

## STRESS CORROSION CRACKING SAMBUNGAN LAS CDW SS 316L DAN ASTM A36 DALAM VARIASI SUHU LINGKUNGAN KOROSIF FeCl<sub>2</sub>

### Angga Saputra

Mahasiswa S2  
Universitas Brawijaya  
Jurusan Teknik Mesin  
anggapolnes@gmail.com

### Femiana Gapsari

Tenaga Pengajar (Dosen)  
Universitas Brawijaya  
Jurusan Teknik Mesin  
femianagapsari@gmail.com

### Djarot B. Darmadi

Tenaga Pengajar (Dosen)  
Universitas Brawijaya  
Jurusan Teknik Mesin  
b\_darmadi\_djarot@ub.ac.id

*Stress Corrosion Cracking (SCC) is known as a trigger for material failure, especially in Dissimilar Metal Welding (DMW). Although DMW promises wide application in structural design, it is found that there is high SCC mitigation making it prone to failure. Capacitor Discharge Welding (CDW) is one of the best dissimilar metal welding methods. This article observes the weld joints of CDW ASTM A36 and SS 316L against the phenomenon of SCC in a corrosive environment temperature variation of FeCl<sub>2</sub> 0.5 Molar (30, 40, and 50 °C). The results of the Constant Load Test (CLT) show that the welding threshold strength has decreased significantly due to the increase in the galvanic corrosion current which increases at high temperatures. The stress threshold of specimen T<sub>1</sub> with a temperature variation of 30 °C K1cc 360 MPa, the specimen T<sub>2</sub> produces a threshold of 216 MPa and the specimen T<sub>3</sub> with 144 MPa. It can be concluded that changes in the temperature of the corrosive environment accelerate the galvanic reaction which accelerates the occurrence of corrosiveness in the weld joint. SEM/EDS photo evaluation provides a perfect picture of the corrosive distribution of the fracture surface. At the highest temperature of 50 °C, the surface corrosive rate causes a lot of bubbles and porous pores in the weld fracture, this causes the connection threshold stress to weaken.*

**Keywords:** Stress Corrosion Cracking, High Temperature, Constant Load Test, Threshold Stress, Dissimilar Capacitor Discharge Welding.

## 1. PENDAHULUAN

*Stress Corrosion Cracking (SCC)* merupakan fenomena kegagalan retak akibat korosif kegagalan ini dapat terjadi secara tiba-tiba. Tiga faktor penyebab SCC yaitu: lingkungan korosif, bahan yang rentan, dan tegangan tarik yang tinggi termasuk tegangan sisa (*void*) [1-3]. Para peneliti menemukan, SCC dapat terjadi di seluruh bagian material dengan durasi kegagalan yang berbeda semakin lemah titik material yang terjadi SCC maka waktu terjadi patah semakin cepat [4]. Sambungan las merupakan salah satu bagian yang sangat kritis yang rentan terhadap SCC. Perindustrian minyak bumi, gas, *power plant* struktur *platform* lepas pantai dan pipa bawah laut sebagian besar menggunakan sambungan las [4,6]. Beban sambungan las dalam rekayasa konstruksi kelautan bersifat kompleks termasuk beban alami dari gelombang air laut, angin, suhu dan kelembapan udara, sehingga rentan terjadi kegagalan. Kegagalan SCC dapat menyebabkan kerugian ekonomi, hilangnya nyawa manusia, dan pencemaran lingkungan [7-9]. Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk memperjelas korelasi struktur mikro dan SCC pada sambungan las dalam lingkungan korosif bersuhu tinggi [10-12]. Studi lain telah membuktikan zona pencairan logam las cenderung memiliki pertumbuhan retak korosi tegangan menengah dalam air murni bersuhu tinggi [13,14]. Lapisan las terdiri dari tiga wilayah, yaitu zona fusi, matriks dan zona terpengaruh panas *Heat Affected Zone (HAZ)*. Dari tiga wilayah ini daerah HAZ adalah zona yang paling rentan terhadap SCC, terdapat lubang korosif terdistribusi yang banyak dan tidak seragam [15-17].

*Dissimilar Metal Welding (DMW)* menjadi metode las yang populer karena memungkinkan

merancang produk atau konstruksi yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan sehingga bisa dipakai secara luas (*flexible*). Namun, pengelasan logam berbeda memiliki tingkat kesulitan yang tinggi dibutuhkan keahlian dan peralatan las khusus. Selain itu *material properties* yang tidak homogen membuat lasan sulit menyatu. Jafar et al. [18] meneliti sambungan baja ST 37 dan AISI 304 menggunakan metode *Friction Stir Welding* (FSW), hasil pengujian menunjukkan butiran kristal pada sambungan las lebih kecil dan padat sehingga meningkatkan hasil las tetapi pada pengujian berikutnya ditemukan lemah terhadap SCC. Untuk memenuhi kebutuhan industri, pada tahun 1994 badan pertambangan Amerika Serikat [19,20] meluncurkan mesin las *Capacitor Discharge Welding* (CDW) yang mampu menyatukan logam berbeda dengan hasil las yang baik karena *rapid solidification* (RS) 106 K/s pembekuan yang sangat cepat hal ini merupakan kebutuhan dalam penyambungan logam tidak sejenis. Penelitian sebelumnya oleh Osmar et al. [21] menguji tegangan ambang baja dan kuningan ukuran  $\varnothing 1,6$  mm dengan variasi sudut permukaan logam menggunakan las CDW. Di uji dengan *Constant Load Test* (CLT) pada lingkungan korosif  $\text{NH}_3$  dengan hasil sudut permukaan terbaik adalah 30 derajat dengan tegangan ambang 330 MPa. Darmadi, mengungkapkan dari hasil penelitiannya pemicu terjadinya SCC adalah ketika siklus termal pada sambungan las tidak merata [22].

Selama dua dekade terakhir, material baja paduan rendah ASTM A36 telah banyak dipakai dalam konstruksi. Ada yang digunakan pada proyek rekayasa kelautan [23,24]. Dengan kondisi lingkungan laut yang memiliki nilai pH, asam klorida dan konsentrasi Cl tinggi memicu terjadinya korosif [25]. Sebuah studi menemukan senyawa lain yang terkandung dalam air laut, seperti  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$  dan HCl [26,27]. Tingginya korosif lingkungan laut, logam austenitik dapat menjadi pilihan yang baik karena lebih tahan terhadap korosif. Mengingat jenis lingkungan dan kelas baja yang bervariasi maka logam harus dipilih dengan tepat [29-28]. *Stainless Steel* mungkin yang paling banyak digunakan, karena mengandung 2-3 wt.% Mo dengan melting point 2.622 °C dan penghalang korosi *chrome* disintegrasi dalam keadaan yang sangat merusak [29-31]. Perubahan *temperature* pada lingkungan laut menjadi salah satu pemicu korosif. Han et al [32] meneliti material SS 316 L dalam kondisi suhu normal dan suhu tinggi hasil penyelidikan ini mengungkapkan perkembangan korosif meningkat pada suhu tinggi dibandingkan dengan suhu normal. Temuan dari studi lain *electropolishing* paduan menyebabkan perubahan komposisi permukaan yang menyebabkan perilaku korosi dalam air suhu tinggi [33-36]. *Temperature* lingkungan laut sangat bervariasi dan tidak teratur tergantung pada musim dan lokasi [36-37]. Dalam aspek ini, Mor dan Becarria melakukan beberapa pekerjaan penelitian [37-38] dengan variasi suhu (5, 10 dan 20 °C) dengan tekanan *hydrostatics* (1, 50, 100 dan 200 atm) pada korosi tembaga di air laut. Mereka menemukan *temperature* suhu 20 °C meningkatkan korosi secara signifikan dengan 71% lebih tinggi dari suhu 5 °C. Dapat disimpulkan bahwa setiap kenaikan suhu korosi material mengalami perkembangan lebih cepat kurang lebih setiap kenaikan suhu 5 °C korosi berkembang 3 kali lipat. Penelitian Hossani et al. [39,40], memperlihatkan kontak antara baja dan paduan tembaga dalam Teluk Arab mengalami serangan besar dari laju korosi *galvanic* dengan kenaikan suhu mencapai 50 °C. Terlepas dari semua temuan ini, tidak ada studi ditemukan yang mengambil dampak baik dari perubahan suhu lingkungan laut antara paduan logam dan baja tahan karat menjadi pertimbangan.

Berdasarkan latar belakang di atas konsentrasi terhadap perubahan suhu di lingkungan korosif laut menjadi perhatian utama peneliti maka dilakukan uji dengan variasi suhu 30 °C, 40 °C dan suhu tertinggi 50 °C di ambil dari perairan Arab dengan media korosif asam klorida  $\text{FeCl}_2$ . Fokus penelitian ini untuk mempelajari ketahanan sambungan las CDW material baja dan *stainless steel* di lihat dari sudut pandang *Strees Corrosion Cracking* (SCC). Untuk menguji SCC dapat menggunakan dua metode berikut: *Constant Load Test* (CLT) dan *Slow Strain Rate Tension* (SSRT). Artikel ini menggunakan metode CLT yang akan menghasilkan data waktu patah dan tegangan ambang sambungan (MPa). Data pendukung berupa, foto *Scanning Electron Mikroskop* (SEM) dan *Energy Dispersion Spectroscopy* (EDS).

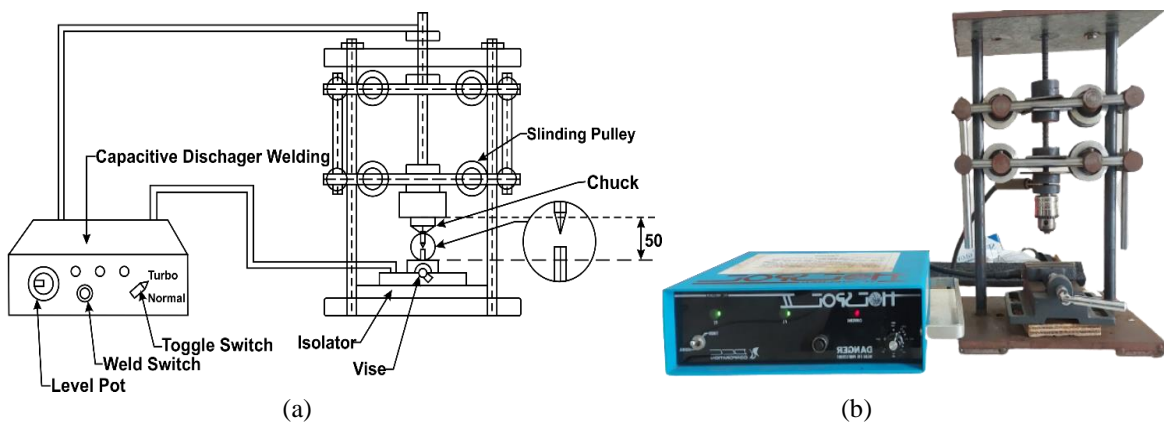
## 2. METODE DAN BAHAN

Pengujian SCC pada penelitian ini menerapkan metode *Constant Load Test* (CLT). Metode ini sangat cocok diaplikasikan untuk *specimen* uji yang di las tanpa ada perlakuan retak (*pre crack*). Selain itu, metode CLT dapat dilakukan dengan peralatan yang relatif sederhana tanpa ada tambahan alat khusus sehingga mudah dilakukan. Pengujian ini membutuhkan waktu yang lebih lama jika dibandingkan dengan metode pengujian SCC yang lain. Karena yang menjadi pusat perhatian adalah *time to failure* (waktu patah) yang dalam prosesnya dihitung persatuan (menit) pada beban tertentu sampai spesimen *crack* (patah).

Mengaplikasikan metode CLT, hasil sambungan las di uji dengan pemberian beban secara konstan dengan berat beban tertinggi ditentukan dari *ultimate strength* kemudian beban diturunkan secara bertahap. Dalam pengujian sambungan las dipastikan berada di dalam larutan korosif  $\text{FeCl}_2$  dengan konsentrasi 0,5 Molar, kombinasi dari lingkungan korosif, bahan yang rentan, dan tegangan tarik merupakan syarat terjadinya SCC. Secara sederhana CLT dapat diartikan sebagai pemberian beban/tegangan tarik dengan

tujuan mengetahui kekuatan maksimum sambungan las terhadap SCC. Standar pengujian ini secara komprehensif dapat diartikan sebagai berikut: benda uji yang telah dibentuk sedemikian rupa akan diperpanjang secara merata dengan tingkat pembebanan yang telah ditentukan sebelumnya. Selanjutnya dilakukan pencatatan waktu putus pada setiap variasi pembebanan [41]. Dengan cara ini, semua spesimen uji mengalami kegagalan atau retak lebih cepat daripada uji pemanjangan konstan. Akibatnya, dalam kerangka tertentu, nilai tegangan ambang mungkin tidak sepenuhnya ditentukan di bawah beban konstan daripada di bawah regangan yang konsisten [42].

Untuk penyambungan logam tak sejenis dapat menggunakan berbagai metode pengelasan, teknik penyambungan logam dengan cara di las banyak digunakan karena kekuatan sambungan las yang tinggi hampir sama dengan kekuatan *base metal*. Pada penelitian ini proses penyambungan material tak sejenis menggunakan mesin las CDW yang merupakan jenis mesin *heat resistance welding process* [46]. Energi yang di hasilkan mesin ini lebih sedikit jika dibandingkan mesin las konvensional [43]. Energi yang di hasilkan dari penyimpanan kapasitor lalu dilepaskan secara cepat sehingga mengasilkan api elektrik yang berfungsi meleburkan dua material yang saling bersentuhan. Mesin las CDW terus dikembangkan dan populer di prindustrian otomotif *North America* karena salah satu kelebihanannya adalah *rapid solidification* (RS) 106 K/s pembekuan kristal las yang sangat cepat [13].



**Gambar 1:** CDW welding process (a) Schematically and, (b) Photos of actual tools.

Untuk menghasilkan lasan yang seragam dibantu dengan menggunakan *Jig* khusus yang sesuai dengan kebutuhan penelitian skala laboratorium, dengan parameter pengelasan yang konsisten menghasilkan kualitas lasan yang sama. Mesin CDW dan alat bantu las (*Jig*) yang digunakan dapat di lihat pada gambar 1. Mesin CDW dapat di atur dengan 2 jenis tegangan yaitu, tegangan normal 35 VDC untuk material kecil dan 75 VDC untuk ukuran besar dan padat kurang lebih seukuran baut M10. Kemudian energi kalor yang di lepas berfungsi menghasilkan besarnya pembakaran hingga logam mencair. Penelitian ini menggunakan energi 200-volt karena menghasilkan pencairan logam yang merata dan stabil sesuai dengan ukuran dan jenis logam yang di las. Energi 200-volt setara dengan 320 Joule kemudian beban jatuh yang diberikan adalah 4 Kg / (39,2 N) dengan tinggi *tip* permukaan las 3 mm. Selanjutnya di tunjukan pada table 1. Parameter pengelasan *Capacitor Discharge Welding* (CDW).

**Tabel 1:** Capacitor discharge welding parameters

Capacitor Discharge Welding (CDW)	PARAMETERS (CDW)				
	Electrode pressure (N)	Weld Energy (J)	Specimen Diameter (mm)	Voltage (VDC)	Drop height (mm)
	39,2	200	1.6	75	2

## 2.1 Bahan Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon rendah dan *stainless steel*. Seperti yang telah dijelaskan pada literatur di atas penggunaan material jenis ini banyak digunakan pada industri kelautan terutama jenis material *stainless steel* 316L karena sifatnya yang tahan korosif dengan kandungan nikel (Ni), *chrome* (Cr) dan mangan (Mn) ketiga unsur utama ini yang membuat tahan terhadap korosif. Sedangkan untuk materi baja selain memiliki kekuatan yang tinggi, lebih mudah di bentuk di bandingkan *stainless steel* sehingga dengan kombinasi kedua material ini dapat membuat rancangan struktur yang dapat di sesuaikan

dengan kondisi atau kebutuhan di berbagai bidang secara luas. Pada table 2 ditampilkan komposisi dan sifat mekanik dari logam yang digunakan.

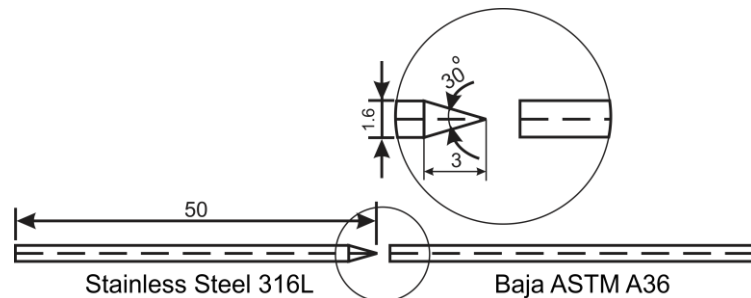
**Tabel 2:** Chemical composition of material

MATERIALS	COMPOSITION (WEIGHT %)									
	Fe	C	Al	S	Cr	Si	Ni	P	Cr	
Baja ASTM A36	Bal.	0.148	0.001	0.02	0.046	0.0015	0.092	0.008	0.103	
	Mn	W								
	0.555	0.04								
Stainless Steel 316L	Fe	C	Al	S	Cr	Si	Ni	P	Cr	
	Bal.	0.025	-	0.01	16.38	0.41	9.60	0.04	17.9	
	Mn	W	Mo	Cu	Co					
	1.60	-	3.15	0.51	0.28					

**Tabel 3:** Physical properties of materials

MATERIALS	PHYSICAL PROPERTIES			
	Melting Point (°C)	UTS N/mm <sup>2</sup>	Hardness BHN	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Baja ASTM A36	1450	440	120	7.87
SS 316 L	2540	515	149	8.0

Sebelum dilakukan penyambungan kedua material, langkah awal yang harus dipersiapkan adalah membuat tirus pada permukaan material (*surface preparation*) sehingga pada proses pengelasan kedua logam ini akan tersambung dengan baik. Jika kita melihat tabel 3 diketahui bahwa *melting point* dari *stainless steel* lebih tinggi dari baja sehingga pencairan material lebih lambat, selain itu memiliki kemampuan las yang lebih kuat, maka *stainless steel* tersebut di buat runcing dengan sudut 30° agar ujung dari *stainless steel* melebur lebih banyak sehingga mengikat logam baja dan memperkuat sambungan dari lingkungan korosif. Untuk mendapatkan hasil yang akurat akan di buat 5 sambungan material untuk setiap variasi. Pada gambar 2 berikut ditampilkan sketsa gambar material yang akan di sambung.

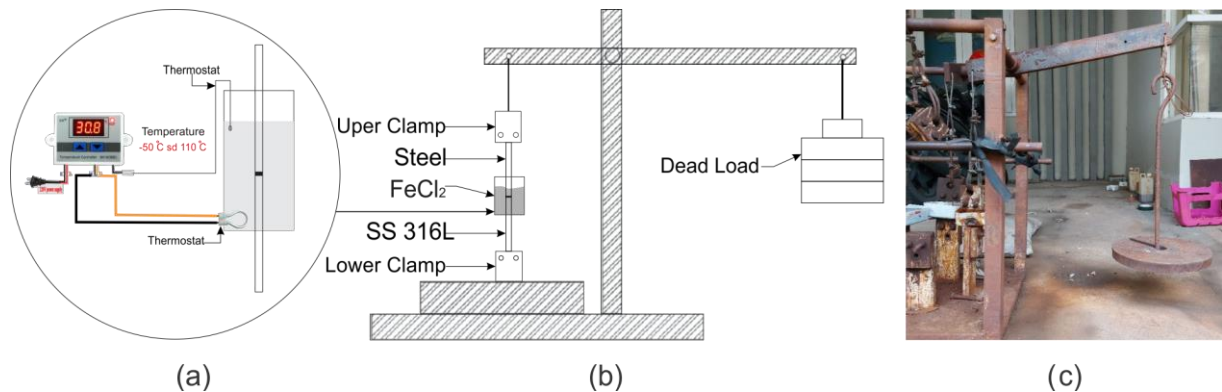


**Gambar 2:** Spesimen Uji

## 2.2 Instalasi Constant Load Test (CLT)

Alat uji SCC metode CLT ini dibuat secara manual, dalam proses pembuatan alat ini selalu mempertimbangkan hal teknis dan ilmu mekanika agar hasil pengujian akurat. Aspek teknis yang utama adalah memperhitungkan panjang lengan pengungkit dan diagram benda bebas. Referensi pembuatan alat uji tarik SCC ini berpedoman pada standar ASTM-G49-85 [47]. Untuk parameter pengujian CLT memperhitungkan lengan tuas pengungkit, *dead load*, dan konsentrasi larutan korosif agar nantinya dapat diperoleh tegangan ambang maksimum dari spesimen. Sebelum dilakukan uji SCC material SS 316L dan ASTM A36 yang sudah di las masuk ke uji *Ultimate* dengan hasil tegangan maksimum 45 Kg/(648 MPa). Maka beban 45 Kg menjadi beban tertinggi yang di berikan, selanjutnya beban di turunkan bertahap sampai beban terendah 10 Kg (144 MPa), waktu patah dari setiap pembebanan di catat sebagai data pengujian SCC. Lingkungan korosif yang di berikan di asumsikan sebagai lingkungan laut dengan media korosif asam klorida FeCl<sub>2</sub> dengan konsentrasi 0,5 Molar dan harus di pastikan sambungan las dalam keadaan terendam selama pengujian SCC. Dalam artikel ini perubahan temperature lingkungan korosif menjadi fokus penelitian, maka

dibuat 3 variasi suhu pada cairan korosif FeCl<sub>2</sub> secara berurutan dimulai dari 30, 40, dan 50 °C. Untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai alat uji CLT dapat diperhatikan pada gambar 3.



**Gambar 3:** (a) Heating installation, (b) Schematic of CLT test installation (c) Photos of actual equipment.

Setelah uji CLT, selanjutnya permukaan patahan las di evaluasi morfologi menggunakan Hitachi SEM/EDS tipe FLEXSEM 100. *Backscattered electron* (BSE) digunakan untuk menggambarkan karakterisasi perbesaran tinggi dari patahan/rongga sambungan las. Komposisi struktur permukaan dipetakan dengan memanfaatkan *Energy Dispersive X-Beam Spectrometry* (EDS).

**3. HASIL DAN DISKUSI**

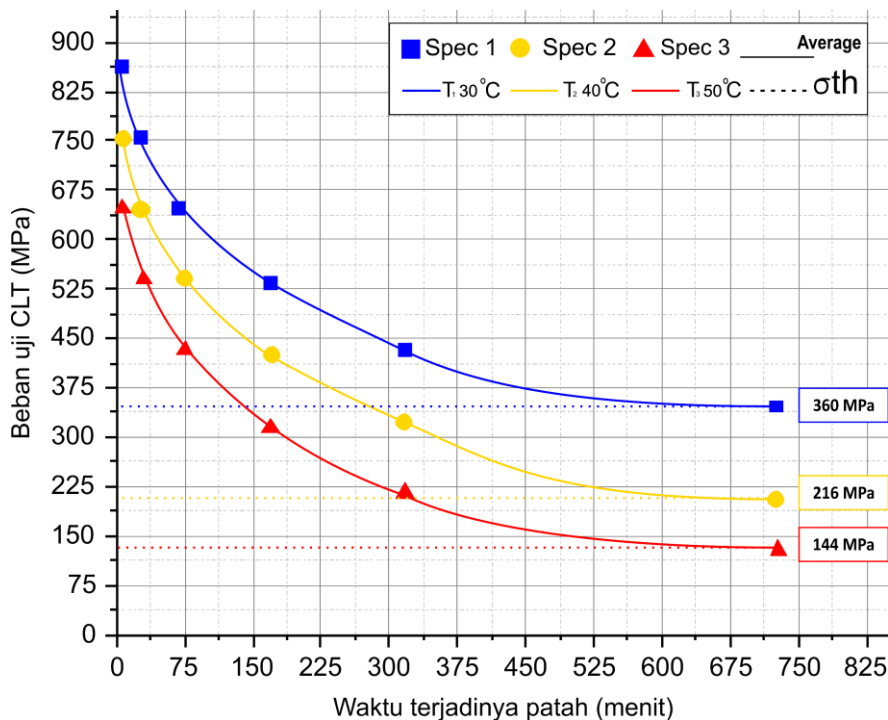
Hasil akhir pengujian SCC adalah waktu patah pada beban tertentu yang dimulai dari beban di bawah *Ultimate* sampai beban terendah yang telah di tentukan. Beban yang diberikan secara berurutan adalah 40, 35, 30, 25, 20, 15, dan 10 Kg. Kemudian jika di konversikan ke dalam tegangan tarik (MPa) menggunakan persamaan:  $\sigma = F/A$  maka nilainya sebagai berikut: 575, 504, 432, 360, 288, 216 dan 144 (Mpa). Dengan variasi suhu yang diberikan dimulai dari 30, 40, dan 50 °C yang telah dijelaskan pada literatur bagian 1. Untuk mempermudah pengambilan data, waktu yang terekam akan di hitung per menit. Waktu patah hasil uji SCC, disajikan pada table 4 berikut.

**Tabel 4:** Test results of SCC.

LOAD (Kg)	STRESS (MPa)	T <sub>1</sub> (30 °C)		T <sub>2</sub> (15 °C)		T <sub>3</sub> (45 °C)	
		Time To Fail (Minute)	Mean (Minute)	Time To Fail (Minute)	Mean (Minute)	Time To Fail (Minute)	Mean (Minute)
10	144	650	645.66	417	410.66	281	280.33
		645		389		277	
		642		426		283	
15	215	545	539.33	281	280.67	134	134
		535		279		133	
		538		282		135	
20	288	375	370	131	134.66	71	71.33
		365		137		73	
		370		136		70	
25	360	283	278.33	75	73	17	15,33
		277		71		15	
		275		73		14	
30	432	132	130.33	16	14.33	7	6
		130		14		5	
		129		13		6	
35	504	45	47.66	9	7.33	3	3
		50		7		2	
		47		6		4	
40	576	12	10.33	3	4	0.00	0.00
		10		5		0.00	

		9		4		0.00	
45	648	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00		0.00			
		0.00		0.00			
		0.00		0.00			

Berdasarkan data pengujian pada table 4. Dapat diketahui bahwa perubahan suhu dalam larutan korosif asam klorida ( $FeCl_2$ ) memberikan dampak yang signifikan terhadap SCC. *Ultimate strength* spesimen ini 45 Kg/(648 MPa) sehingga ketika beban ini di berikan pada pengujian SCC sambungan las langsung putus. Spesimen berikutnya di berikan beban 40 Kg/(575 MPa), pada benda uji  $T_1$  dengan variasi suhu  $30\text{ }^\circ\text{C}$  kekuatan sambungan las dapat bertahan dengan rata-rata 10.33 menit, kemudian benda uji  $T_2$   $40\text{ }^\circ\text{C}$  dengan tegangan 504 MPa dapat bertahan rata-rata 7.33 menit, dan spesimen ke-  $T_3$   $50\text{ }^\circ\text{C}$  dengan tegangan 432 MPa rata-rata waktu patah 6 menit. Hasil pengujian ini membuktikan perubahan suhu tinggi lingkungan korosif. Meningkatkan penyebaran korosif pada sambungan las sehingga spesimen menjadi rapuh dan sambungan las patah dalam waktu yang lebih cepat. Data pengujian SCC di atas berikut ini ditampilkan dalam bentuk grafik.

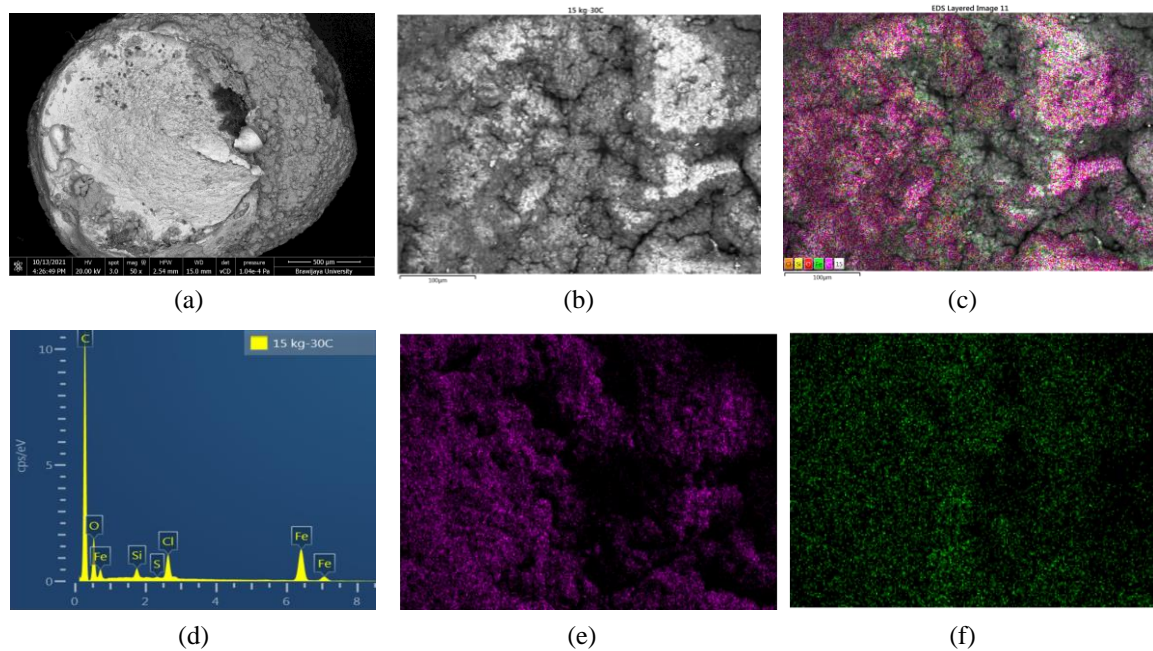


**Gambar 4:** Grafik nilai tegangan ambang.

Kesimpulan dari data pengujian SCC pada Gambar 4. Sambungan las menjadi rentan ketika berada dalam lingkungan korosif bersuhu tinggi terutama ketika syarat SCC terpenuhi (*tensile stress, susceptible material, & corrosive environment*). Dalam kasus ini spesimen  $T_1$  yang berada di lingkungan korosif suhu kamar ( $30\text{ }^\circ\text{C}$ ) mempunyai tegangan ambang yang lebih tinggi dari spesimen  $T_2$  dan  $T_3$ . Dapat diasumsikan spesimen  $T_1$  memiliki tegangan ambang maksimum sebesar 360 MPa, sedangkan benda uji  $T_2$  dan  $T_3$  masing-masing sebesar 215 MPa dan 144 MPa.

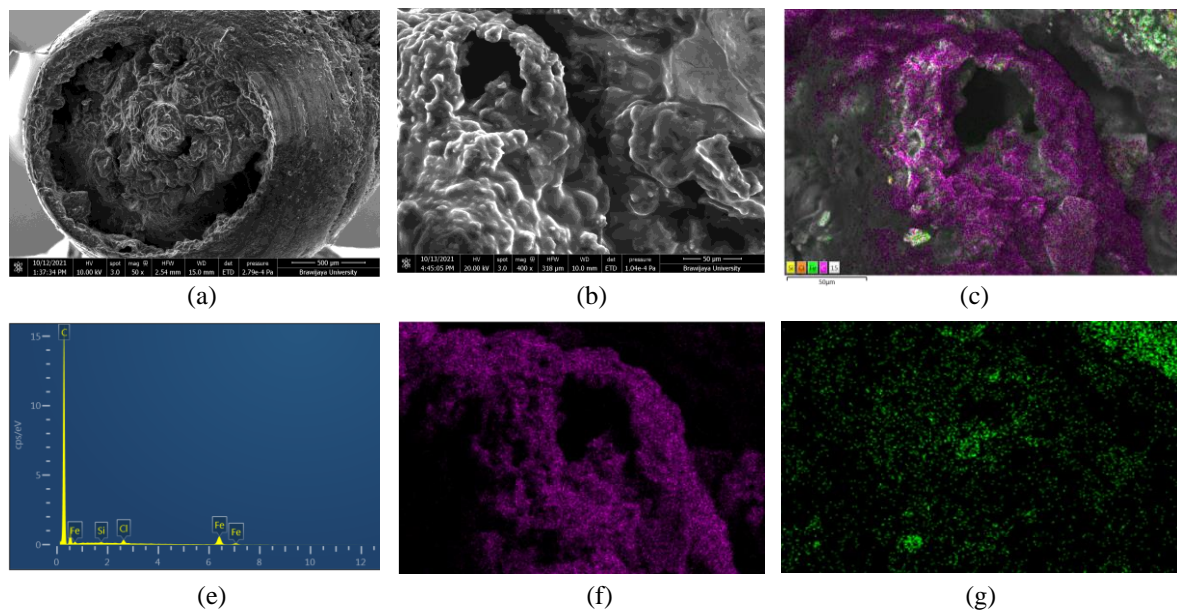
Data berikutnya mengevaluasi permukaan patah menggunakan SEM-EDS secara berurutan spesimen  $T_1$ - $T_3$  dapat di lihat pada gambar 5, 6, & 7. Dengan (a) Menunjukkan gambar keseluruhan permukaan dengan perbesaran  $500\mu\text{m}$  atau  $100x$ . (b) Tampak permukaan perambatan retak permukaan. Posisi yang ditunjukkan adalah permukaan patah *stainless steel 316L*. (c) Terlihat dari uji SEM adanya porositas dan jaringan *fibrous* yang mengawali *fracture* pada sambungan las. (d) Grafik uji EDS dimana distribusi unsur-unsur dapat dilihat. (e) Adalah luas unsur karbon dan (f) Adalah sebaran kandungan Fe dalam jaringan *fibrous* menunjukkan keuletan pada logam dasar [38-47]. Korosi berpori menyebar keseluruh permukaan. Adanya unsur O menunjukkan terjadinya oksidasi pada sambungan las ketika bahan logam terkena cairan korosif  $FeCl_2$ , hal ini juga memperlihatkan adanya kandungan asam klorida yang tinggi menunjukkan pemetaan unsur-unsur, C, Cr, Fe, Ni, O, Si, Cl, Mn, dan Zn. Perlu dipahami bahwa Fe dan C merupakan bahan dasar baja dan Cr (*Chrome*) merupakan unsur dominan pada baja tahan karat. Unsur Fe dan C meningkat, menunjukkan baja lebih mudah meleleh daripada baja tahan karat. Hal ini dapat dicapai karena titik leleh

baja yang lebih rendah. Hasil uji SEM-EDS juga menunjukkan sebaran unsur yang dibedakan berdasarkan warna gambar, *overview* permukaan *crack* diwakili dengan warna *silver*, Warna ungu menunjukkan persebaran unsur karbon (C) dan warna hijau sebagai unsur (Fe).



**Gambar 5:** The results of the SEM-EDS test of the CLT fracture surface at a temperature of  $T_1$  30 °C.

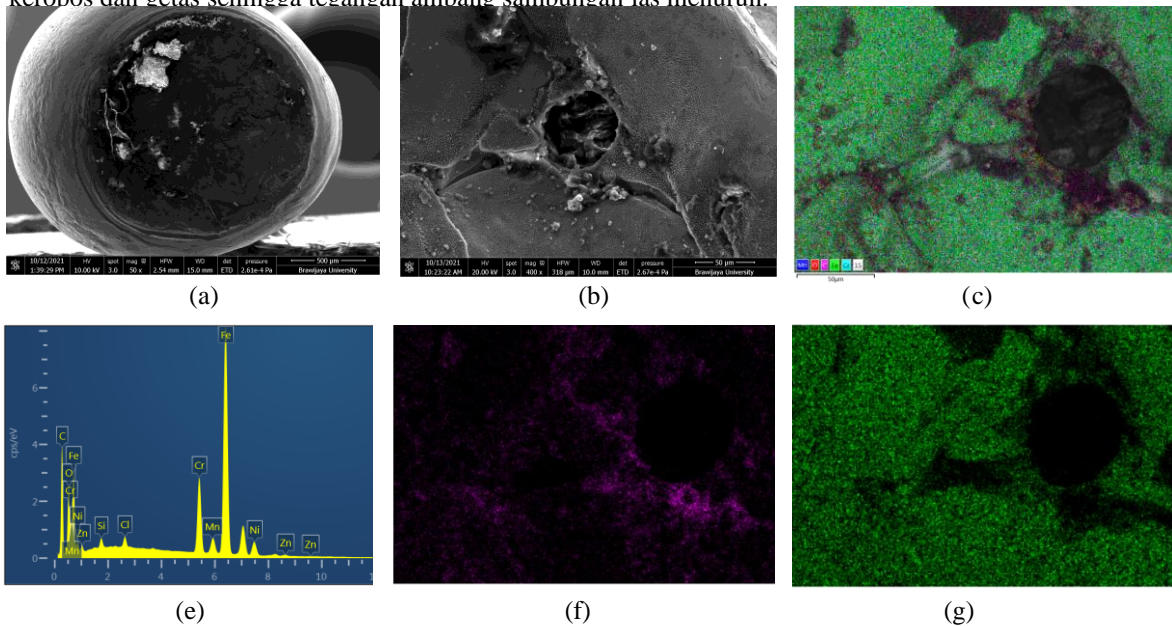
Gambar 5 ini menunjukkan hasil pengujian SEM-EDS pada spesimen  $T_1$ . Ditampilkan perambatan retakan pada gambar (5.b). Tetapi jika dilihat lebih teliti permukaan retak ini relatif rapat pada struktur jaringan di sekitarnya maka sedikit ditemukan rongga atau pori-pori korosif di sekitar permukaan patah, Pada grafik EDS penyebaran komposisi penyusun material didominasi oleh unsur (Fe) dengan warna hijau sebagai logam dasar dan diperlihatkan juga beberapa unsur lainnya seperti sedikit unsur karbon (C) dengan warna ungu dan Oksidasi (O) yang hadir dalam jumlah sedikit. Adanya oksidasi (O) menunjukkan telah terjadi korosif tetapi pada spesimen ini jumlah korosi lebih kecil dari spesimen  $T_2$  dan  $T_3$  berikutnya sehingga memiliki tegangan ambang yang tertinggi seperti ditunjukkan pada gambar 4.



**Gambar 6:** The results of the SEM-EDS test of the CLT fracture surface at a temperature of  $T_2$  40 °C.

Foto SEM-EDS permukaan spesimen  $T_2$  pada gambar 6. Terdapat banyak gelembung dan rongga

porositas, gelembung merupakan proses awal terjadinya korosi material jika ditemukan dalam jumlah yang banyak maka semakin tinggi korosifitas yang terjadi ditambah tingginya unsur (C) ditunjukkan dengan warna ungu, unsur ini berinteraksi dengan oksigen di dalam larutan  $FeCl_2$  menimbulkan uap gas yang mempercepat korosi hal ini juga dipengaruhi oleh naiknya suhu larutan korosi yang membuat pergerakan senyawa elektrokimia mereduksi logam semakin agresif. Tentunya hal tersebut membuat sambungan las menjadi keropos dan getas sehingga tegangan ambang sambungan las menurun.



**Gambar 7:** The results of the SEM-EDS test of the CLT fracture surface at a temperature of  $T_3$  50 °C.

Selanjutnya analisis morfologi permukaan patah pada spesimen  $T_3$ , ditunjukkan pada gambar 7. Permukaan *stainless steel* yang sengaja dibuat tirus karena memiliki titik leleh lebih tinggi dari baja bertujuan mempermudah peleburan sehingga *stainless steel* yang mencair terlebih dahulu akan menyelimuti area material baja maka lebih tahan terhadap korosif. Akan tetapi dengan perubahan *temperature* yang semakin tinggi pada larutan korosif  $FeCl_2$  membuat kekuatan sambungan semakin menurun. Pada gambar pengujian SEM terlihat pori-pori keropos memenuhi permukaan *crack* yang memperlihatkan tingginya korosif material. Dari segi grafik EDS sebaran unsur Fe, C, O dan Cr pada spesimen  $T_3$  memiliki nilai yang sangat tinggi sehingga wajar jika kerusakan dan kegetasan yang terjadi pada spesimen  $T_3$  sangat tinggi. Kenaikan suhu cairan korosif  $FeCl_2$  0,5 Molar meningkatkan agresivitas cairan masuk ke dalam rongga sambungan las berinteraksi langsung dengan unsur Fe pada logam membuat beda potensial yang tinggi dan mereduksi logam baja [48]. Kandungan Fe yang tinggi menggambarkan banyaknya oksidasi (O) dengan ciri khas warna ungu tua yang digambarkan dari EDS. Banyaknya oksidasi terperangkap dalam rongga sambungan las. Hasil ini pengujian SEM-EDS mengkonfirmasi turunnya tegangan ambang pada spesimen  $T_3$  yang di tampilkan pada gambar 4. Naiknya suhu larutan korosif mencapai 50 °C membuat percepatan korosif sehingga tegangan ambang sambungan menurun dan cenderung lebih kecil dari spesimen  $T_1$  dan  $T_2$ .

#### 4. KESIMPULAN

Perubahan *temperature* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *Stress Corrosion Cracking* (SCC). Terjadi peningkatan proses korosif pada permukaan patah sambungan las baja dan *stainless steel*. Prilaku korosif yang terjadi pada baja-*stainless steel* dalam larutan asam klorida  $FeCl_2$  dengan konsentrasi larutan 0,5 Molar pada berbagai variasi suhu (30, 40, dan 50 °C) dipelajari. Ditemukan bahwa ketika suhu meningkat 10 °C, porosifitas paduan baja karbon dipercepat dengan rata-rata 2,3 kali. Pengaruh lingkungan yang agresif terjadi lebih cepat pada permukaan sambungan las dengan karbon tinggi. Hasil pengujian CLT menunjukkan penurunan tegangan ambang sambungan las ketika suhu larutan korosif dinaikan. Pada spesimen  $T_1$  tegangan ambang sebesar 360 MPa. Spesimen ke-  $T_2$  216 MPa, dan spesimen ke- $T_3$  144 MPa. Hasil evaluasi foto SEM-EDS mengungkapkan spesimen  $T_3$  pada suhu 50 °C mengalami keropos dengan pori-pori korosif lebih banyak di sekitar permukaan patah sambungan baja-*stainless steel* pada akhirnya mengalami penurunan kekuatan pada sambungan las.



## 5. PERNYATAAN TERIMAKASIH

Melalui pernyataan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pembimbing Dr. Femiana Gapsari ST., MT dan Prof. Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D. yang telah membantu penulis dalam melakukan penelitian ini dan sampai pada menyelesaikan artikel ini.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] TONGJIAO CHU, CHENDONG SHAO, YAQI WANG, NINSHU MA, FENGGUI LU, *Crack Branching Behavior And Amorphous Film Formation Mechanism During SCC Expanding Test for Multi-Layers Weld Metal of NiCrMoV Steels*, Materials & Design, Volume 216, (2022), 110520, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110520>.
- [2] R.L. ZHU, J.Q. WANG, L. ZHANG, Z.M. ZHANG, E.-H. HAN Corros. Sci., 112 (2016), pp. 373-384 Article [Download PDF View Record in Scopus](#)
- [3] R.L. ZHU, J.Q. WANG, Z.M. ZHANG, E.-H. HAN Corros. Sci., 120 (2017), pp. 219-230 Article [Download PDF View Record in Scopus](#)
- [4] L. DONG, X. ZHANG, Y. HAN, Q. PENG, P. DENG, S. WANG *Effect of Surface Treatments On Microstructure And Stress Corrosion Cracking Behavior of 308L Weld Metal in A Primary Pressurized Water Reactor Environment* Corros. Sci., 166 (2020), 108465 [Article Download PDF View Record in Scopus Google Scholar](#)
- [5] M.H. MOHD, J.K. PAIK *Investigation of The Corrosion Progress Characteristics of Offshore Subsea Oil Well Tubes* Corros. Sci., 67 (2013), pp. 130-141 [Google Scholar](#)
- [6] W. WU, W.K. HAO, Z.Y. LIU, X.G. LI, C.W. DU, W.J. LIAO *Corrosion Behavior of E690 High-Strength Steel in Alternating Wet-Dry Marine Environment With Different Ph Values* JME-PEG, 24 (2015), pp. 4636-4646 [View PDF Cross Ref View Record in Scopus Google Scholar](#)
- [7] W. WU, Z.Y. LIU, X.G. LI, C.W. DU, Z.Y. CUI *Influence of Different Heat-Affected Zone Microstructures On The Stress Corrosion Behavior and Mechanism of High-Strength Low-Alloy Steel in A Sulfurated Marine Atmosphere* Mater. Sci. Eng., A, 759 (2019), pp. 124-141 [View Record in Scopus Google Scholar](#)
- [8] W. WU, Z.Y. LIU, X.G. LI, C.W. DU *Electrochemical Characteristic and Stress Corrosion Behavior of API X70 High-Strength Pipeline Steel Under A Simulated Disbonded Coating in An Artificial Seawater Environment* J. Electroanal. Chem., 845 (2019), pp. 92-105 [Article Download PDF View Record in Scopus Google Scholar](#)
- [9] HADI SHABANI, NARGES GOUDARZI, MAHDI SHABANI. *Failure Analysis of A Natural Gas Pipeline* Eng. Fail. Anal., 84 (2018), pp. 167-184 [Article Download PDF View Record in Scopus Google Scholar](#)
- [10] L.J. DONG, Q.J. PENG, H. XUE, E.-H. HAN, W. KE, L. WANG Corros. Sci., 132 (2018) (2018), pp. 9-20 [Article Download PDF View Record in Scopus](#)
- [11] L.J. DONG, Q.J. PENG, E.-H. HAN, W. KE, L. WANG Corros. Sci., 107 (2016), pp. 172-181 [Article Download PDF View Record in Scopus](#)
- [12] L.J. DONG, E.-H. HAN, Q.J. PENG, W. KE, L. WANG Corros. Sci., 117 (2017), pp. 1-10 [Article Download PDF](#)
- [13] Y.L. HAN, E.-H. HAN, Q.J. PENG, W. KE Corros. Sci., 121 (2017), pp. 1-10 [ArticleDownload PDF](#)
- [14] J.Y. HUANG, M.F. CHIANG, S.L. JENG, J.S. HUANG, R.C. KUO J. Nucl. Mater., 432 (2013), pp. 189-197 [ArticleDownload PDFView Record in Scopus](#)
- [15] Z.Y. CUI, Z.Y. LIU, L.W. WANG, X.G. LI, C.W. DU, X. WANG *Effect of Plastic Deformation on The Electrochemical and Stress Corrosion Cracking Behavior of X70 Steel in Near-Neutral Ph Environment* Mater. Sci. Eng., A, 677 (2016), pp. 259-273 Article [Download PDF View Record in ScopusGoogle Scholar](#)
- [16] TRINH, D., FRAPPART, S., RÜCKERT, G., CORTIAL, F., TOUZAIN, S., (2019). *Effect of Friction Stir Welding Process on Microstructural Characteristics and Corrosion Properties of Steels For Naval Applications*. Corrosion Eng. Sci. Technol. 54 (4), 353–361.

- [17] LIU, G., HUANG, Y., QI, Z., LI, Z., CHEN, J., DONG, L., (2017). *Fatigue Damage Estimation of Welded Joints Considering Mechanochemical Interaction*. In: *Proceedings of The International Conference On Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Trondheim, Norway. Paper ID: OMAE2017-62315.
- [18] M. JAFARZADEGAN, A.H. FENG, A. ABDOLLAH ZADEH, T. SAEID, J. SHEN, H. ASSADI *Microstructural Characterization in Dissimilar Friction Stir Welding Between 304 Stainless Steel and ST37 Steel Mater. Charact.*, 74 (2012), pp. 28-41, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.09.004>
- [19] R.D. WILSON., *Explore The Potential of Capacitor-Discharge Welding Adv. Mater. Process.*, 145 (1994), pp. 93-94 <https://www.osti.gov/biblio/7052701>
- [20] F. PALANO, S. CHIOZZI, F.W. PANELLA, V. DATTOMA., *Characterization of Steel Welded Joints With Hybrid Projection and Capacitor Discharge Welding (CDW) Process. Mater. Manuf. Process.*, 27 (2012), pp. 1387-1391 <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.663140>
- [21] Lobo, Osmar Buntu, Djarot. B Darmadi and Oyong Novareza. “*Tegangan Ambang pada Sambungan Las CDW antara Baja dan Kuningan dalam Lingkungan Korosif.*” (2020). <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2020.011.01.15>
- [22] 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.
- [23] Z.Y. CUI, Z.Y. LIU, L.W. WANG, X.G. LI, C.W. DU, X. WANG *Effect of Plastic Deformation on The Electrochemical and Stress Corrosion Cracking Behavior Of X70 Steel in Near-Neutral pH Environment Mater. Sci. Eng., A*, 677 (2016), pp. 259-273 [Article Download PDF View Record in Scopus](#) [Google Scholar](#)
- [24] G.D. WANG, C.J. SHANG, Z.Y. LIU *Steels for Marine Applications Chemical Industry Press, Beijing* (2016) (In Chinese) [Google Scholar](#)
- [25] H.C. MA, C.W. DU, Z.Y. LIU, X.G. LI *Effect of SO2 Content On SCC Behavior Of E690 High-Strength Steel in SO2-Polluted Marine Atmosphere Ocean Eng.*, 164 (2018), pp. 256-262 [Article Download PDF View Record in Scopus](#) [Google Scholar](#)
- [26] R. TURLEY, C. AVERY, *Elevated-Temperature Static and Dynamic Sea-Salt Stress Cracking of Titanium Alloys*, *Stress-Corrosion Cracking of Titanium* (1966).
- [27] S. JOSEPH, T.C. LINDLEY, D. DYE, E.A. SAUNDERS, *The Mechanisms of Hot Salt Stress Corrosion Cracking in Titanium Alloy Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo*, *Corros. Sci.* 134 (2018) 169–178.
- [28] D. MALHOTRA, A.S. SHAHI *Metallurgical, Fatigue and Pitting Corrosion Behavior of AISI 316 Joints Welded With Nb-Based Stabilized Steel Filler Metall Mater Trans*, 51 (4) (2020 Apr), pp. 1647-1664 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542100538X#bbib5>
- [29] M. SAJJADNEJAD, S.M. HAGHSHENAS, M. TAVANGAR, A. GHANI KOLAHLOO *Creep “Behavior of 316 Austenitic Stainless Steel Under Variant Operating Conditions” Asian J Nanosci Mater*, 3 (4) (2021), pp. 266-279 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542100538X#bbib7>
- [30] H.I. AL HOSSANI, T.M.H. SABER, R.A. MOHAMMED, A.M. SHAMS EL DIN *Galvanic Corrosion of Copper-Base Alloys in Contact With Molybdenum-Containing Stainless Steels in Arabian Gulf Water Desalination*, 109 (1) (1997), pp. 25-37 [Article Download PDF View Record in Scopus](#) [Google Scholar](#)
- [31] J. CHEN, Q. ZHANG, L.I. QUAN-AN, F.U. SAN-LING, J.Z. WANG *Corrosion and Tribocorrosion Behaviors of AISI 316 Stainless Steel and Ti6Al4V Alloys in Artificial Seawater Trans Nonferrous Metals Soc China*, 24 (4) (2014), pp. 1022-1031 [Article Download PDF View Record in Scopus](#) [Google Scholar](#)
- [32] YAOLEI HAN, JINNA MEI, QUNJIA PENG, EN-HOU HAN, WEI KE, *Effect of Electropolishing on Corrosion of Nuclear Grade 316L Stainless Steel in Deaerated High Temperature Water*, *Corrosion Science*, Volume 112, (2016), Pages 625-634, ISSN 0010-938X, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.09.002>.
- [33] Y.L. HAN, J.N. MEI, Q.J. PENG, E.-H. HAN, W. KE *Effect of Electropolishing on Corrosion of Alloy 600 in High Emperature water Corros. Sci.*, 98 (2015), pp. 72-80 [Article Download PDF View Record in Scopus](#) [Google Scholar](#).

- [34] SHENGBO HU, RUI LIU, LI LIU, YU CUI, FUHUI WANG, *Influence of Temperature and Hydrostatic Pressure on The Galvanic Corrosion Between 90/10 Cu–Ni And AISI 316L Stainless Steel*, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 13, 2021, Pages 1402-1415, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.067>.
- [35] S. SAWANT, K. VENKAT, A. WAGH *Corrosion of Metals And Alloys in The Coastal and Deep Waters of The Arabian Sea and The Bay Of Bengal* *Indian J Technol*, 31 (1993), pp. 862-866p [View Record in Scopus](#) [Google Scholar](#)
- [36] J.Y. HUANG, T.Y. YUNG, J.S. HUANG, R.C. KUO *Corros. Sci.*, 75 (2013), pp. 386-399 [Article Download PDF](#) [View Record in Scopus](#)
- [37] R.E. MELCHERS “*Effect of Immersion Depth on Marine Corrosion of Mild Steel Corrosion*”, 61 (9) (2005), pp. 895-906 [Cross Ref](#) [View Record in Scopus](#) [Google Scholar](#)
- [38] E.D. MOR, A.M. BECCARIA “*Effects of Temperature on The Corrosion of Copper IN Sea-Water At Different Hydrostatic Pressures*” *Mater Corros*, 30 (8) (1979), pp. 554-558 [Cross Ref](#) [Google Scholar](#)
- [39] H.I. AL HOSSANI, T.M.H. SABER, R.A. MOHAMMED, A.M. SHAMS EL DIN “*Galvanic corrosion of copper-base alloys in contact with molybdenum-containing stainless steels in Arabian Gulf water*” *Desalination*, 109 (1) (1997), pp. 25-37 [Article Download PDF](#) [View Record in Scopus](#) [Google Scholar](#)
- [40] J. CHEN, Q. ZHANG, L.I. QUAN-AN, F.U. SAN-LING, J.Z. WANG. *Corrosion and Tribocorrosion Behaviors Of AISI 316 Stainless Steel And Ti6Al4V Alloys in Artificial Seawater* *Trans Nonferrous Metals Soc China*, 24 (4) (2014), pp. 1022-1031 [Article Download PDF](#) [View Record in Scopus](#) [Google Scholar](#)
- [41] K. R. TRETHERWEY and J. CHAMBERLAIN, *Corrosion for Science and Engineering*. England: Pub. Longman Scientific & Technical, 1996.
- [42] B. ISECKE, “*Test Methods for Assessing the Susceptibility of Prestressing Steels to Hydrogen Induced SCC*,” *Eur. Fed. Corros. Publ.*, 2004.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] N. SCOTCHMER, “*The Current Rise In The Use Of Capacitor Discharge Welding*,” *Weld. J.*, vol. 94, no. 2, pp. 32–36, 2015.
- [46] R. A. COTTIS, “*Guides to Good Practice in Corrosion Control-Stress Corrosion Cracking*,” in *Corrosion and Protection Centre*, United Kingdom: National Physical Laboratory, 2000.
- [47] ARIVARASU, M.; RAMKUMAR, D.K.; ARIVAZHAGAN, N. *Characterization of tensile strength and impact toughness of autogenous PCGTA weldments of aeronautical steel and austenitic stainless steel*. *Kovov. Mater Met. Mater* 2016, 54, 279–288. [CrossRef](#)
- [48] DHAWAN, S. K., BHANDARI, H., RUHI, G., BISHT, B. M. S., & SAMBYAL, P. (2020). *Corrosion Preventive Materials and Corrosion Testing*. CRC Press.