

Pengaruh Variasi Konsentrasi Hidrogen Fluorida dan Temperatur Proses Pickling terhadap Ketebalan Lapisan Oksida serta Pitting Corrosion pada Sambungan Las Gtaw Stainless Steel 304L

Muhamad Ringga Maulana^{1*}, Mukhlis², Eriek Wahyu Restu Widodo³

¹⁻³ Program Studi Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

*Corresponding Email: muhamadringga06@gmail.com

Abstrak: Stainless steel 304L banyak digunakan pada industri kimia, makanan-minuman, dan aplikasi maritim karena ketahanan korosinya, namun proses pengelasan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) membentuk lapisan oksida (heat tint) pada daerah las yang menurunkan ketahanan terhadap pitting corrosion. Salah satu metode untuk menghilangkan lapisan tersebut adalah pickling menggunakan campuran HNO_3 dan HF. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi konsentrasi HF (0,5%; 1%; 3%; 5%) dan temperatur pickling (30°C, 35°C, 40°C) pada larutan HNO_3 25% selama 35 menit terhadap ketebalan lapisan oksida dan ketahanan pitting corrosion sambungan las GTAW SS304L. Evaluasi dilakukan melalui mikroskop optik, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), weight loss, corrosion rate, dan uji pitting corrosion ASTM G48. Hasil menunjukkan pengaruh HF dan temperatur bersifat tidak linier; kombinasi HNO_3 25% + HF 3% pada 40°C memberikan performa terbaik dengan lapisan oksida paling tipis (0,60 μm), nilai polarization resistance tertinggi (3499,1 $\Omega\cdot\text{cm}^2$), serta weight loss dan corrosion rate terendah, menunjukkan keseimbangan optimal antara pelarutan oksida dan pembentukan kembali lapisan pasif.

Kata kunci: Stainless steel 304L, Pickling, Pitting corrosion, Lapisan oksida, GTAW

Abstract: Stainless steel 304L is widely used in the chemical, food-and-beverage, and marine industries owing to its corrosion resistance, but Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) produces a heat-tint oxide layer at the weld zone that reduces resistance to pitting corrosion. Pickling using a mixture of HNO_3 and HF is commonly used to remove this layer. This study analysed the effect of HF concentration (0.5%, 1%, 3%, 5%) and pickling temperature (30°C, 35°C, 40°C) in 25% HNO_3 solution for 35 minutes on oxide-layer thickness and pitting-corrosion resistance of GTAW-welded SS304L joints. Evaluation used optical microscopy, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), weight loss, corrosion rate, and ASTM G48 pitting tests. The results show a non-linear effect of HF and temperature; the combination of 25% HNO_3 + 3% HF at 40°C gave the best performance with the thinnest oxide layer (0.60 μm), the highest polarization resistance (3499.1 $\Omega\cdot\text{cm}^2$), and the lowest weight loss and corrosion rate, indicating an optimum balance between oxide dissolution and passive-film re-formation.

Keywords: Stainless steel 304L, Pickling, Pitting corrosion, Oxide layer, GTAW

PENDAHULUAN

Stainless steel 304L merupakan baja tahan karat austenitik yang paling banyak digunakan pada industri proses, khususnya sektor kimia, makanan dan minuman, serta aplikasi maritim, karena ketahanan korosi yang relatif baik, kemampuan fabrikasi tinggi, dan stabilitas mikrostruktur pada rentang temperatur operasi yang luas. Ketahanan korosinya terutama berasal dari lapisan pasif tipis berbasis kromium oksida yang terbentuk secara spontan di permukaan material saat terpapar oksigen (Olsson & Landolt, 2003). Meskipun demikian, kegagalan komponen *stainless steel* masih sering terjadi pada area sambungan las akibat degradasi lapisan pasif dan munculnya korosi lokal seperti pitting yang dapat menurunkan umur layan peralatan secara signifikan.

Proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) banyak dipilih untuk fabrikasi sambungan SS304L karena kendali panas yang baik, namun input panas yang tinggi menyebabkan terbentuknya lapisan oksida berwarna (heat tint) pada zona las yang komposisinya berbeda dari logam dasar, sehingga menurunkan ketahanan korosi lokal, terutama terhadap pitting (Maroufkhani et al., 2023). *Heat tint* menyebabkan distribusi kromium permukaan menjadi tidak merata sehingga daerah las dan *Heat Affected Zone* (HAZ) menjadi lebih rentan terhadap korosi lokal (Heo et al., 2021), dan penurunan kandungan kromium permukaan berkorelasi dengan meningkatnya kerentanan terhadap *pitting corrosion* pada lingkungan yang mengandung ion klorida (Li et al., 2013).

Proses *pickling* menggunakan larutan asam nitrat (HNO_3) dan asam fluorida (HF) banyak digunakan di industri sebagai tahapan penting untuk memulihkan ketahanan korosi permukaan *stainless steel* pasca-las (Hermansyah, 2025). Keberhasilan *pickling* sangat bergantung pada parameter proses, terutama konsentrasi larutan dan temperatur, karena pengaturan yang tidak tepat berpotensi menimbulkan serangan korosi lokal, khususnya *pitting corrosion* pada SS304L yang tidak mengandung molibdenum. Meskipun efektivitas *pickling* telah banyak dilaporkan, penelitian terdahulu umumnya masih berfokus pada satu parameter proses tanpa mempertimbangkan kondisi sambungan las secara spesifik, sehingga kajian mengenai pengaruh kombinasi konsentrasi HF dan temperatur terhadap ketebalan lapisan oksida sisa serta *pitting corrosion* pada sambungan las GTAW SS304L masih relatif terbatas.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengetahui pengaruh variasi konsentrasi HF dan temperatur proses *pickling* terhadap ketebalan lapisan oksida, dan (2) menganalisis pengaruh variasi konsentrasi HF dan temperatur terhadap karakteristik *pitting corrosion* pada sambungan las GTAW *stainless steel* 304L. Penelitian menggunakan HNO_3 25% dengan variasi konsentrasi HF sebesar 0,5%, 1%, 3%, dan 5%, serta variasi temperatur *pickling* 30°C, 35°C, dan 40°C selama 35 menit. Hasil penelitian diharapkan dapat memperkaya pemahaman mengenai hubungan antara perlakuan permukaan pasca-las dan ketahanan korosi lokal, sekaligus menjadi acuan teknis bagi industri dalam menentukan parameter *pickling* yang optimal.

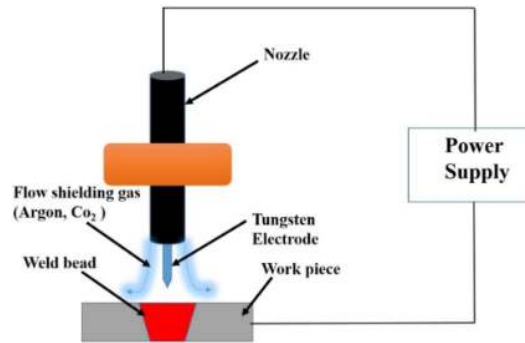
Penelitian ini juga merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya yang membahas variasi konsentrasi larutan dan lama waktu *pickling* pada sambungan las *stainless steel* (Hermansyah, 2025; Kusminah et al., 2025). Berdasarkan hasil observasi dan saran pada penelitian terdahulu, dilakukan pendalaman lebih lanjut dengan menambahkan variasi temperatur proses *pickling* sebagai parameter kedua di samping konsentrasi HF, serta memperluas evaluasi ketahanan korosi melalui kombinasi pengujian mikroskop optik, EIS, *weight loss*, *corrosion rate*, dan *pitting corrosion* secara terintegrasi, sehingga diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi proses *pickling* yang optimum pada sambungan las GTAW *stainless steel* 304L.

LANDASAN TEORI

Stainless steel 304L dan Pengaruh Pengelasan GTAW

Stainless steel merupakan paduan baja dengan kandungan kromium minimal sekitar 10,5% berat yang membentuk lapisan pasif kromium oksida (Cr_2O_3) bersifat stabil dan self-healing (Zhang et al., 2018). *Stainless steel* 304L adalah varian low-carbon (C maks. 0,03%) dari SS304 dengan kandungan Cr 18–20% dan Ni 8–12%, yang memiliki ketahanan lebih baik terhadap sensitisasi akibat pengelasan karena rendahnya pembentukan presipitasi kromium karbida (Cr_{23}C_6) pada HAZ (Wang et al., 2019). Namun, temperatur tinggi selama pengelasan tetap menghasilkan heat tint yang lebih tebal daripada passive film alami (1–3 nm), dan dapat menurunkan ketahanan korosi apabila tidak dihilangkan (Doerr et al., 2017).

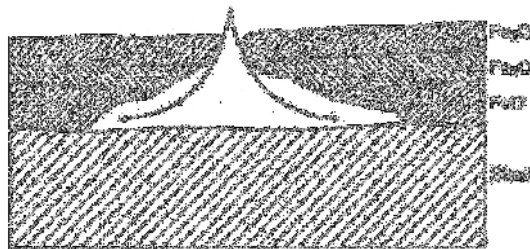
GTAW merupakan proses pengelasan busur listrik dengan elektroda tungsten tidak terumpan sebagai sumber panas, dilindungi gas inert (argon) yang mencegah oksidasi logam cair selama pengelasan (Kumar et al., 2024). Mekanisme dasar proses GTAW ditunjukkan pada Gambar 1. Filler metal yang digunakan pada penelitian ini adalah ER308L dengan kandungan karbon rendah (maks. 0,03%) untuk menekan sensitivitas pembentukan karbida pada batas butir (ASME Sec. II Part C, 2025).



Gambar 1. Skema mekanisme pengelasan GTAW (Kumar et al., 2024)

Proses *Pickling*

Pickling adalah proses pembersihan kimia pada *stainless steel* untuk menghilangkan oxide scale dan kontaminan anorganik hasil proses temperatur tinggi seperti pengelasan, menggunakan larutan asam berbasis HNO₃ dan HF yang melarutkan oksida besi dan kromium (ASTM A380/A380M, 2025). Larutan *pickling* menembus lapisan hematit (Fe₂O₃) dan magnetit (Fe₃O₄) melalui retakan permukaan, kemudian bereaksi dengan wustite (FeO) hingga mencapai logam dasar dan menghasilkan gas hidrogen yang membantu pelepasan lapisan oksida (Maanonen, 2014), seperti diilustrasikan pada Gambar 2. Ion fluorida berperan melarutkan oksida besi melalui pembentukan kompleks fluorida (Nabizadeh et al., 2021), namun konsentrasi HF yang terlalu tinggi dapat meningkatkan laju pelarutan permukaan (active dissolution) sehingga proses *pickling* menjadi kurang terkendali (Li et al., 2005).



Gambar 2. Mekanisme proses *pickling* pada permukaan oksida (Maanonen, 2014)

Pitting corrosion

Pitting corrosion merupakan korosi lokal yang terjadi akibat kerusakan lapisan pasif oleh anion agresif seperti klorida, yang memicu pelarutan logam setempat, penurunan pH lokal, dan mempercepat serangan korosi (Obeyesekere, 2017). Ketahanan terhadap *pitting corrosion* dievaluasi melalui metode weight loss dan corrosion rate berdasarkan ASTM G46 (2013), serta densitas dan ukuran pit kritis berdasarkan ASTM G48 (2020), sedangkan karakteristik elektrokimia lapisan pasif dievaluasi melalui *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS), dengan nilai polarization resistance (Rp) yang lebih tinggi menunjukkan hambatan transfer muatan yang lebih besar dan ketahanan korosi yang lebih baik (Stern & Geary, 1957).

METODE

Penelitian ini menggunakan material *stainless steel* 304L berbentuk pelat dengan desain sambungan butt joint single-V groove (sudut 60°), panjang 257 mm, lebar 213 mm, dan tebal 6 mm, yang dilas menggunakan proses GTAW posisi 1G dengan filler metal ER308L.

Parameter pengelasan dibuat seragam pada seluruh spesimen (arus 75–96 A, tegangan 10–11 V) dengan pelindung gas argon, sehingga kondisi awal sambungan las sama sebelum diberi perlakuan *pickling*. Setelah pengelasan, seluruh spesimen diperiksa secara visual mengacu pada ASME Sec. IX (2025) untuk memastikan tidak terdapat retak maupun cacat penetrasi.



Gambar 3. (a) Proses pengelasan GTAW spesimen uji; (b) filler metal ER308L yang digunakan

Proses *pickling* dilakukan dengan metode perendaman (immersion) menggunakan larutan HNO_3 68% dan HF 55% yang diencerkan hingga konsentrasi HNO_3 25% dengan variasi konsentrasi HF sebesar 0,5%, 1%, 3%, dan 5%, pada variasi temperatur 30°C, 35°C, dan 40°C selama 35 menit untuk setiap kombinasi, sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Setiap kombinasi menghasilkan satu kode spesimen (A1–D3) yang digunakan secara konsisten pada seluruh pengujian.



Gambar 4. Spesimen las dan larutan HNO_3 /HF yang digunakan pada proses *pickling*

Temperatur larutan *pickling* dikontrol menggunakan hot plate stirrer dan dipantau dengan termometer selama proses perendaman berlangsung (Gambar 5) agar temperatur tetap konstan sesuai variasi yang ditentukan (30°C, 35°C, atau 40°C), mengingat temperatur larutan berpengaruh langsung terhadap kinetika reaksi pelarutan oksida.



Gambar 5. Pengontrolan temperatur larutan *pickling* menggunakan hot plate dan thermometer

Tabel 1. Variasi konsentrasi HF dan temperatur proses *pickling*

Larutan	Kode Spesimen	Temperatur (°C)	Waktu (menit)
HNO ₃ 25% + HF 0,5%	A1 / A2 / A3	30 / 35 / 40	35
HNO ₃ 25% + HF 1%	B1 / B2 / B3	30 / 35 / 40	35
HNO ₃ 25% + HF 3%	C1 / C2 / C3	30 / 35 / 40	35
HNO ₃ 25% + HF 5%	D1 / D2 / D3	30 / 35 / 40	35

Setelah proses *pickling*, ketebalan lapisan oksida pada penampang las diukur menggunakan mikroskop optik. Karakteristik elektrokimia lapisan pasif dievaluasi melalui pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) mengacu pada ISO 16773-2 (2006) dengan model rangkaian ekivalen $R_s-(CPE||R_p)$, sedangkan ketahanan terhadap *pitting corrosion* diuji mengacu pada ASTM G48 Metode A melalui perendaman spesimen dalam larutan ferric chloride selama 72 jam. Evaluasi dilakukan melalui pengukuran weight loss dan corrosion rate menggunakan Persamaan (1) dan (2), serta densitas dan luas pit kritis menggunakan Persamaan (3) dan (4), yang selanjutnya dievaluasi tingkat keparahannya mengacu pada ASTM G46 (2013).

$$CR = (W \times K) / (A \times T \times D) \quad (1)$$

$$Weight\ loss = W_b - W_a \quad (2)$$

$$D = N / A \quad (3)$$

$$L = \pi \times r^2 \quad (4)$$

dengan CR = laju korosi (mm/tahun), W = weight loss (gram), K = konstanta (87.600), A = luas permukaan (cm²), T = lama pengujian (jam), D = densitas material (g/cm³) pada Persamaan (1); W_b dan W_a berturut-turut adalah massa spesimen sebelum dan sesudah pengujian pada Persamaan (2); D pada Persamaan (3) adalah densitas pitting (pit/m²) dan N adalah jumlah total pit pada luasan A; serta L pada Persamaan (4) adalah luas pit kritis (mm²) dengan r adalah jari-jari pit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengelasan dan Pengamatan Visual

Seluruh spesimen hasil pengelasan GTAW menunjukkan manik las yang kontinu, permukaan relatif halus, serta tidak ditemukan cacat signifikan seperti retak maupun porositas, sehingga layak digunakan sebagai objek pengujian *pickling* (Gambar 6). Sebelum *pickling*, permukaan las menunjukkan heat tint berwarna kecoklatan hingga kebiruan di sepanjang jalur las (Gambar 7), yang mengindikasikan terbentuknya lapisan oksida akibat paparan temperatur tinggi selama pengelasan.



Gambar 6. Spesimen hasil pengelasan GTAW sebelum *pickling* (kode A, B, C)



Gambar 7. Heat tint pada permukaan sambungan las GTAW sebelum proses *pickling*

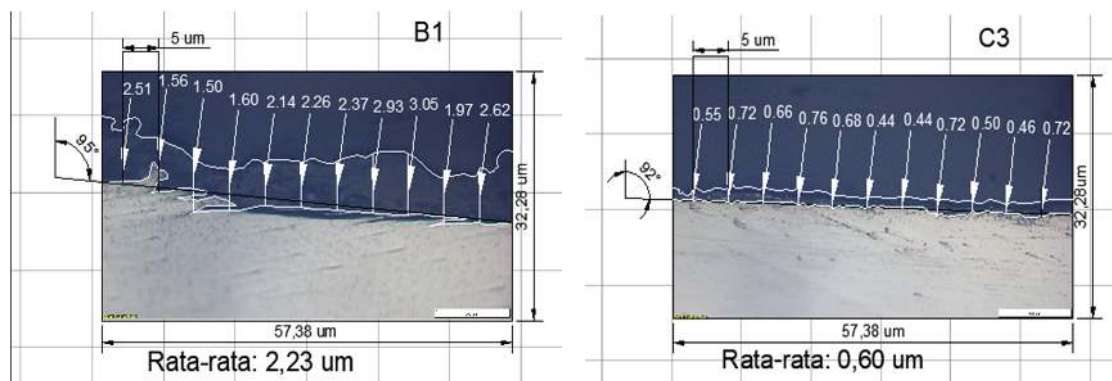
Setelah dilakukan *pickling*, tingkat kebersihan permukaan bervariasi pada setiap kombinasi konsentrasi HF dan temperatur, dengan kecenderungan permukaan yang semakin bersih pada temperatur *pickling* yang lebih tinggi. Gambar 8 memperlihatkan spesimen C2 (HF 3%; 35°C) setelah proses *pickling*, di mana heat tint telah tereduksi signifikan dan permukaan tampak lebih terang dibandingkan kondisi sebelum *pickling* pada Gambar 7, mengindikasikan larutan HNO_3/HF telah efektif melarutkan lapisan oksida permukaan.



Gambar 8. Spesimen C2 (HF 3%; 35°C) setelah proses pickling

Ketebalan Lapisan Oksida

Ketebalan lapisan oksida diukur pada penampang melintang spesimen menggunakan mikroskop optik pada 10–12 titik di sepanjang garis las, sebagaimana dicontohkan pada Gambar 9 dan Gambar 10. Hasil pengukuran menunjukkan ketebalan lapisan oksida berada pada rentang 0,60–3,01 μm (Tabel 2). Ketebalan paling tipis dan homogen diperoleh pada spesimen C3 (HF 3%; 40°C) sebesar 0,60 μm (Gambar 10), sedangkan ketebalan paling tebal diperoleh pada spesimen D1 (HF 5%; 30°C) sebesar 3,01 μm . Sebagai pembandingan, spesimen B1 (HF 1%; 30°C) pada Gambar 9 menunjukkan lapisan oksida yang jauh lebih tebal dan tidak merata (rata-rata 2,23 μm) dengan variasi titik ukur 1,50–3,05 μm , mengindikasikan bahwa pada konsentrasi HF rendah dan temperatur rendah, pelarutan oksida berlangsung tidak seragam di sepanjang garis las.



Gambar 9–10. Penampang lapisan oksida: (kiri) B1 (HF 1%; 30°C), rata-rata 2,23 μm ; (kanan) C3 (HF 3%; 40°C), rata-rata 0,60 μm — paling tipis dan homogen

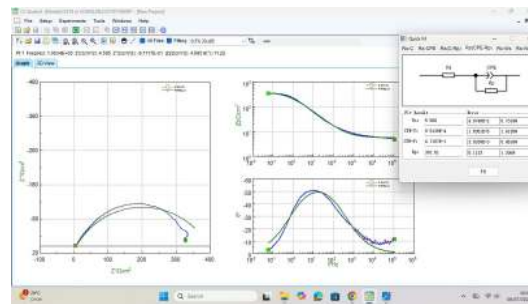
Pengaruh konsentrasi HF dan temperatur terhadap ketebalan oksida tidak bersifat linier: pada konsentrasi HF rendah (0,5% dan 1%) lapisan oksida cenderung lebih tebal karena ion fluorida belum cukup untuk melarutkan heat tint secara optimal (*under-pickling*) (Gálvez et al., 2006), sedangkan pada HF 5% temperatur 30°C kinetika reaksi yang belum optimum menyebabkan sebagian heat tint masih tertinggal. Kombinasi HF 3% dan temperatur 40°C memberikan keseimbangan terbaik antara pelarutan oksida dan kecepatan repassivasi oleh HNO_3 , sehingga menghasilkan lapisan paling tipis dan homogen.

Tabel 2. Rata-rata ketebalan lapisan oksida hasil pengamatan mikroskop optik

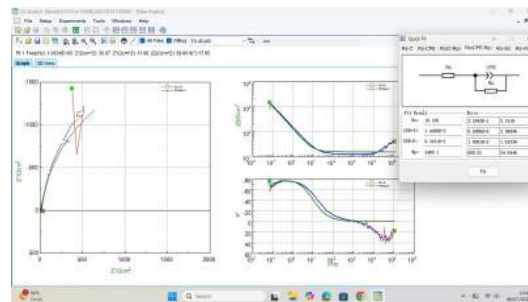
Konsentrasi HF	30°C (μm)	35°C (μm)	40°C (μm)
0,5%	2,49	1,98	0,64
1%	2,23	1,59	1,44
3%	1,01	0,65	0,60
5%	3,01	1,53	0,73

Karakteristik Elektrokimia (EIS)

Pengujian EIS dilakukan pada rentang frekuensi 10^5 – 10^{-2} Hz dan hasil pengukuran difitting menggunakan model rangkaian ekivalen R_s -($CPE||R_p$) untuk memperoleh nilai resistansi larutan (R_s) dan polarization resistance (R_p). Gambar 11 menunjukkan diagram Nyquist, Bode- $|Z|$, dan Bode- θ hasil fitting spesimen A1 (HF 0,5%; 30°C) dengan diameter semilingkaran kapasitif yang relatif kecil, menghasilkan R_p terendah pada penelitian ini sebesar $391,5 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Sebagai pembanding, Gambar 12 menunjukkan hasil fitting spesimen C3 (HF 3%; 40°C) dengan diameter semilingkaran kapasitif yang jauh lebih besar, menghasilkan R_p tertinggi sebesar $3499,1 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Semakin besar diameter semilingkaran pada diagram Nyquist mengindikasikan hambatan transfer muatan yang lebih besar pada antarmuka logam-elektrolit, yang berarti lapisan pasif pada permukaan spesimen tersebut lebih stabil dan protektif (Stern & Geary, 1957).



Gambar 11. Diagram Nyquist dan Bode hasil fitting EIS spesimen A1 (HF 0,5%; 30°C), $R_p = 391,5 \Omega \cdot \text{cm}^2$



Gambar 12. Diagram Nyquist dan Bode hasil fitting EIS spesimen C3 (HF 3%; 40°C), $R_p = 3499,1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ — nilai tertinggi pada seluruh specimen

Hasil fitting EIS untuk seluruh kombinasi konsentrasi HF dan temperatur (Tabel 3) menunjukkan bahwa nilai R_p meningkat seiring kenaikan temperatur pada seluruh variasi konsentrasi HF, mengindikasikan bahwa temperatur meningkatkan efektivitas *pickling*.

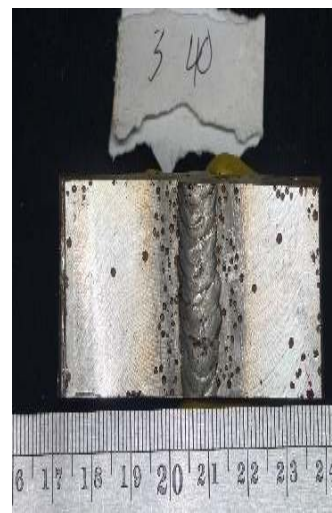
Pengaruh konsentrasi HF terhadap R_p bersifat tidak linier: nilai R_p meningkat dari HF 0,5% menuju 1% dan mencapai nilai tertinggi pada HF 3%, namun menurun kembali pada HF 5%. Fenomena ini konsisten dengan mekanisme pelarutan oksida oleh ion fluorida (Nabizadeh et al., 2021) dan stabilitas lapisan pasif kaya kromium sebagai faktor utama penentu ketahanan korosi *stainless steel* (Olsson & Landolt, 2003), serta sejalan dengan temuan bahwa lapisan oksida yang lebih stabil meningkatkan respons impedansi sambungan las SS304L (Heo et al., 2021).

Tabel 3. Nilai polarization resistance (R_p) hasil fitting EIS

Konsentrasi HF	30°C ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	35°C ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	40°C ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
0,5%	391,51	416,41	516,54
1%	985,29	1028,20	1192,70
3%	1120,30	1560,30	3499,10
5%	526,71	595,10	832,65

Weight Loss, Corrosion Rate, dan *Pitting corrosion*

Ketahanan terhadap *pitting corrosion* diuji mengacu pada ASTM G48 Metode A melalui perendaman spesimen dalam larutan ferric chloride (FeCl_3) 6% selama 72 jam pada temperatur 22°C. Setelah pengujian, permukaan spesimen diamati untuk menghitung jumlah dan luas pit yang terbentuk, sebagaimana dicontohkan pada Gambar 13 dan Gambar 14. Spesimen A1 (HF 0,5%; 30°C) pada Gambar 13 menunjukkan sebaran pit dengan densitas 196.161,12 pit/m², sedangkan spesimen C3 (HF 3%; 40°C) pada Gambar 14 menunjukkan densitas pit yang jauh lebih rendah yaitu 117.270,79 pit/m² dengan sebaran yang lebih jarang, konsisten dengan lapisan oksida yang lebih tipis dan nilai R_p yang lebih tinggi pada spesimen tersebut.



Gambar 13–14. Permukaan spesimen setelah uji ASTM G48: (kiri) A1 — densitas 196.161,12 pit/m²; (kanan) C3 — densitas 117.270,79 pit/m²

Hasil pengujian ASTM G48 selama 72 jam (Tabel 4) menunjukkan nilai weight loss dan corrosion rate terendah pada spesimen C3 (HF 3%; 40°C) sebesar 1,4221 gram dan 24,41 mm/tahun, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada spesimen B1 (HF 1%; 30°C) sebesar 1,8324 gram dan 31,02 mm/tahun. Hasil evaluasi densitas dan luas pit kritis berdasarkan ASTM

G46 menunjukkan nilai densitas pitting pada rentang 72.494,67–246.801,71 pit/m² dan luas pit kritis pada rentang 0,702–1,653 mm², dengan seluruh spesimen tergolong grade A4–A5 untuk densitas dan B2–B3 untuk ukuran pit, yang menunjukkan bahwa variasi perlakuan belum mengubah kategori keparahan pitting secara signifikan meskipun nilai numeriknya bervariasi.

Tabel 4. Ringkasan hasil weight loss dan corrosion rate (temperatur 40°C)

Konsentrasi HF	Kode	Weight loss (gram)	Corrosion rate (mm/tahun)
0,5%	A3	1,7766	31,11
1%	B3	1,5991	26,99
3%	C3	1,4221	24,41
5%	D3	1,6219	27,33

Evaluasi densitas dan luas pit kritis untuk seluruh kombinasi konsentrasi HF dan temperatur disajikan pada Tabel 5. Densitas pitting tertinggi diperoleh pada spesimen D2 (HF 5%; 35°C) sebesar 246.801,71 pit/m², sedangkan densitas terendah diperoleh pada spesimen A3 (HF 0,5%; 40°C) sebesar 72.494,67 pit/m². Menariknya, luas pit kritis terbesar justru diperoleh pada spesimen B1 (1,653 mm²) yang memiliki densitas pit menengah, menunjukkan bahwa jumlah pit yang terbentuk tidak selalu berbanding lurus dengan ukuran pit; suatu spesimen dapat memiliki jumlah pit yang sedikit namun mengalami pertumbuhan pit yang lebih agresif, atau sebaliknya.

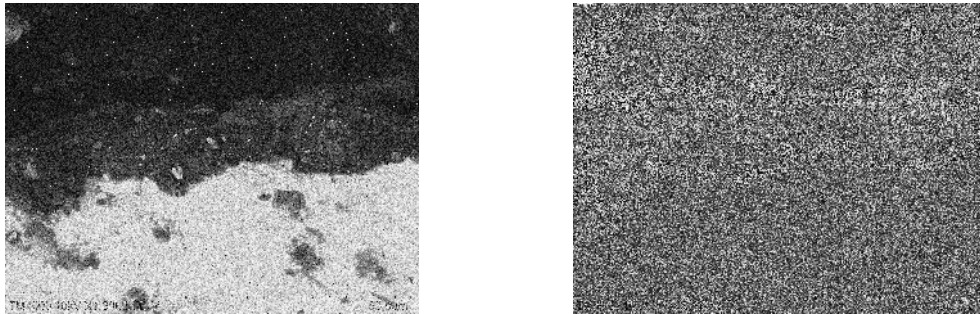
Tabel 5. Densitas dan luas pit kritis seluruh spesimen (ASTM G46)

Konsentrasi HF	Kode	Temperatur (°C)	Densitas pit (pit/m ²)	Luas pit kritis (mm ²)
0,5%	A1	30	196.161,12	1,490
0,5%	A2	35	131.663,11	0,953
0,5%	A3	40	72.494,67	1,562
1%	B1	30	136.460,55	1,653
1%	B2	35	158.315,57	0,702
1%	B3	40	160.981,88	0,759
3%	C1	30	216.950,96	0,790
3%	C2	35	187.100,21	0,719
3%	C3	40	117.270,79	0,714
5%	D1	30	225.906,18	0,805
5%	D2	35	246.801,71	0,824
5%	D3	40	194.029,85	0,768

Morfologi Lapisan Oksida dan Permukaan Pitting (SEM)

Pengamatan Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan pada spesimen terpilih untuk mengonfirmasi hasil pengukuran ketebalan oksida dan EIS secara visual pada skala mikro. Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan morfologi permukaan penampang las hasil pengamatan SEM mode backscattered electron (BSE) dan secondary electron (SE) pada

perbesaran 1000x. Tampak lapisan oksida sisa berbentuk gumpalan (nodular) yang menempel tidak merata pada permukaan logam dasar, dengan tekstur permukaan yang kasar dan berpori di sekitar batas lapisan oksida-logam. Morfologi berpori dan tidak homogen semacam ini merupakan lokasi yang lebih rentan terhadap inisiasi pitting, karena ion klorida dapat terperangkap dan terkonsentrasi pada celah-celah mikro tersebut sebelum merusak lapisan pasif di bawahnya (Obeyesekere, 2017).



Gambar 15–16. Morfologi SEM lapisan oksida sisa pada penampang sambungan las: (kiri) mode BSE; (kanan) mode SE, perbesaran 1000x, menunjukkan struktur oksida berpori pada batas lapisan

Hasil pengamatan SEM ini memperkuat temuan pengukuran mikroskop optik dan EIS: spesimen dengan lapisan oksida yang lebih tebal dan morfologi permukaan yang tidak homogen (seperti D1) cenderung memiliki lebih banyak titik lemah yang berpotensi menjadi lokasi inisiasi pitting, sedangkan spesimen dengan lapisan oksida tipis dan seragam (seperti C3) menunjukkan permukaan lapisan pasif yang lebih homogen sehingga distribusi serangan korosi lebih merata dan tidak terkonsentrasi. Hasil ini sejalan dengan mekanisme kerusakan lapisan pasif oleh ion klorida yang lebih mudah terjadi pada area permukaan yang kurang homogen (Obeyesekere, 2017).

Secara keseluruhan, hasil pengujian ketebalan lapisan oksida, EIS, weight loss, corrosion rate, serta densitas pitting menunjukkan kecenderungan yang konsisten satu sama lain: kombinasi konsentrasi HF 3% dan temperatur 40°C secara bersamaan menghasilkan lapisan oksida paling tipis, nilai polarization resistance tertinggi, serta weight loss dan corrosion rate terendah. Kesesuaian antar-metode pengujian ini menunjukkan bahwa efektivitas *pickling* ditentukan oleh keseimbangan antara pelarutan lapisan oksida (oxide dissolution) dan pembentukan kembali lapisan pasif (repassivation); konsentrasi HF yang terlalu rendah menyebabkan *under-pickling*, sedangkan konsentrasi yang terlalu tinggi memicu *over-pickling* akibat pelarutan permukaan yang berlebihan (Peng et al., 2020). Dengan demikian, kombinasi HF 3% dan temperatur 40°C merupakan parameter *pickling* paling optimum pada penelitian ini untuk meningkatkan ketahanan *pitting corrosion* sambungan las GTAW *stainless steel* 304L.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan: (1) Variasi konsentrasi HF (0,5%, 1%, 3%, 5%) dan temperatur (30°C, 35°C, 40°C) pada proses *pickling* berpengaruh terhadap ketebalan lapisan oksida sambungan las GTAW *stainless steel* 304L, dengan rentang ketebalan 0,60–3,01 μm ; lapisan paling tipis dan homogen diperoleh pada kombinasi HF 3% dan 40°C, didukung oleh nilai polarization resistance tertinggi sebesar 3499,10 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ pada kombinasi yang sama. (2) Variasi konsentrasi HF dan temperatur juga berpengaruh terhadap karakteristik *pitting corrosion*; nilai weight loss dan corrosion rate terendah diperoleh pada HF

3% dan 40°C sebesar 1,4221 gram dan 24,41 mm/tahun, sedangkan seluruh spesimen tergolong grade A4–A5/B2–B3 berdasarkan ASTM G46. Secara keseluruhan, pengaruh kedua parameter tidak bersifat linier, dan kombinasi konsentrasi HF 3% dengan temperatur 40°C merupakan parameter *pickling* paling optimum karena memberikan keseimbangan terbaik antara pelarutan lapisan oksida dan pembentukan kembali lapisan pasif yang protektif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing, Bapak Mukhlis, S.T., M.T. dan Bapak Eriek Wahyu Restu Widodo, S.Si., M.T., atas bimbingan selama penelitian, serta kepada Program Studi Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya atas dukungan fasilitas pengujian yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- ASME Sec. II Part A. (2025). ASME Sec. II Part A: Ferrous Material Specifications (Beginning to SA-450). ASME Sec. II Part A.
- ASME Sec. II Part C. (2025). ASME Sec. II Part C: Specification for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metal. ASME Sec. II Part C.
- ASTM A380/A380M. (2025). Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of *Stainless steel*. <https://doi.org/10.1520/A0380>
- ASTM G46. (2013). Standard Guide for Examination and Evaluation of *Pitting corrosion*. <https://doi.org/10.1520/G0046-94R13.2>
- ASTM G48. (2020). Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of *Stainless steels*. <https://doi.org/10.1520/G0048-11>
- Doerr, C., Kim, J., Singh, P., Wall, J. J., & Jacobs, L. J. (2017). NDT and E International.
- Gálvez, J. L., Dufour, J., Negro, C., & López-Mateos, F. (2006). Fluoride Speciation in *Stainless steel Pickling Liquor*. 46(2), 281–286.
- Heo, J., Lee, S. Y., Lee, J., Alfantazi, A., & Cho, S. O. (2021). Improvement of Corrosion Resistance of *Stainless steel* Welded Joint Using a Nanostructured Oxide Layer.
- Hermansyah, A. (2025). Analisis Variasi Konsentrasi Larutan dan Lama Waktu *Pickling* pada Sambungan Las SA-312 Grade 304 terhadap Ketebalan Lapisan Oksida.
- ISO 16773-2. (2006). *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)* on coated and uncoated specimens. International Organization for Standardization.
- Kusminah, I. L., Hermansyah, A., Anggara, D., & Al Amin, M. K. (2025). Analisis Variasi Konsentrasi dan Waktu *Pickling* terhadap Perilaku *Pitting corrosion* pada Sambungan Las SA-312. *Jurnal Teknologi Maritim*, 8(2), 61–74.
- Kumar, S., Srinivas, N., Kumar, N., & Giri, J. (2024). An extensive analysis of GTAW process and its influence on the microstructure and mechanical properties of SDSS 2507. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 8675–8686. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.157>
- Li, L., Caenen, P., Daerden, M., Vaes, D., Meers, G., & Dhondt, C. (2005). Mechanism of single and multiple step *pickling* of 304 *stainless steel* in acid electrolytes. *Corrosion Science*, 47, 1307–1324. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.06.025>
- Li, X., Wang, J., Han, E., & Ke, W. (2013). Corrosion behavior for Alloy 690 and Alloy 800 tubes in simulated primary water. *Corrosion Science*, 67, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.10.018>
- Maanonen, M. (2014). *Steel Pickling in Challenging Conditions*.

- Maroufkhani, M., Hakimian, S., Khodabandeh, A., Radu, I., Hof, L. A., & Jahazi, M. (2023). Influence of Oxygen Content in the Protective Gas on *Pitting corrosion* Resistance of a 316L *Stainless steel* Weld Joint.
- Nabizadeh, M., Baert, K., Goderis, S., Ottevaere, H., Terryn, H., & Hauffman, T. (2021). The mechanism of thermal oxide film formation on low Cr martensitic *stainless steel* and its behavior in fluoride-based *pickling* solution. *Corrosion Science*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.109206>
- Obeyesekere, N. U. (2017). *Pitting corrosion*. In Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00009-7>
- Olsson, C. A., & Landolt, D. (2003). Passive films on *stainless steels* – chemistry, structure and growth. *Electrochimica Acta*, 48, 1093–1104. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00841-1](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00841-1)
- Peng, J., Yang, Y., & Li, M. (2020). *Pickling* behavior of 2205 duplex *stainless steel* hot-rolled strips in mixed solutions of HNO₃-HF.
- Stern, M., & Geary, A. L. (1957). Electrochemical Polarization. *Journal of the Electrochemical Society*, 56–63.
- Wang, Z., Seyeux, A., Zanna, S., Maurice, V., & Marcus, P. (2019). Chloride-induced alterations of the passive film on 316L *stainless steel* and blocking effect of pre-passivation. *Electrochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135159>
- Zhang, B., Wang, J., Wu, B., Guo, X. W., Wang, Y. J., Chen, D., Zhang, Y. C., Du, K., Oguzie, E. E., & Ma, X. L. (2018). Unmasking chloride attack on the passive film of metals. *Nature Communications*, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04942-x>