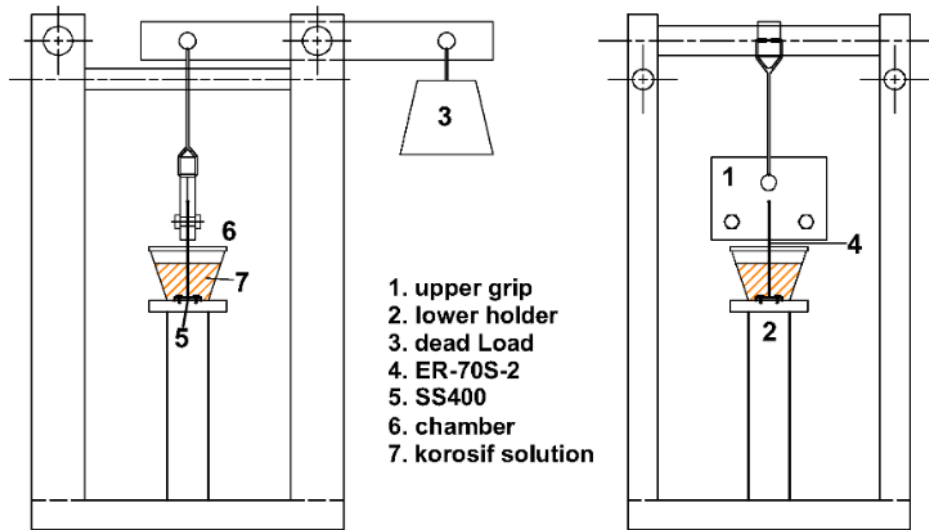
pertama, adalah proses menyambung kawat ER70S pada plat baja SS400. Proses pengelasan dilakukan pada kondisi yang sama kecuali seperti yang telah disebutkan adalah sudut ujung wire yang divariasikan. Energi pengelasan CDW di set pada 100 Joule. Pada Gambar 1 ditunjukkan, skema proses CDW dan alat bantu *jig and fixture* yang dirancang khusus untuk pelaksanaan penelitian kali

Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur, Indonesia. Untuk uji SEM mode BSE dan EDS dilakukan di Laboratorium Sentral Ilmu Hayati (LSIH) Universitas Brawijaya Malang, Jawa Timur, Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Tegangan Ultimate

Pertama dilakukan “beban ultimate”, yakni beban mati yang diberikan diujung tuas pada Gambar 2 tanpa menggunakan larutan korosif. Beban ditambahkan secara bertingkat sedemikian sehingga sambungan CDW antara kawat dan plat patah. Pengujian spesimen dilakukan setelah spesimen uji berhasil disambungkan pada proses pengelasan CDW dengan jarak jatuh pada prosen pengelasan adalah 4mm dan beban pada alat *jig* sebesar 8,7 kg (Gambar 1). Berdasarkan data tersebut dapat diperoleh beban yang harus diberikan saat pengujian SCC nantinya. Uji beban ultimate disajikan pada Tabel 4, yang disajikan dalam bentuk grafik seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 2. Skema alat uji SCC

Tabel 1. Komposisi dan sifat Material baja ER70S-2

Material	Fe	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo
Baja Karbon	97,7	0,07	0.040	0.90	0,5	-	-	-
AWS classifica-tion	Tensile Strength		Yield Strength		Elongation			
A5.18	psi	MPa	psi	MPa	%			
ER70S-2	70.000	480	58.000	400	22			

Tabel 2. Komposisi dan sifat Material baja SS400

Symbol	C	Mn	P	S
SS400	0,30 max	-	0,050 max	0,050 max

Symbol	Tensile Strength N/mm ²	Yield Strength N/mm ²	Elongation %
SS400	400 to 500	245 min	21 min



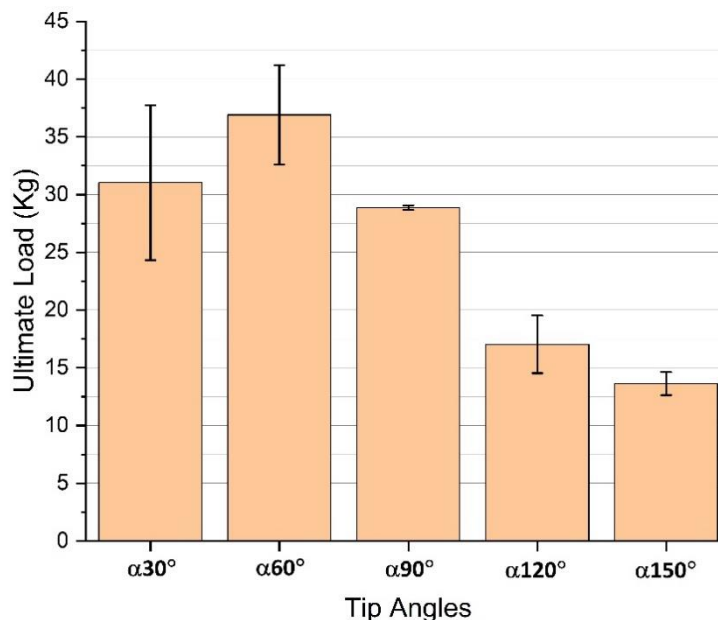
Gambar 3. Bahan kawat ER70S dan plat SS400

Tabel 3. Parameter Pengelasan *Hotspot* CDW

Parameter	Nilai
•Energi yang digunakan	100 J
•Sudut yang digunakan	30°, 60°, 90°, 120°, 150°
•Kuat tekan las	40 N
•Drop Height	4mm
•Tegangan Listrik	75 VD

Tabel 4. Tegangan *Ultimate*

170 V (ER70S - SS400) 4mm (Kg)					
No	30°	60°	90°	120°	150°
1	29	39,5	28,8	18,7	14,3
2	28,7	35,2	28,8	16,2	13,3
3	35,4	36	29	16,2	13,3
Σ	31,033	36,9	28,867	17,033	13,63



Gambar 4. Beban patah

Dengan memperhitungkan panjang lengan beban dan lengan kuasa serta mempertimbangkan berat dari tuas, maka beban ultimate bisa disajikan dalam terminologi tegangan. Alat pada Gambar 2, juga bisa digunakan untuk mengukur tegangan ultimate dari kawat ER70S dengan meningkatkan beban statis sehingga diperoleh kekuatan tarik dari kawat adalah 1482,54 MPa

Data Pembebanan dan Waktu Patah

Data yang diperoleh dari uji SCC adalah data waktu patah pada hasil uji spesimen setiap variasi sudut permukaan pengelasan, untuk

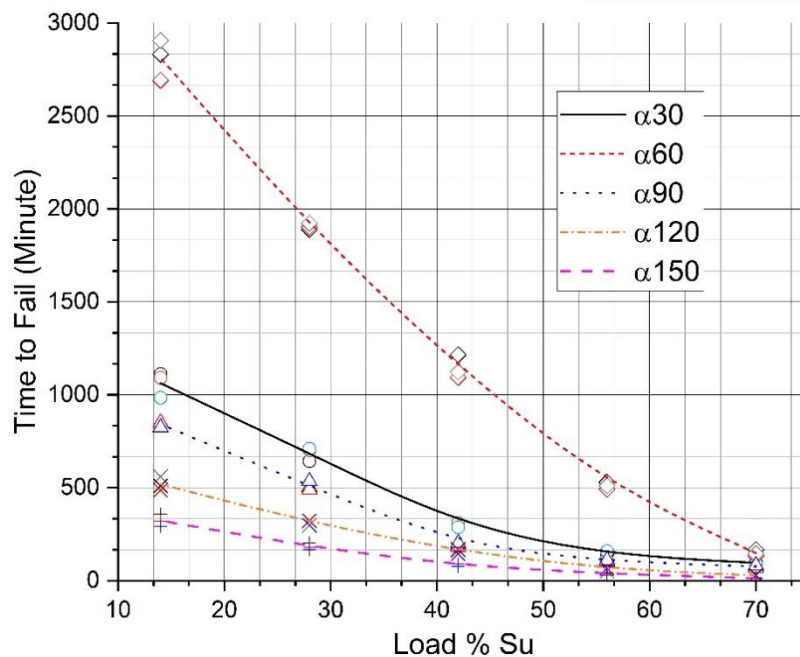
mengetahui pengaruh variasi sudut permukaan pengelasan terhadap waktu patah. Setiap Variasi sudut permukaan *wire* dilakukan percobaan sebanyak 3 kali dan 5 variasi sudut ujung wire ER70S yaitu 30°, 60°, 90°, 120°, 150°. Untuk pengujian SCC, larutan korosif HCL dibuat konstan pada konsentrasi 1M sedangkan beban luar dibuat bervariasi, dinormalisasi terhadap kekuatan tarik masing-masing variasi sudut wire yaitu pada 70%, 56%, 42%, 28% dan 14%. Waktu patah tiap-tiap variasi dicatat, dan merupakan data utama dari kegiatan penelitian ini seperti ditunjukkan pada Tabel 5 yang disajikan dalam bentuk grafik seperti ditunjukkan pada

Gambar 4. Gambar 4 menjelaskan hubungan diagram waktu patah dan pembebanan. Pada pembebanan 80% *kekuatan ultimate* hasilnya bervariasi dengan variasi sudut permukaan *wire*. Sambungan las dengan variasi sudut 60° mengalami patah setelah 148 menit. Terjadi penurunan waktu patah untuk sudut 30°, 90°, 120°, dan

150°. Pada sudut permukaan *wire* las 30° mengalami waktu patah yaitu 96 menit. Pada sudut 90° mengalami patah setelah 76 menit, pada sudut 120° dan 150° terjadi setelah 28.67 menit dan 13 menit.

Tabel 5. Waktu Patah Pengujian SCC

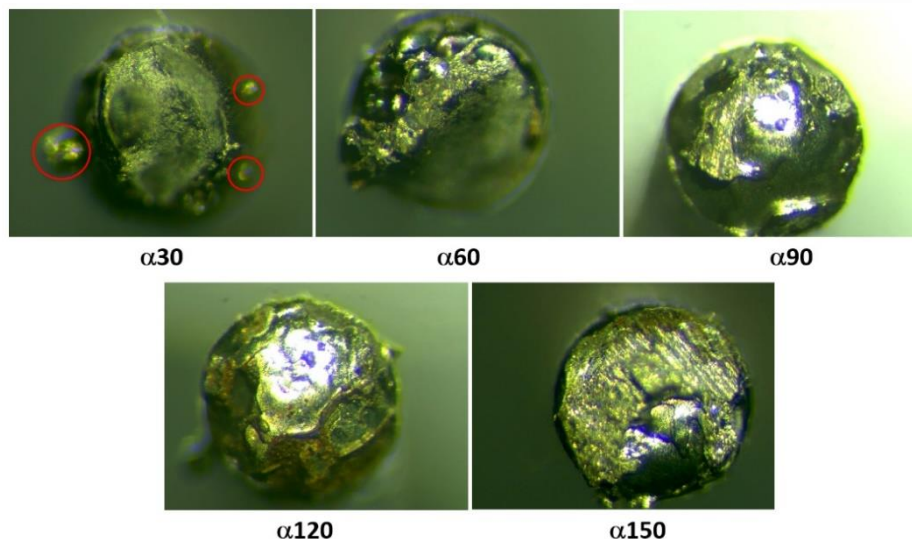
Variasi		Waktu Patah Spesimen (menit)				
		Pembebanan Ke-1 (70% dari σ_u)	Pembebanan Ke-2 (56% dari σ_u)	Pembebanan Ke-3 (42% dari σ_u)	Pembebanan Ke-4 (28% dari σ_u)	Pembebanan Ke-5 (14% dari σ_u)
30°	Sample 1	103	144	290	643	1111
	Sample 2	91	110	310	701	1092
	Sample 3	94	158	288	710	984
	Rata-rata	96	137.3	296	684.6	1062.3
60°	Sample 1	167	530	1216	1890	2832
	Sample 2	134	492	1093	1902	2692
	Sample 3	145	511	1123	1923	2807
	Rata-rata	148.6	511	1144	1905	2777
90°	Sample 1	77	98	190	503	851
	Sample 2	69	103	182	491	850
	Sample 3	82	110	201	535	824
	Rata-rata	76	103.6	191	509.6	841.6
120°	Sample 1	30	67	165	323	510
	Sample 2	28	51	169	320	487
	Sample 3	28	67	144	298	560
	Rata-rata	28.67	61.67	159.3	313.6	519
150°	Sample 1	12	37	77	203	357
	Sample 2	17	45	90	177	320
	Sample 3	10	29	78	167	293
	Rata-rata	13	37	81.67	182.3	323.3



Gambar 4. Diagram waktu patah.

Berdasarkan Gambar 4, juga bisa kita ketahui waktu yang dibutuhkan untuk putus dari setiap variasi sudut permukaan *wire* jika diberikan pembebanan yang berbeda dengan menggunakan interpolasi. Sebagai contoh kasus: dengan menggunakan interpolasi, untuk beban 10 Kg ($\sigma_u = 215.507$) maka sudut permukaan *wire* 150° akan putus setelah 50.833 menit, sudut permukaan *wire* 120° akan putus setelah 234.667 menit, sudut permukaan *wire* 90° akan putus setelah 775.883 menit, sudut permukaan *wire* 60° akan putus setelah 2172.035 menit, sudut permukaan *wire* 30° akan putus setelah 1256.5 menit. Dengan pembebanan 64%, 48%, 32%, dan 16% terhadap σ_u memiliki waktu patah semakin lama untuk variasi sudut permukaan *wire* tertentu. Secara umum dapat dikatakan dengan semakin runcing sudut *wire* akan diperoleh sambungan dengan ketahanan terhadap SCC yang semakin baik. Secara elektronik, rangkaian antara sumber daya, *wire*, plate merupakan rangkaian seri tertutup. Artinya pada seluruh bagian akan mengalir arus dengan besar yang sama. Sudut yang semakin lancip menyebabkan rapat arus listrik yang semakin padat sehingga dengan sudut yang lancip akan tersedia bagian *wire* yang mencair atau melunak dalam jumlah yang semakin banyak yang akan

berfungsi untuk membentuk sambungan antara *wire* dengan plat. Tetapi berdasarkan Gambar 4 dan Tabel 5 variasi sudut permukaan *wire* 60° menghasilkan waktu patah terlama dibandingkan variasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa las pada sudut permukaan *wire* 60° memiliki ketahanan SCC yang tertinggi. Penjelasan akan fenomena ini dapat diperoleh dengan meninjau mekanisme pembentukan sambungan menggunakan metode pengelasan CDW yang secara skematik ditunjukkan pada Gambar 1. *Wire* dengan ujung yang meleleh akan dijatuhkan dari ketinggian 4mm dengan beban 8,7kg. Hal ini akan menyebabkan adanya impuls atau momentum yang menyebabkan logam meleleh pada ujung *wire* akan terlempar keluar dari sambungan sehingga mengurangi ketersediaan bagian meleleh dari *wire* untuk membentuk sambungan. Untuk kasus sudut *wire* 30° terlalu banyak bagian yang terlempar dari daerah sambungan, sehingga pada akhirnya akan mengurangi kualitas sambungan las yang akan mengurangi ketahanan dari sambungan terhadap SCC. Hal ini didukung dari foto makro sambungan, dimana pada variasi sudut *wire* 30° terdapat banyak *spatter* yaitu bagian ujung dari *wire* yang terlempar keluar. *Spatter* ditunjukkan dengan lingkaran merah pada Gambar 5.



Gambar 5. Foto makro patahan sambungan CDW

Tidak hanya mempengaruhi umur SCC dari sambungan, kekuatan tarik juga mencerminkan fenomena ketersediaan logam yang meleleh pada kawat ER70S dan fenomena terjadinya *spatter* ini, sehingga pada akhirnya ujung sudut kawat 60° merupakan kondisi optimal yang menghasilkan kualitas sambungan terbaik

ditinjau dari kekuatan tarik maupun ketahanan terhadap beban SCC.

KESIMPULAN

Berdasarkan dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa persiapan permukaan

yaitu sudut dari kawat ER70S yang benar pada proses pengelasan CDW dapat meningkatkan kualitas sambungan antara *wire* dan plat SS400. Ketersediaan volume yang meleleh dari *wire* merupakan alasan kualitas sambungan yang dihasilkan. Ada dua sebab yang menentukan ketersediaan logam meleleh yang nantinya akan membentuk sambungan, yaitu kerapatan arus dan fenomena impuls/momentum pada proses CDW. Dengan semakin lancip ujung *wire* maka akan tersedia potensi logam meleleh yang lebih besar, tetapi ujung yang lancip dan jumlah logam meleleh yang terlalu besar akan menyebabkan terjadinya spatter saat *wire* dijatuhkan keatas plat SS400. Dengan alasan seperti didiskusikan, maka sudut ujung *wire* 60° merupakan kondisi optimum yang dapat menghasilkan sambungan dengan kualitas terbaik yang menghasilkan kekuatan tarik dan ketahanan terhadap SCC paling maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aswin, Ahmad Hasnan, *Stress Analysis Evaluation and Pipe Support Type on High-Pressure and Temperature Steam Pipe*, International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Application, vol. 4, no.1, pp. 31-38, 2023, DOI: 10.21776/MECHTA.2023.004.01.4.
- [2] Fauzan Aulia, Achmad As'ad Sonief, Nafisah Arina Hidayati, *Stress Distribution Analysis on Ligament Augmented and Reconstruction System (LARS) Using Finite Element Method (FEM)*, International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Application, vol. 4, no.1, pp. 61-68, 2023, DOI: 10.21776/MECHTA.2023.004.01.7.
- [3] Abdul Ghofur, Dhonie Adetya Rachman, Muhammad Mochtar Lutfi, Fathur Rahman, *The Influence of Leachate Water on Corrosion Rate of Mild Steel Plate*, International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Application, vol. 2, no.2, pp. 137-143, 2021, <https://doi.org/10.21776/MECHTA.2021.02.02.7>.
- [4] Hamid Niazi, Reg Eadie, Weixing Chen, Hao Zhang, *High pH Stress Corrosion Cracking Initiation and Crack Evolution in Buried Steel Pipelines: A Review*, Engineering Failure Analysis, vol. 120, ART105013, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2020.105013>.
- [5] W. Xu, Y.C. Xin, B. Zhang, X.Y. Li, *Stress Corrosion Cracking Resistant Nanostructured Al-Mg Alloy with Low Angle Grain Boundaries*, Acta Materialia, vol. 225, ART. 117607, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117607>.
- [6] XiaoShun Zhang, ShengJie Wang, Xin Wang, Zhongyu Cui, Hongzhi Cui, Yizhou Li, *The Stress Corrosion Cracking Behaviour of N80 Carbon Steel Under a Crevice in Acidic Solution Containing Different Concentration of NaCl*, Corrosion Science, vol. 216, ART. 111068, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111068>.
- [7] C. Manfredi and J.L. Otegui, *Failures by SCC in Buried Pipelines*, Engineering Failure Analysis, Vol.9, pp. 495-509, 2002.
- [8] J. Wang and A. Atrens, *Microstructure and Grain Boundary Microanalysis of X70 Pipeline Steel*, Journal of Material Science, vol.38, pp.323-330, 2003.
- [9] Djarot B. Darmadi, Lingga P. Setiawan, Sahrudin Mahzan, *Evaluating the GMAW Joint with a constant heat input*, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, vol.54, no.2, pp. 142-149, 2019.
- [10] Djarot B. Darmadi, Femiana Gapsari, Osmar Buntu Lobo, Firman Mangasa Simanjuntak, *Stress Corrosion Threshold for Dissimilar Capacitive Discharge Welding Joint with Varied Surface Geometry*, Applied Sciences, vol. 10, no. 6, doi:10.3390/app10062180, 2020.
- [11] Vishakha Shukla, Vikash Kumar, Angkit Dixit, *Microstructural Characteristics and Tensile Properties of ER70S-6 Manufactured by Robotic CMT Wire-and-Arc Additive Manufacturing*, Materials Today: Proceedings, Article in Press.
- [12] Sang-Woo Han, Hansol Kim, Geonho Lee, Seungcheol Shin, Jongho Jeon, Sangjun Han, Gyuyeol Bae, Jungho Cho, *GMA Process Development for Pore-Free Zinc-Coated Steel Sheet Welding in Automotive Industry*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 126, pp. 3849-3859, 2023, <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11338-9>.
- [13] Bappa Das, Biranchi N. Panda, Uday S. Dixit, *Microstructure and Mechanical Properties of ER70S-6 Alloy Cladding on*

Aluminum Using a Cold Metal Transfer Process, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 31, pp. 9385-9398, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06937-8>.

- [14] Nigel Scotchmer, *The Current Rise in The Use of Capacitor Discharge Welding*, Welding Journal, vol. 95, pp. 32-36, 2015.
- [15] Qian Zhang, Baozhu Zhang, Yun Luo, Gang Yang, Hong-Ziang Zheng, *Effect of the Welding Process on Microstructure, Microhardness, and Residual Stresses of Capacitor Discharge Stud Welded Joint*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 144, no. 1, Art 011007, 2022, <https://doi.org/10.1115/1.4051533>.