



Jurnal Teknologi Maritim Volume 8 No 2 Tahun 2025
22 September 2025 / 21 Oktober 2025 / 24 Oktober 2025

Jurnal Teknologi Maritim

<http://jtm.ppns.ac.id>

Analisis Variasi Konsentrasi dan Waktu *Pickling* terhadap Perilaku *Pitting Corrosion* pada Sambungan Las SA-312

Imah Luluk K.^{1*}, Wiwik Dwi P.², Aditya Hermansyah³, Dika Anggara⁴, Alvalo Toto W.⁵,
Eriek Wahyu Restu W.⁶, M. Karim Al Amin⁷

^{1,3,4,5,6,7}Teknik Pengelasan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

²Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri
Surabaya

Abstrak. *Stainless steel austenitik*, khususnya SA-312 Grade 304, banyak digunakan di berbagai sektor industri karena ketahanan korosi dan sifat mekaniknya yang unggul. Namun, proses pengelasan dapat menimbulkan terbentuknya lapisan oksida (*burn scale*) yang berpotensi menurunkan ketahanan korosi. Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengatasi permasalahan ini adalah *pickling*, yaitu perlakuan kimia dengan larutan asam, seperti asam nitrat (HNO_3) dan asam florida (HF), guna menghilangkan lapisan oksida serta kontaminan pada permukaan *stainless steel*. Meskipun demikian, variasi konsentrasi larutan dan lama waktu *pickling* dapat mempengaruhi efektivitas proses tersebut, sekaligus meningkatkan kerentanan terhadap korosi, khususnya *pitting corrosion*. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis pengaruh variasi konsentrasi dan waktu *pickling* terhadap perilaku *pitting corrosion* pada sambungan las SA-312. Karakterisasi dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengamati morfologi lapisan oksida, sedangkan ketahanan terhadap *pitting corrosion* dievaluasi melalui pengujian sesuai standar ASTM G48 Metode A. Hasil ketebalan lapisan oksida berada pada rentang $\sim 28,6 \mu\text{m}$ hingga $40,7 \mu\text{m}$ dengan semakin rendah konsentrasi HNO_3 dan semakin lama waktu piklingnya, maka semakin tebal lapisan oksida yang terbentuk. Morfologi SEM material setelah *pickling* memperlihatkan permukaan dengan tekstur kasar, retakan kecil, serta adanya *void* (lubang hitam pada bagian tengah). Hal ini disebabkan oleh proses pelarutan oksida dan kontaminan permukaan sehingga menghasilkan topografi yang lebih kasar. Hasil pengujian *pitting corrosion* menjelaskan semakin rendah konsentrasi HNO_3 dan semakin lama waktu piklingnya (A1), maka semakin rendah nilai densitas pitingnya. Hal ini mencegah korosi piting terjadi dan ketahanan korosinya baik.

Katakunci: Lapisan oksida, *Pickling*, *Pitting corrosion*, SEM, *Stainless steel*

Abstract. Austenitic stainless steel, particularly SA-312 Grade 304, is widely utilized in various industrial sectors due to its excellent corrosion resistance and mechanical properties. However, welding processes can lead to the formation of oxide layers (*burn scale*), which may reduce the corrosion resistance of the material. A commonly employed method to overcome this issue is pickling, a chemical treatment using acid solutions such as nitric acid (HNO_3) and hydrofluoric acid (HF), aimed at removing oxide layers and surface contaminants. Nevertheless, variations in acid concentration and pickling duration can influence the effectiveness of the process, while also

potentially increasing susceptibility to localized attack, especially pitting corrosion. In this study, the effects of varying concentration and duration of pickling on the pitting corrosion behavior of SA-312 weld joints were analyzed. Characterization was carried out using a Scanning Electron Microscope (SEM) to observe the morphology of oxide layers, while pitting resistance was evaluated following ASTM G48 Method A. The results of the oxide layer thickness are in the range of $\sim 28.6 \mu\text{m}$ to $40.7 \mu\text{m}$ with the lower HNO_3 concentration and the longer the pickling time, the thicker the oxide layer formed. The morphology of the SEM material after pickling is shown with a rough texture, small cracks, and the presence of voids (black holes in the center). This is caused by the oxide dissolution process and surface contamination resulting in a rougher topography. The results of the pitting corrosion test explain that the lower the HNO_3 concentration and the longer the pickling time, the lower the pitting density value. This prevents the occurrence of corrosion holes and its corrosion resistance increases well.

Keywords: Oxide layer, Pickling, Pitting corrosion, SEM, Stainless steel

1. Pendahuluan

Austenitic stainless steel, khususnya SA-312 Grade 304, banyak digunakan di berbagai industri karena kombinasi sifat mekanik dan ketahanan korosinya yang baik (AWS-ED9-Vol4, 1991). Struktur mikro material ini didominasi oleh fasa austenit yang memberikan keuletan dan ketangguhan, sedangkan sedikit fasa delta ferit berperan dalam meningkatkan ketahanan korosi. Namun demikian, proses pengelasan dapat menimbulkan terbentuknya lapisan oksida (*burn scale*) yang merusak lapisan pelindung kromium oksida sehingga meningkatkan risiko terjadinya *pitting corrosion* (Li & Celis, 2003).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, salah satu metode yang banyak digunakan adalah *pickling*, yaitu perlakuan kimia menggunakan larutan asam kuat seperti HNO_3 dan HF. Proses ini efektif dalam menghilangkan oksida dan kontaminan serta memulihkan ketahanan korosi material (Shi et al., 2017; Liu et al., 2022). Akan tetapi, variasi konsentrasi larutan dan waktu penahanan dapat mempengaruhi efektivitas *pickling* dan bahkan memperburuk kerentanan terhadap korosi *pitting*, terutama pada baja tahan karat 304 yang tidak mengandung molybdenum sebagai unsur penstabil ketahanan *pitting* (Sun et al., 2021).

Analisis ketebalan lapisan oksida pada material *stainless steel* belum banyak yang meneliti, sehingga untuk mengetahui parameter pengelasan dan *pickling* yang sesuai agar lapisan kromium oksida yang terbentuk tidak rusak maka perlu dilakukan penelitian ini. Menurut penelitian Celis mengatakan bahwa proses *treatment* material yaitu perlakuan panas dan pendinginan mempengaruhi tebal oksida dan efisiensi proses *pickling* (Celis, 2003).

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis pengaruh variasi konsentrasi dan waktu *pickling* terhadap perilaku *pitting corrosion* pada sambungan las SA-312. Proses pengelasan/perlakuan panas dengan parameter yang sudah ditentukan diterapkan pada material. Kemudian material di *pickling* pada variasi konsentrasi dan waktu yang berbeda. Hasil pengelasan di uji morfologinya dengan SEM untuk melihat ketebalan lapisan oksida yang terbentuk. Hasil pengelasan juga di uji korosi untuk melihat pengaruh proses *pickling* terhadap korosi yang terbentuk. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi parameter *pickling* yang optimal sebagai perlakuan pada pengelasan *stainless steel austenitik*.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 *Stainless Steel* SA-312

Stainless steel SA-312 grade 304 merupakan salah satu jenis baja tahan karat *austenitic* yang sering digunakan dalam dunia industri, dengan kandungan berbasis *Chromium* (Cr) dan *Nickel* (Ni). Kandungan Cr (*Chromium*) yang tinggi yaitu sebesar 18%-20% memberikan

ketahanan korosi yang sangat baik pada baja tahan karat ini. Hal ini karena *Chromium* (Cr) membentuk lapisan oksida yang melindungi permukaan baja dari korosi. SA-312 grade 304 juga mengandung unsur *Nickel* (Ni) sehingga mampu bertahan dari oksidasi yang menyebabkan terjadinya korosi (AWS-ED9-Vol4, 1991). *Stainless Steel* SA-312 grade 304, memiliki *chemical composition* dan *mechanical test requirements* ditunjukkan pada Tabel 1 *Mill Certificate* 304 dan Tabel 2 *Mechanical Test Requirements* sebagai berikut.

Tabel 1 *Mill Certificate Stainless Steel 304*

Grade	Chemical Composition						
	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S
TP 304	18-20%	8-10,5%	Max	Max	Max	Max	Max
			0,08	2,00	1,00	0,045	0,03

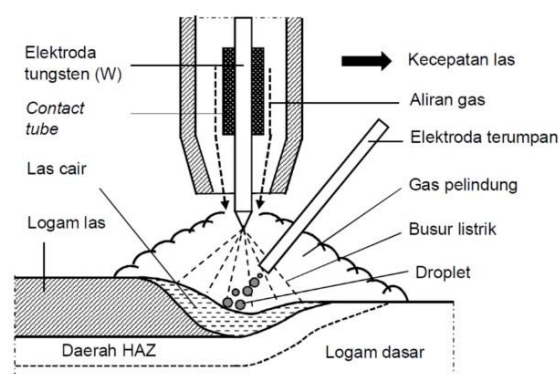
(Sumber: ASME Sec II Part A, 2023)

Tabel 2 *Mechanical Test Requirements Stainless Steel 304*

No. UNS	Mechanical Test Requirements		
	Type	Tensile Strength, min	Yield Strength, min
		Ksi (MPa)	Ksi (MPa)
S30400	304	75 (515)	30 (205)

(Sumber: ASME Sec II Part A, 2023)

Menurut Ilman M. N, (2024) proses pengelasan dengan teknik las busur tungsten-gas mulia (*Gas Tungsten Arc Welding*) atau disingkat las GTAW menggunakan elektroda tak terumpan berupa logam tungsten atau wolfram (W) sebagai penghasil busur listrik. Selanjutnya, panas yang dihasilkan digunakan untuk melelehkan logam pengisi yang diumpankan secara manual. Pada saat yang sama, gas mulia seperti Argon (Ar), Helium (He), atau campuran gas pelindung diembuskan melalui pipa gas untuk melindungi busur listrik dan las cair selama proses pengelasan. Penambahan gas helium ke dalam argon dapat menaikkan temperatur busur sehingga menghasilkan penetrasi yang dalam. Gas pelindung lain berupa campuran gas argon dan 2-5% gas Hidrogen (H₂) bersifat reduksi sehingga dapat mengurangi terjadinya oksidasi pada permukaan logam. Akan tetapi, campuran gas ini sangat berisiko karena bisa menyebabkan retak hidrogen pada baja dan porositas pada pengelasan aluminium. Mekanisme pengelasan GTAW ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1 Las tungsten-gas mulia. (Ilman, 2024)

Sumber arus yang digunakan bisa berupa sumber arus searah (DC) atau bolak-balik (AC). Untuk sumber arus searah (DC), teknik pengelasan GTAW terbagi menjadi dua jenis polaritas, yaitu polaritas lurus dan polaritas balik.

Filer logam ER 308L adalah jenis kawat las *stainless steel* yang sesuai digunakan untuk proses pengelasan material *stainless steel* tipe 304 dan 304L, hal ini dikarenakan *filler metal* ER 308L memiliki kadar kandungan karbon yang rendah (maksimal 0,03%), yang efektif mengurangi sensitivitas terhadap pembentukan karbida pada batas butir selama proses pengelasan. Hal ini penting untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi intergranular, terutama dalam penggunaan pada lingkungan agresif (ASME, BPVC, Section II, Part C, 2013). Komposisi kimia filer logam ER 308L ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3 *Mill Certificate Filler Metal ER 308L
Chemical Composition Requirements*

C	0.03%
Cr	19.5%-22.0%
Ni	9.0%-11.0%
Mo	0.75
Mn	1.0-2.5
Si	0.30-0.60
P	0.03
S	0.03
Cu	0.75

(Sumber: AWS A.9/A5.9M, 2022)

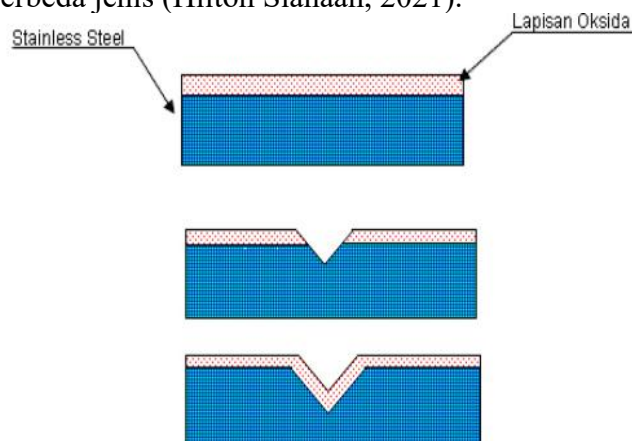
2.2 Korosi

Korosi adalah suatu fenomena degradasi atau kerusakan material, terutama logam, akibat reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungan sekitarnya. Proses ini menyebabkan logam kehilangan sifat mekaniknya, seperti kekuatan dan keuletan, serta mengurangi masa pakai komponen logam. Permasalahan korosi merupakan tantangan yang tidak dapat dihindari dalam dunia industri perminyakan dan gas akibat lingkungan kerja dan kondisi operasi yang kompleks. Faktor-faktor seperti tekanan dan suhu tinggi, air yang mengandung partikel dan gas terlarut (terutama CO₂ dan H₂S), pasir terperangkap, aktivitas mikroba yang memicu korosi, serta pola aliran multifase yang rumit (Pantelis & Tsiourva, 2017).

Penelitian tentang korosi pada sambungan las telah menjadi fokus perhatian dan secara intensif dikaji dalam beberapa dekade terakhir. Meskipun proses pengelasan pada struktur minyak dan gas dilakukan sesuai dengan prosedur, metode, dan standar yang telah ditetapkan sehingga dianggap bebas dari cacat las, kegagalan akibat korosi pada area las tetap terjadi. Sambungan las dapat mengalami berbagai jenis korosi di lingkungan perminyakan, yang erat kaitannya dengan karakteristik unik las seperti struktur mikro, posisi kimia, dan tegangan sisa (Pantelis & Tsiourva, 2017). Parameter penting yang menentukan perilaku korosi pada pengelasan meliputi:

1. Praktik dan urutan proses pengelasan serta pemilihan material logam pengisi, yang menentukan variasi komposisi metalurgi dan kimia pada logam induk, HAZ, dan WM. Variasi ini dapat menjadi awal terjadinya salah satu jenis korosi, yaitu korosi galvanik.
2. Kontaminasi kelembapan yang menyebabkan keretakan akibat *hydrogen* (HIC) pada hasil pengelasan. Terjebaknya hidrogen dalam hasil pengelasan dapat disebabkan oleh elektroda logam pengisi disimpan dengan tidak benar.
3. Lapisan oksida dan kerak. Tekstur dan gaya rekat produk korosi yang terbentuk pada daerah lasan dapat memengaruhi perkembangan korosi. Produk korosi yang padat dan tidak berpori, yang melekat kuat pada *substrate* logam dapat mengurangi perkembangan korosi.
4. Cacat las (seperti penetrasi atau fusi las yang tidak sempurna, *porosity*, *crack*, atau cacat permukaan) bertindak sebagai lokasi pilihan untuk serangan *pitting corrosion*.
5. Tekanan tinggi juga dapat menyebabkan retak korosi tegangan (*stress corrosion cracking*), hal ini disebabkan karena terciptanya deformasi mikro yang dapat berkembang menjadi retakan besar di bawah kondisi tertentu.
6. (FSF) *final surface finish* dalam suatu produk hasil manufaktur juga mempengaruhi resiko terjadinya korosi permukaan, karena semakin kasar permukaan suatu produk maka semakin besar juga resiko terjadinya korosi (Pantelis & Tsiourva, 2017).

Stainless steel (SS) pada dasarnya bukan termasuk logam mulia seperti emas (Au) dan platina (Pt), yang memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi akibat pengaruh lingkungan. Meskipun demikian, *stainless steel* tetap dapat mengalami korosi. Ketahanan *stainless steel* terhadap korosi disebabkan oleh terbentuknya lapisan pelindung tak terlihat (*invisible layer*) yang dihasilkan dari proses oksidasi antara *stainless steel* dan oksigen, membentuk lapisan pelindung anti korosi (*protective layer*). Oksigen yang berperan dalam pembentukan lapisan ini dapat berasal dari udara maupun air. Beberapa material lain yang memiliki karakteristik serupa di antaranya Titanium (Ti) dan Aluminium (Al). Umumnya, *protective layer* terbentuk secara spontan melalui reaksi kromium dengan oksigen, menghasilkan krom-oksida. Apabila lapisan pelindung ini tergores atau terkelupas, lapisan baru akan terbentuk kembali secara otomatis selama lingkungan memiliki kandungan oksigen yang memadai ditunjukkan pada Gambar 2. Namun, kondisi lingkungan tetap berperan penting sebagai faktor yang dapat merusak lapisan pelindung tersebut. Jika lapisan ini tidak lagi dapat terbentuk, maka korosi akan terjadi. Beragam media dapat memicu korosi, termasuk udara, cairan atau larutan dengan sifat asam atau basa, gas proses seperti asap hasil pembakaran, reaksi kimia, serta kontak dengan logam berbeda jenis (Hilton Siahaan, 2021).



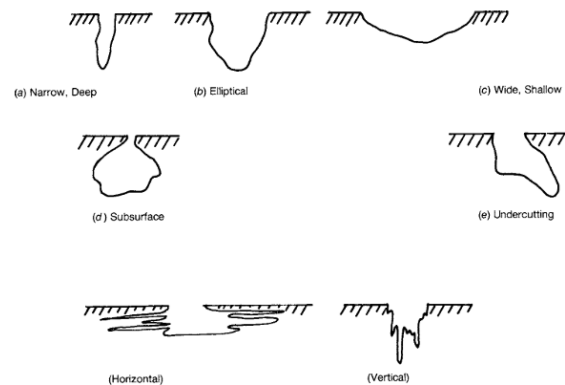
Gambar 2 Pembentukan spontan lapisan oksida pada *stanless steel* (Hilton Siahaan, 2021)

Menurut Obeyesekere (2017), korosi sumuran (*pitting corrosion*) didefinisikan sebagai korosi yang terjadi di area terbatas pada permukaan logam, di mana akses ke lingkungan terbatas. Area terbatas ini disebut celah. Misalnya, celah dapat terbentuk di bawah gasket atau segel dan ruang yang tertutup oleh endapan. Di bawah celah, ion logam yang dihasilkan dari reaksi anoda dibatasi untuk diangkut ke luar wilayah tersebut. Hal ini akan meningkatkan konsentrasi ion logam di bawah area terbatas, yang mendorong reaksi hidrolisis antara ion logam dan air dan dengan demikian menurunkan pH lokal, kejadian ini akan menyebabkan korosi parah di bawah celah.

Korosi *pitting* disebabkan oleh pelarutan lokal permukaan logam. Hal ini menyebabkan terbentuknya lubang-lubang lokal yang dalam pada logam pasif yang terpapar media berair dengan garam terlarut. Pelarutan logam lokal yang dipercepat ini terjadi sebagai akibat dari rusaknya lapisan pelindung pasif pada permukaan logam. Anion garam terlarut seperti anion klorida, tiosulfat, dan bromida dapat mengganggu pembentukan lapisan pelindung yang menyebabkan korosi *pitting*. Anion-anion ini seperti anion klorida berasal dari asam kuat dan dapat menyebabkan korosi *pitting*. Migrasi ion klorida ke dalam lubang akan meningkatkan konsentrasi FeCl_2 dan dengan demikian menurunkan pH. Korosi *pitting* didefinisikan oleh serangan lokal pada permukaan logam yang pasif. Misalnya, baja tahan karat membentuk lapisan oksida pada permukaan logam, yang sangat mengurangi korosi. Namun, keuletan lapisan oksida logam dilemahkan oleh penyisipan klorida ke dalam lapisan oksida logam yang menempel lingkungan yang menyebabkan korosi *pitting*. Jenis korosi ini terjadi pada paduan yang dilindungi oleh lapisan oksida pasif, seperti baja tahan karat di lingkungan yang mengandung spesies anion agresif seperti anion klorida.

Sebaliknya, logam dalam lingkungan dengan lapisan pasif pelindung yang lebih sedikit tidak selalu menghasilkan korosi *pitting*. Misalnya, logam atau paduan dalam lingkungan pH rendah yang agresif, CO_2 tinggi, menghasilkan besi karbonat sebagai lapisan pasif dan menghasilkan korosi yang lebih umum, sedangkan lingkungan asam agresif yang menghasilkan FeS sebagai lapisan pasif akan menghasilkan lebih banyak korosi *pitting*. Hal ini disebabkan oleh kelarutan besi karbonat yang lebih tinggi dalam larutan berair dibandingkan dengan FeS dan akan menghasilkan lapisan pelindung yang kurang ulet, yang pada gilirannya, akan menyebabkan korosi yang lebih umum. Sulfida besi umumnya kurang larut dalam media berair dan dapat membuat film yang lebih protektif dan ulet. *Polimorf* sulfida besi yang ditentukan oleh lingkungan kimia, menghasilkan berbagai jenis film. Beberapa bentuk sulfida besi lebih protektif daripada yang lain. Namun, lapisan (FeS) ini dapat pecah karena berbagai alasan dan memaparkan logam polos ke media berair agresif yang menyebabkan korosi *pitting* (Obeyesekere, 2017).

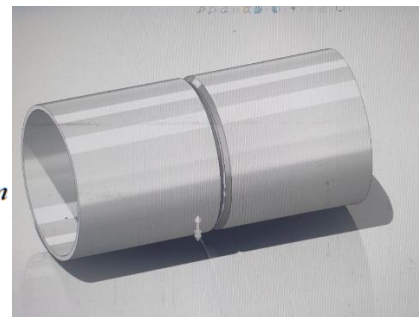
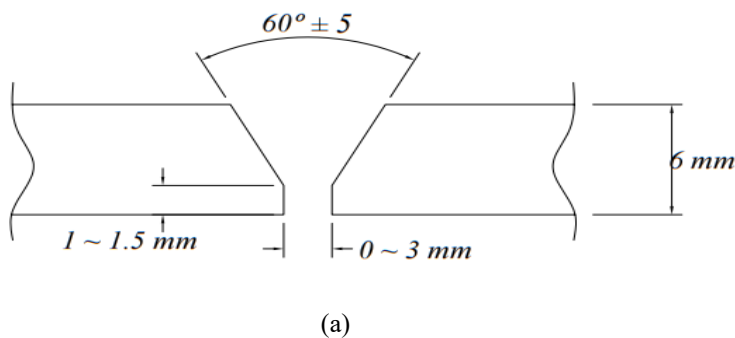
Dalam standart ASTM G46 (2012) pits atau lubang dapat memiliki berbagai ukuran dan bentuk. Pemeriksaan visual pada permukaan logam dapat memperlihatkan lubang yang bundar, memanjang, atau tidak beraturan, tetapi jarang memberikan indikasi akurat adanya korosi di bawah permukaan. Jadi, sering kali diperlukan untuk membuat penampang *pits* atau lubang untuk melihat bentuk sebenarnya dan menentukan kedalaman sebenarnya. Beberapa variasi bentuk penampang *pits* atau lubang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Variasi bentuk penampang pits (ASTM G46, 2012)

3. Metode

Bahan atau material yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah pipa *Stainless Steel SA 312 Grade 304* dengan desain *Butt joint Single V Groove*. Proses pengelasan pada spesimen material menggunakan jenis las GTAW dengan menggunakan filer logam ER 308L. Parameter yang dilakukan pada proses pengelasan ini mengacu pada *Welding Procedure Specification* (WPS) yang dijadikan referensi.



Gambar 4 (a) *Fit up* material pengelasan menggunakan *filler metal* ER 308L (b) Sambungan pipa dengan *single V-Groove*

Pengaplikasian proses *pickling* dilakukan setelah proses pengelasan dilakukan, penerapan metode *pickling* dilakukan dengan menggunakan larutan HNO_3 dan HF dengan cara hasil pengelasan direndam ke dalam larutan tersebut. Proses ini menggunakan variasi konsentrasi larutan dan lama waktu *pickling* pada spesimen. Mekanisme pengaplikasian variasi diatas terhadap spesimen uji ditunjukkan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4 Mekanisme Penerapan Metode *Pickling*

<i>Filler Metal</i>	Kode Spesimen	Konsentrasi Larutan HNO ₃ + HF	Lama Waktu <i>Pickling</i>
ER 308L	X	Tanpa proses pickling	Tanpa proses pickling
	A1	HNO ₃ , 15% + HF 4%	5 menit
	A2	HNO ₃ , 15% + HF 4%	15 menit
	A3	HNO ₃ , 15% + HF 4%	25 menit
	A4	HNO ₃ , 15% + HF 4%	35 menit
	B1	HNO ₃ , 20% + HF 4%	5 menit
	B2	HNO ₃ , 20% + HF 4%	15 menit
	B3	HNO ₃ , 20% + HF 4%	25 menit
	B4	HNO ₃ , 20% + HF 4%	35 menit
	C1	HNO ₃ , 25% + HF 4%	5 menit
	C2	HNO ₃ , 25% + HF 4%	15 menit
	C3	HNO ₃ , 25% + HF 4%	25 menit
	C4	HNO ₃ , 25% + HF 4%	35 menit

Pengujian *Pitting Corrosion* menggunakan metode A dalam standart ASTM G 48 yaitu tentang “*Ferric Chloride Pitting Test*”. Sebelum melakukan pengujian *pitting corrosion* dengan merendam spesimen ke dalam larutan *ferric chloride* selama 72 jam. Spesimen dibentuk dengan dimensi 28 mm x 25 mm x 6 mm. Dari hasil pengujian yang akan dilakukan maka selanjutnya dapat dilakukan analisa dan pembahasan sesuai dengan *standard* atau *code* yang digunakan, sehingga hasil dari analisis tersebut dapat menjawab permasalahan yang dirumuskan pada penelitian ini.

4. Hasil dan Pembahasan

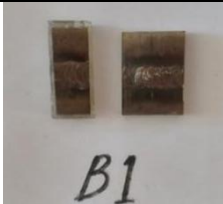
Hasil pengujian spesimen dari beberapa variasi konsentrasi larutan proses *pickling* yaitu, variasi *pickling* 1 dengan konsentrasi HNO₃ 15% + HF 4%, variasi *pickling* 2 dengan konsentrasi HNO₃ 20% + HF 4%, dan variasi *pickling* 3 dengan konsentrasi HNO₃ 25% + HF 4%. Tabel 5 berikut menjelaskan hasil proses *pickling* variasi HNO₃ 15% + HF 4%.

Tabel 5 Spesimen Hasil Proses *Pickling* Variasi HNO₃ 15% + HF4%

Kode	Lama <i>Pickling</i>	Sebelum	Sesudah
A1	35 Menit		
A2	25 Menit		
A3	15 Menit		
A4	5 Menit		

Tabel 5 di atas merupakan hasil permukaan spesimen dari proses *pickling* variasi 1 dengan konsentrasi HNO₃ 15% + HF 4% dan variasi lama waktu *pickling* 35, 25, 15, dan 5 menit diatas mempunyai tingkat kebersihan lapisan oksida yang berbeda, dimana hasil *pickling* spesimen A1 (35 menit) nampak lebih bersih daripada spesimen dengan lama waktu *pickling* lainnya. *Densitas pitting* atau jumlah lubang korosi (*pits*) per satuan luas yang terbentuk rendah atau hampir tidak ada.

Tabel 6 Spesimen Hasil Proses *Pickling* Variasi HNO₃ 20% + HF 4%

Kode	Lama <i>Pickling</i>	Sebelum <i>Pickling</i>	Setelah <i>Pickling</i>
B1	35 Menit		
B2	25 Menit		
B3	15 Menit		
B4	5 Menit		

Tabel 6 di atas merupakan hasil permukaan spesimen dari proses *pickling* variasi 1 dengan konsentrasi HNO₃ 20% + HF 4% dan variasi lama waktu *pickling* 35, 25, 15, dan 5 menit diatas mempunyai tingkat kebersihan lapisan oksida yang berbeda, dimana hasil permukaan *pickling* spesimen B4 (5 menit) nampak lebih bersih daripada permukaan spesimen dengan lama waktu *pickling* lainnya. Densitas pitting atau jumlah lubang korosi (*pits*) per satuan luas yang terbentuk rendah atau hampir tidak ada.

Hasil dari proses *pickling* dengan variasi HNO₃ 25% + HF 4% pada spesimen hasil pengelasan terdapat pada Tabel 7 sebagai berikut.

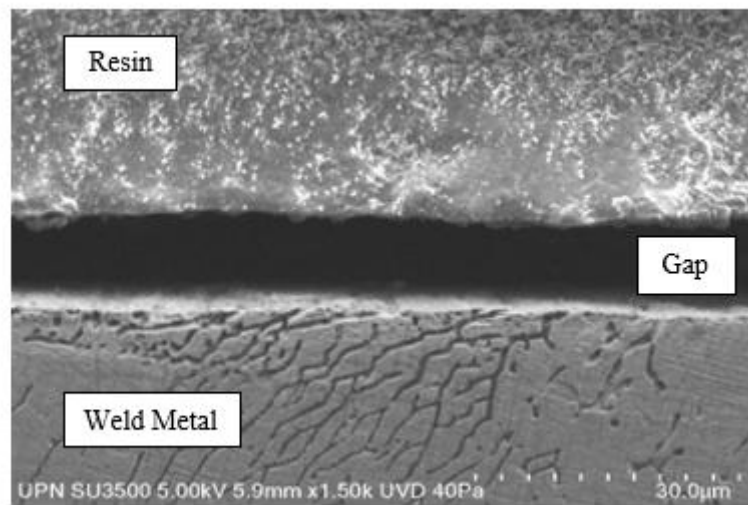
Tabel 7 Spesimen Hasil Proses *Pickling* Variasi HNO₃ 25% + HF 4%

Kode	Lama <i>Pickling</i>	Sebelum <i>Pickling</i>	Setelah <i>Pickling</i>
C1	35 Menit		
C2	25 Menit		
C3	15 Menit		
C4	5 Menit		

Tabel 7 di atas merupakan hasil permukaan spesimen dari proses *pickling* variasi 1 dengan konsentrasi HNO₃ 15% + HF 4% dan variasi lama waktu *pickling* 35, 25, 15, dan 5 menit diatas mempunyai tingkat kebersihan lapisan oksida yang berbeda, dimana hasil permukaan *pickling* spesimen C4 (5 menit) nampak lebih merata daripada permukaan spesimen dengan lama waktu *pickling* lainnya. Hasil pengujian pitting corrosion dapat disimpulkan bahwa semakin rendah konsentrasi HNO₃ dan semakin lama waktu picklingnya, maka semakin rendah nilai densitas pitingnya (spesimen A1).

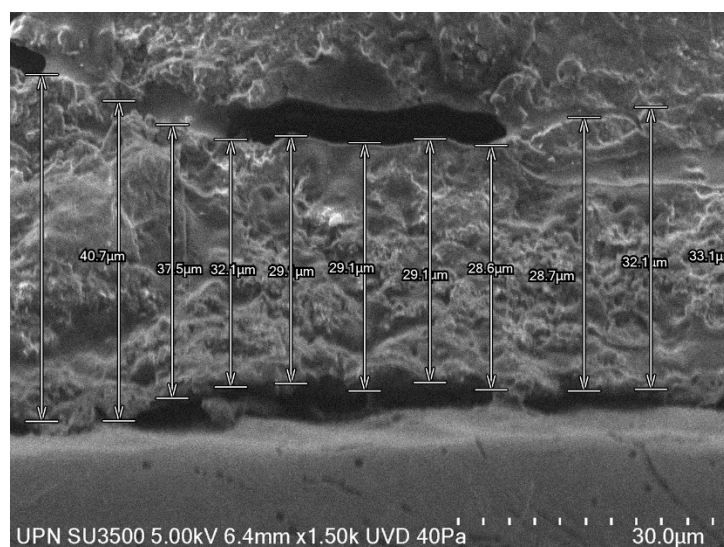
Pengujian morfologi kondisi permukaan material dilakukan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) yang bertujuan untuk mengamati morfologi dan struktur lapisan oksida yang terbentuk pada spesimen yang telah dilakukan pengujian makro sebelumnya.

Hasil gambar dari pengujian menggunakan SEM dengan tipe *Secondary Electron* (SE) untuk morfologi permukaan dan *Backscattered Electron* (BSE) untuk kontras material pada spesimen tanpa proses *pickling* (X) dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5 Hasil SEM Spesimen X Perbesaran 1500× BSE

Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 5 di atas dapat diketahui morfologi permukaan pada spesimen yang tidak mengalami proses *pickling* terlihat lebih halus karena masih dilapisi oleh lapisan oksida alami yang terbentuk selama proses produksi maupun penyimpanan. Lapisan ini belum mengalami pelarutan secara kimia, sehingga secara keseluruhan memberikan kesan permukaan yang rata, tanpa menunjukkan tekstur kasar, pori-pori, ataupun tonjolan. Akan tetapi, lapisan oksida alami umumnya tidak sepenuhnya seragam dan mengandung cacat mikro, inklusi, serta kontaminan yang dapat menjadi titik lemah (Peng et al., 2020). Pembentukan lapisan pasif secara alami juga memungkinkan pembentukan lapisan oksida pasif baru yang tidak homogen dan tipis dengan unsur dominan yang terbentuk adalah Fe_2O_3 dan Fe_3O_4 yang terbentuk dari oksidasi besi pada suhu tinggi dan bersifat rapuh, kurang protektif, dan mudah retak sehingga menjadi titik awal korosi pitting (Olsson., 2003).



Gambar 6 Hasil SEM Spesimen Dengan Proses *Pickling* A1 Perbesaran 1500× BSE

Hasil pengujian SEM tersebut menunjukkan morfologi permukaan material setelah melalui proses *pickling*. Berdasarkan pengukuran, ketebalan lapisan berada pada rentang ~28,6 μm hingga 40,7 μm . Variasi ini menunjukkan ketidakseragaman pelarutan lapisan akibat reaksi kimia saat *pickling*. Terlihat jelas permukaan dengan tekstur berongga, retakan kecil, serta adanya *void* (lubang hitam pada bagian tengah). Hal ini disebabkan oleh proses pelarutan oksida dan kontaminan permukaan sehingga menghasilkan topografi yang lebih kasar. Rongga hitam pada lapisan mengindikasikan terbentuknya porositas akibat pelepasan oksida atau inklusi yang terlarut. Hal ini umum terjadi setelah *pickling* karena senyawa permukaan terdisolusi meninggalkan celah.

Pada penelitian L.-F. Li dan J.-P. Celis membandingkan tebal lapisan oksida dengan variasi proses *annealing*, proses *pickling* dengan menggunakan larutan Na_2SO_4 , dan proses *pickling* dengan menggunakan larutan $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ atau larutan pengganti yang ramah lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan proses *annealing* menghasilkan ketebalan lapisan oksida paling tinggi namun proses *pickling* dengan larutan $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ mampu membersihkan material dari kontaminan dengan sangat baik dan mampu membentuk lapisan pasif sehingga dapat menghindari risiko *intergranular corrosion* setelah *pickling* (Celis, 2003).

5. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi konsentrasi larutan $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ serta lama waktu *pickling* memberikan pengaruh signifikan terhadap kebersihan permukaan dan ketahanan *pitting corrosion* pada sambungan las SA-312 *Grade* 304. Hasil paling baik adalah spesimen A1 yaitu dengan konsentrasi HNO_3 15% dan HF 4% serta lama waktu 5 menit. Semakin rendah konsentrasi HNO_3 dan semakin lama waktu *pickling*nya, maka semakin rendah nilai densitas pitingnya. Hasil observasi morfologi menggunakan SEM mengindikasikan bahwa proses *pickling* mampu mengikis lapisan oksida dan menghasilkan permukaan yang lebih bersih, meskipun dengan ketebalan lapisan dan tingkat porositas yang bervariasi. Uji ketahanan korosi *pitting* berdasarkan ASTM G48 mengkonfirmasi bahwa parameter *pickling* yang tepat dapat meningkatkan ketahanan korosi, sedangkan kondisi *over-pickling* berpotensi menurunkan sifat protektif permukaan. Dengan demikian, optimasi konsentrasi larutan dan waktu *pickling* menjadi kunci dalam meningkatkan kualitas hasil las *stainless steel* austenitik, khususnya untuk aplikasi di lingkungan korosif.

Daftar Pustaka

- A.9/A5.9M, A. (2022). Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods. ASME, BPVC, Section II, Part C, (2013).
- ASTM. (2012). ASTM G46-94(Reapproved 2013) Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. In Astm G46-94 (Vol. 12, Issue 1, pp. 53–58).
- ASTM A380/A380M-13. (2015). Standard Practice for Cleaning , Descaling , and Passivation of Stainless Steel Parts , Equipment , and Systems. ASTM Copyright., C, 1–13. <https://doi.org/10.1520/A0380>
- ASTM G48. (2020). G48 Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless. ASTM International, 11(December), 1–11. <https://doi.org/10.1520/G0048-11.responsibility>

- AWS-ED9-Vol4. (1991). Welding Handbook-AWS-ED9-Vol4-Materials and applications-Pt 1. In AWS-ED9-Vol4 (Vol. 4, p. 982).
- Li, L. F., & Celis, J. P. (2003). *Pickling of austenitic stainless steels (a review)*. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 42(3), 365–376. <https://doi.org/10.1179/cmqr.2003.42.3.365>
- Hilton Siahaan, S. (2021). Kajian Laju Korosi Terhadap Stainless Steel Dalam Larutan Hno₃. *Jurnal Ilmiah Teknik Dan Manajemen Industri*, 1(1), 108–133. <https://doi.org/10.46306/tgc.v1i1.9>
- Ilman, M. N. (2024). Ilmu dan Teknologi Pengelasan. UGM PRESS.
- Obeyesekere, N. U. (2017). Pitting corrosion. In *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00009-7>
- Olsson, C. O. A., & Landolt, D. (2003). Passive films on stainless steels - Chemistry, structure and growth. *Electrochimica Acta*, 48(9 SPEC.), 1093–1104. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00841-1](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00841-1)
- Pantelis, D. I., & Tsiourva, T. E. (2017). Corrosion of weldments. In *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00010-3>
- Shi, P; Shi, H; Liu, C; & Jiang, M. (2017). Effect of pickling process on removal of oxide layer on the surface of ferritic stainless steel, *Canadian Metallurgical Quarterly*.pdf (p. 9). <https://doi.org/10.1080/00084433.2017.1405540>
- Sun, YT; Tan, X; Lei, L. (2021). Revisiting the effect of molybdenum on pitting resistance of stainless steels. 3, 329–337.