

## ULASAN: METODE PENGUJIAN LAJU KOROSI PADA MATERIAL BAJA KARBON

Sri Pudjiwati<sup>a\*</sup>, Hadi Pranoto<sup>b</sup>, I Gusti Ayu Arwati<sup>c</sup>

Magister Teknik Mesin, Teknik, Universitas Mercubuana Jakarta

\*Email Korespondensi: [pudjiwati@gmail.com](mailto:pudjiwati@gmail.com)

[Phone: 0852 2191 9978](tel:085221919978)

**Abstrak.** Valve merupakan komponen vital dalam industri migas untuk mengatur aliran fluida minyak dan gas. Pemilihan material untuk body valve sangat penting karena bagian closure valve rentan terhadap korosi, terutama saat pengujian hidrotetest. Kasus korosi pada bagian closure valve type trunnion terjadi di PT. XYZ setelah pengujian hidrotetest dan penyimpanan di gudang. Korosi, yang disebabkan reaksi kimia antara logam dan lingkungan, dapat menimbulkan kerugian finansial signifikan. Faktor-faktor seperti komposisi kimia material, suhu, tekanan, dan inhibitor turut mempengaruhi laju korosi. Studi ini bertujuan membandingkan metode pengujian laju korosi berdasarkan literatur. Metodologi yang digunakan meliputi Metode pengujian berat hilang (*weight loss method*) yang mengukur laju korosi dengan mengamati perubahan berat material, Metode pengujian elektrokimia yang mempelajari laju korosi melalui reaksi elektrokimia, dan Metode mikroskopi yang menganalisis struktur permukaan material secara mikroskopis. Hasil penelitian sebelumnya tentang korosi pada material seperti baja karbon AISI 1065, pipa ASTM A105, baja karbon rendah, sambungan las logam, dan baja JIS G-3141, menunjukkan terdapat variasi laju korosi dan faktor-faktor yang mempengaruhinya, seperti penggunaan inhibitor dan kondisi lingkungan. Perbandingan metode menunjukkan bahwa Metode pengujian elektrokimia memberikan hasil yang cepat, sensitif, dan komprehensif, menjadikannya metode yang efektif untuk aplikasi industri dan penelitian lanjutan. Kesimpulannya, faktor lingkungan, komposisi material, dan metode pengujian sangat mempengaruhi laju korosi. Penggunaan inhibitor dan teknik perlindungan lainnya efektif dalam mengurangi laju korosi dan memperpanjang umur material. Penelitian ini menyarankan penggunaan metode elektrokimia sebagai metode terbaik untuk mengetahui laju korosi pada closure valve di PT. XYZ yang terbuat dari material ASTM A105N.

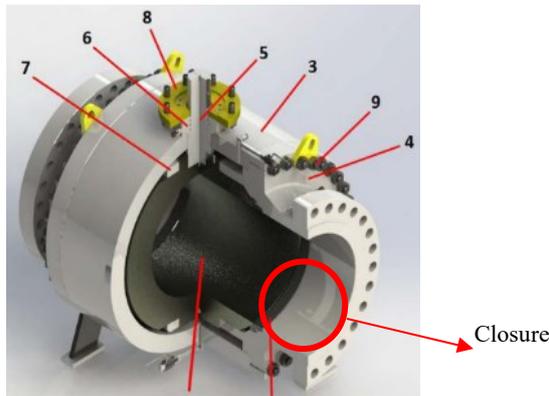
**Kata kunci:** Korosi, Laju Korosi, Baja Karbon

---

### 1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur katup memegang posisi penting di sektor-sektor seperti minyak dan gas, kimia, dan pasokan air, karena banyak digunakan di berbagai industri karena kontrolnya yang andal atas aliran fluida. PT. XYZ merupakan perusahaan domestik energi terkemuka di Banten yang bergerak di sektor manufaktur katup minyak dan gas yang didirikan pada tahun 2015. Namun, masalah penting telah diamati di PT. XYZ, khususnya di divisi katup, di mana kualitas produk telah terganggu karena korosi tepat sebelum pengiriman. Aprianto, anggota staf teknik (2024), menjelaskan bahwa komponen penutup katup rentan terhadap korosi selama uji kebocoran hidrotetest, yang dapat dikaitkan dengan kesenjangan waktu antara pengujian dan pengiriman. Fokus utama dalam sistem industri adalah komponen seperti *Ball valve*, *Valve Actuator*, dan *Valve Closure*.

Seperti diketahui, *valve* atau biasa disebut katup merupakan alat yang berperan penting dalam industri migas, yaitu untuk mengontrol jumlah aliran fluida minyak dan gas[1]. Komponen-komponen ini memiliki peran yang sangat penting dalam mengatur aliran fluida. *Ball valve* adalah salah satu komponen yang banyak digunakan di berbagai industri karena keandalannya dalam mengendalikan aliran fluida. Saat merancang valve, kita harus memperhatikan material yang digunakan untuk pembuatan *body valve*. Hal ini dikarenakan bagian *closure* pada *valve* rentan terhadap korosi saat dilakukan pengujian kebocoran hidrotetest. Dalam perancangan valve kita harus memperhatikan material yang digunakan untuk pembuatan *body valve*, karena pada bagian *closure valve* rentan terjadi korosi pada saat dilakukan pengujian kebocoran hidrotetest. Berikut gambar dari valve dan closure valve[2]:



**Gambar 1:** *Trunnion Ball Valve*

Sumber: Ivancu et.all (2022)



**Gambar 2:** *Closure Valve*

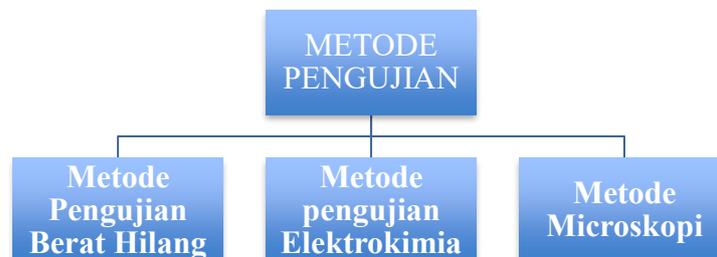
Sumber: PT. XYZ (2024)

Kasus ini terjadi di PT.XYZ dimana valve yang telah diberikan perlakuan pengujian hydrotest kemudian disimpan di gudang sebelum pengiriman mengalami korosi pada bagian closure pada tipe *valve trunnion*[3]. Korosi merujuk pada kerusakan logam yang disebabkan oleh reaksi kimia antara logam dan unsur lain dalam lingkungan sekitarnya, hal ini terjadi karena logam biasanya terpapar udara terbuka di mana kelembaban dan polutan dapat mempengaruhi korosi logam[4]. Korosi berpotensi mengakibatkan kemunduran finansial yang besar bagi industri, sehingga menjadikannya sebagai masalah umum yang mempengaruhi seluruh industri[5]. Dalam merancang produk yang menggunakan logam, perhatian terhadap lingkungan yang beragam merupakan faktor penting yang harus diperhatikan. Perencanaan produk untuk lingkungan asam akan berbeda dengan perencanaan untuk lingkungan basa. Selain tingkat keasaman, terdapat beberapa faktor lain yang memengaruhi proses korosi, seperti suhu lingkungan dan ketersediaan oksigen di lingkungan tersebut. Peningkatan suhu menyebabkan proses reaksi semakin cepat sehingga mengakibatkan semakin cepatnya laju korosi pada bagian bawah baja karbon.[6]

Dalam industri manufaktur, pemahaman yang mendalam tentang laju korosi pada material tertentu menjadi sangat penting untuk memastikan keandalan dan kinerja yang optimal dari komponen mesin. Penelitian ini difokuskan pada analisis metode pengujian korosi yang tepat pada komponen *Valve Closure*, terutama dalam hal pemilihan material. Material yang sering digunakan adalah baja karbon ASTM A105N, karena telah terbukti memiliki kekuatan dan ketangguhan yang baik, dimana material baja karbon tempa ini yang banyak digunakan dalam aplikasi tekanan dan suhu tinggi.[7]

Beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya bahwa korosi tidak hanya terjadi sebagai akibat dari interaksi langsung dengan lingkungan yang korosif, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti komposisi kimia material, suhu, tekanan, dan keberadaan inhibitor, serta memberikan kontribusi penting dalam memperluas pemahaman kita tentang korosi dan mengembangkan strategi perlindungan yang lebih efektif. Selain itu, tujuan khusus dari review jurnal ini adalah membandingkan metode pengujian laju korosi berdasarkan studi literatur yang sudah ada.

## 2. METODE DAN BAHAN



**Gambar 3:** Metode Pengujian

### 2.1 Metode Pengujian Berat Hilang (Weight Loss Method)

#### 2.1.1 *Weight Loss Method* (Kehilangan Berat)

Pengujian Berat Hilang (*Loss Weight Method*) adalah metode sederhana yang mengukur perbedaan berat sampel baja karbon sebelum dan setelah dipaparkan dalam lingkungan korosif. Laju korosi dihitung berdasarkan berat yang hilang, memberikan gambaran umum tentang tingkat korosi yang terjadi. Menurut Fontana (1986), metode *Weight Loss* adalah salah satu metode klasik dan paling sederhana untuk mengukur korosi[8]. Metode ini melibatkan pengukuran berat sampel sebelum dan sesudah periode eksposur terhadap lingkungan korosif. Metode penurunan berat merupakan perhitungan kecepatan yang mengandalkan pengukuran penurunan berat akibat korosi[9]. Berikut adalah langkah metode penurunan berat:

- 1) Menimbang Sampel Awal: Timbang berat sampel logam yang akan diuji ( $W_1$ ).
- 2) Eksposur: Tempatkan sampel dalam lingkungan korosif untuk jangka waktu tertentu.
- 3) Pembersihan: Setelah periode eksposur, bersihkan sampel untuk menghilangkan produk korosi tanpa menghilangkan logam dasar.
- 4) Menimbang Sampel Akhir: Timbang kembali sampel ( $W_2$ ).
- 5) Penghitungan Kehilangan Berat:

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (1)$$

$$\text{Laju Korosi} = \frac{\Delta W}{A \times t} \quad (2)$$

Dimana :  $\Delta W$  adalah kehilangan berat.  
 $A$  adalah luas permukaan sampel.  
 $t$  adalah waktu eksposur.

### 2.1.2 Laju Korosi

ASTM (American Society Testing and Materials) International [10], memberikan pedoman penentuan laju korosi dengan metode ini, yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$CR (mpy) = \frac{534 \cdot W}{\rho \cdot A \cdot t} \quad (3)$$

$$\text{atau } CR (mpy) = \frac{W \cdot K}{\rho \cdot A \cdot t} \quad (4)$$

Dimana :  $K$  adalah faktor konversi ( $K = 87600$  untuk mpy,  $K = 8.76$  untuk mm/y).  
 $W$  adalah kehilangan berat (gram).  
 $\rho$  adalah densitas material ( $\text{g/cm}^3$ ).  
 $A$  adalah luas permukaan ( $\text{cm}^2$ ).  
 $t$  adalah waktu eksposur (jam).

### 2.1.3 Life Time Korosi

*Life Time* Korosi adalah perkiraan umur suatu material sebelum mengalami kegagalan yang signifikan akibat korosi. Ini dihitung berdasarkan laju korosi dan ketebalan material awal. *Lifetime corrosion* mengacu pada periode waktu di mana suatu material, seperti baja karbon, dapat bertahan sebelum mengalami kerusakan signifikan akibat korosi. Menentukan *lifetime corrosion* penting untuk memastikan keandalan dan keselamatan struktur atau komponen selama penggunaannya. Dengan menggunakan standar API 570 (*American Petroleum Institute*) dalam Arninda, A (2021) untuk menghitung umur suatu material, khususnya logam, umur tersebut ditentukan dengan menilai efek korosi[5]. Hal ini melibatkan pengurangan ketebalan dinding minimum dari ketebalan dinding maksimum material dan kemudian membaginya dengan laju korosi.

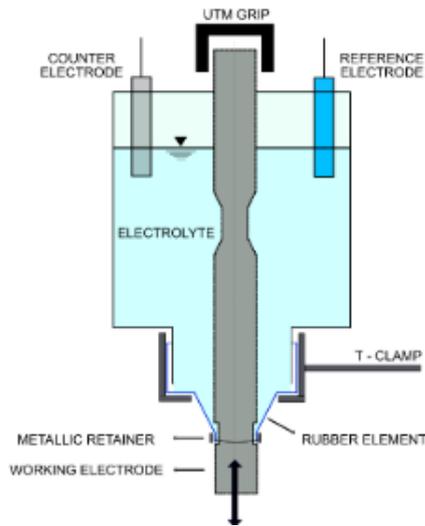
$$LT = \frac{T_{ac} - T_m}{CR} \quad (5)$$

$$LT = \frac{T}{CR} \quad (6)$$

Dimana :  $LT$  adalah *Life Time (years)*  
 $T_{ac}$  adalah *Thickness Actual (mm)*  
 $T_m$  adalah *Thickness Minimum (mm)*  
 $CR$  adalah *Corrosion Rate (mm/y)*  
 $T$  adalah *Tebal Awal Material (mm)*

## 2.2 Metode Pengujian Elektrokimia

Metode Pengujian Elektrokimia adalah serangkaian teknik yang digunakan untuk mengukur dan mempelajari laju serta mekanisme korosi pada material melalui reaksi elektrokimia yang terjadi di permukaan material tersebut. Pengujian elektrokimia (*Electrochemical Method*) merupakan metode yang lebih canggih dan memberikan informasi lebih mendalam tentang proses korosi. Metode ini melibatkan pengukuran potensial elektroda atau arus yang terkait dengan reaksi korosi pada permukaan baja karbon, yaitu pengukuran arus dan potensial listrik yang dihasilkan selama proses korosi. Metode elektrokimia didasarkan pada reaksi oksidasi dan reduksi yang terjadi pada permukaan material yang mengalami korosi. Reaksi ini menghasilkan arus listrik yang dapat diukur dan dianalisis untuk menentukan laju korosi dan mekanisme yang terlibat. Berikut adalah gambar pengujian Elektrokimia[11]:



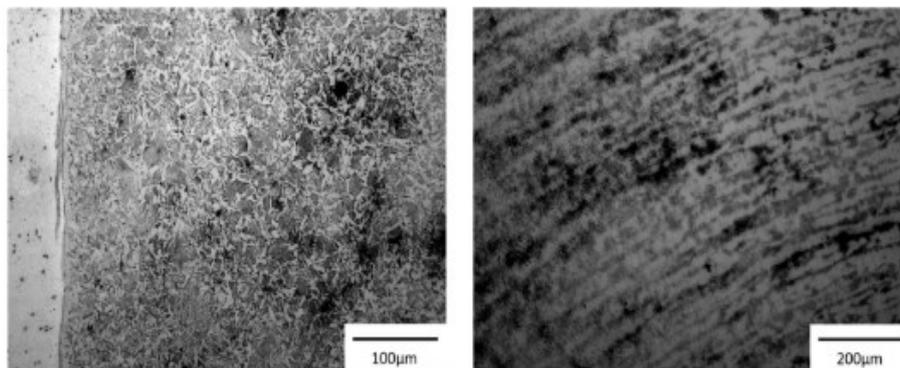
**Gambar 1:** Pengujian elektrokimia  
Sumber: Rossi at.al (2020)



**Gambar 5:** Pengujian elektrokimia  
Sumber: Review Penelitian 2024

## 2.3 Metode Mikroskopi

Metode Mikroskopi adalah teknik yang digunakan untuk mengamati dan menganalisis struktur permukaan dan morfologi material pada skala mikroskopis dan sub-mikroskopis. Pengujian Mikroskopi (*Microscopic Method*) melibatkan pemeriksaan permukaan baja karbon yang telah terkorosi menggunakan mikroskop, seperti *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Metode ini memberikan gambaran visual detail tentang pola dan mekanisme korosi pada tingkat mikro, meskipun tidak memberikan data kuantitatif tentang laju korosi. Dengan kemampuan untuk memvisualisasikan dan menganalisis permukaan serta struktur internal logam, mikroskopi membantu dalam pengembangan strategi perlindungan korosi yang lebih efektif, meningkatkan kinerja dan umur panjang material logam dalam aplikasi industri. Mikroskopi memungkinkan visualisasi langsung dari permukaan material yang terkorosi, membantu mengidentifikasi jenis korosi, struktur produk korosi, dan mekanisme kerusakan. Dengan memperbesar permukaan sampel, kita bisa melihat detail yang tidak terlihat dengan mata telanjang. Berikut adalah gambar pengujian Mikroskopi[11]:



**Gambar 6:** Hasil Pengujian Mikroskopi  
Sumber: Rossi at.al (2020)

### 3. HASIL DAN DISKUSI

#### 3.1 Review Hasil Penelitian

##### 3.1.1 Penelitian Amri Abdulah, Solehudin, A. & Nugraha, H. tentang Analisa Dampak Laju Korosi Terhadap Kekuatan Oven Wire Belt (Baja Karbon AISI 1065) tahun 2019

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji adanya korosi pada *belt conveyor* baja karbon AISI 1065, khususnya *oven wire belt* yang digunakan pada tunnel baking oven untuk memanggang adonan biskuit. Analisanya meliputi melakukan uji penurunan berat pada sampel uji, mengukur diameter kawat sabuk oven (*oven wire belt*), menentukan tegangan operasi, dan menghitung kekuatan tarik, tegangan geser, dan regangan.[12]

**Tabel 1:** Hasil Pengujian *Weight Loss*

SAMPEL UJI	BERAT (GR)			DIAMETER (MM)			KETERANGAN
	AWAL	AKHIR	$\Delta W$	AWAL	AKHIR	$\Delta D$	
1	1,89	1,86	0,003	1,5	1,48	0,02	Bintik coklat
2	1,9	1,89	0,01	1,5	1,47	0,03	Bintik coklat
3	1,86	1,84	0,02	1,5	1,47	0,03	Bintik coklat
4	1,88	1,85	0,03	1,5	1,46	0,04	Bintik coklat
5	1,9	1,85	0,05	1,5	1,48	0,02	Bintik coklat
6	1,87	1,86	0,02	1,5	1,47	0,03	Bintik coklat
7	1,89	1,88	0,01	1,5	1,48	0,02	Bintik coklat
8	1,93	1,86	0,07	1,5	1,46	0,04	Bintik coklat
9	1,86	1,83	0,03	1,5	1,48	0,02	Bintik coklat
10	1,86	1,84	0,02	1,5	1,47	0,03	Bintik coklat
Rata-rata	1,884	1,855	0,029	1,5	1,472	0,028	

Sumber: Amrih et.al (2019)

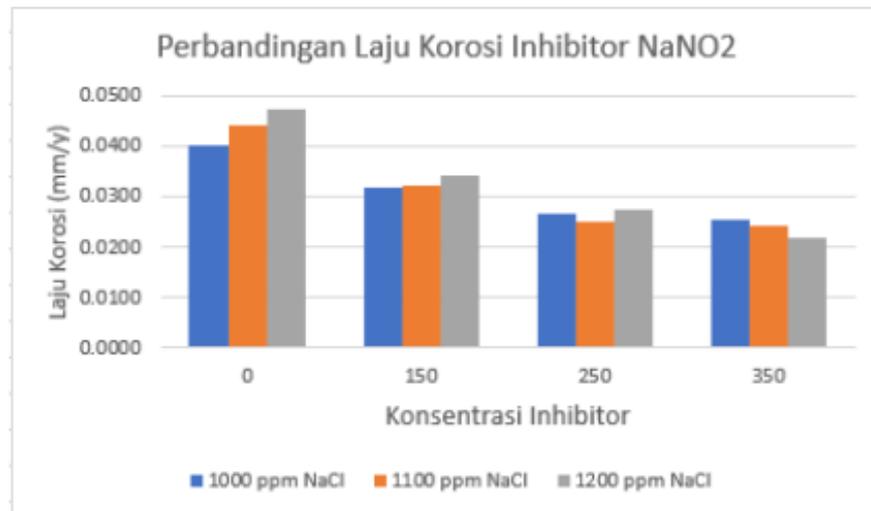
Setelah menganalisis data pengujian, ditentukan bahwa laju korosi rata-rata sampel uji, yang ditunjukkan oleh penurunan berat, adalah 0,0366 mpy. Selain itu, rata-rata pengurangan diameter diukur sebesar 0,349 mpy. Laju korosi berdampak langsung terhadap tegangan operasi yang awalnya sebesar  $3,20 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  namun meningkat menjadi  $3,33 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  setelah terjadi korosi. Akibatnya terjadi penurunan kekuatan tarik sehingga terjadi penurunan berat sebesar  $160,905 \text{ N/m}^2$ . Tegangan gesernya juga mengalami penurunan sebesar  $1,04 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ . Selain itu, pengurangan penampang menyebabkan peningkatan regangan, dengan pitch awal meluas dari 8,5 mm menjadi 9,45 mm dan persentase elongasi naik dari 8% menjadi 9,96 %.

Dapat disimpulkan korosi bahan *oven wire belt* baja karbon AISI 1065 disebabkan oleh faktor lingkungan dan bahan yang ada dalam adonan kue selama proses pemanggangan. Melalui uji penurunan berat yang dilakukan terhadap 10 sampel, terlihat rata-rata laju korosi baja karbon AISI 1065 mengalami peningkatan sehingga menyebabkan penurunan diameter. Penurunan diameter ini selanjutnya mengakibatkan penurunan kekuatan tarik dan penampang material, sehingga pada akhirnya menyebabkan peningkatan nilai regangan.

##### 3.1.2 Penelitian Adistantria Mariami, T., Antoko, B. & Soim, S. tentang Analisis Laju Korosi dan Lifetime Pipa ASTM A105 dengan Perbandingan Inhibitor $\text{NaNO}_2$ dan $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ tahun 2019.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui laju korosi, efisiensi inhibitor, dan umur material ASTM A105 dengan membandingkan efektivitas inhibitor  $\text{NaNO}_2$  dan  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ . Metode penurunan berat badan, metode perendaman, dan metode pengujian digunakan untuk menentukan laju korosi dan umur pipa ASTM A105. Ini melibatkan penghitungan penurunan berat badan dan membandingkan kinerja inhibitor  $\text{NaNO}_2$  dan  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ . Percobaan ini melibatkan pemberian berbagai konsentrasi  $\text{NaCl}$  pada pipa, khususnya 1000 ppm, 1100 ppm, dan 1200 ppm. Selain itu, konsentrasi inhibitor divariasikan pada 0 ppm, 150 ppm, 250 ppm, dan 350 ppm.

Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa inhibitor yang paling efektif untuk pencegahan korosi pada material ASTM A105 adalah inhibitor  $\text{NaNO}_2$  konsentrasi 350 ppm dalam konsentrat  $\text{NaCl}$  1200 ppm. Inhibitor ini menunjukkan laju korosi terendah, yaitu 0,021817 mm/y. Sebagai perbandingan, inhibitor  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$  memiliki laju korosi yang sedikit lebih tinggi yaitu 0,023999 mm/y. Efisiensi inhibitor tertinggi juga terdapat pada inhibitor  $\text{NaNO}_2$  yaitu sebesar 0,537%. Selain itu, sisa umur inhibitor  $\text{NaNO}_2$  dihitung 150,73 tahun, sedangkan inhibitor  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$  memiliki sisa umur 137,37 tahun. Berdasarkan temuan tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode yang paling efektif untuk mencegah korosi pada material ASTM A105 adalah dengan menggunakan inhibitor  $\text{NaNO}_2$  karena laju korosinya yang rendah dan masa pakai yang lebih lama.[13]. Berikut adalah grafik perbandingan laju korosi:



**Gambar 7:** Grafik Perbandingan Laju Korosi NaNO<sub>2</sub>  
 Sumber: Mariami. A et.al (2019)

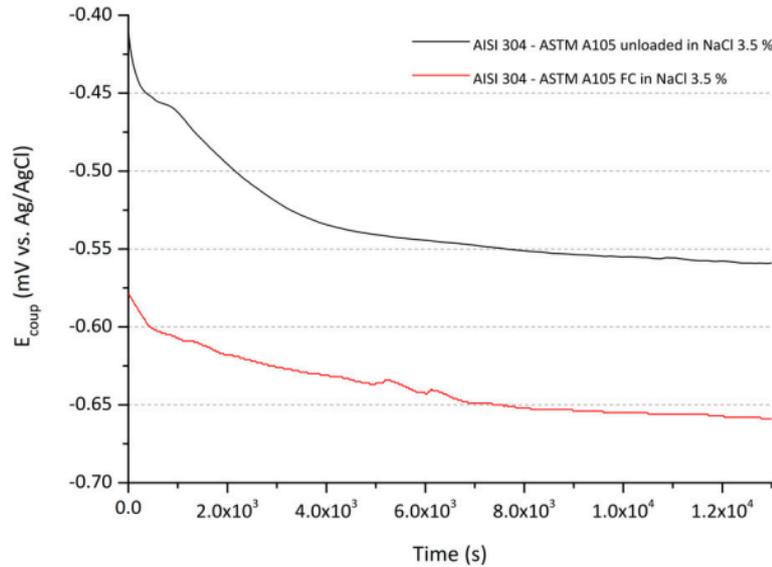
### 3.1.3 Penelitian Kusumawati, E. D. & Fahriani, V. P. tentang Studi Baja Karbon Rendah Terhadap Laju Korosi tahun 2024.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi korosi dan mengukur laju korosi pada baja karbon rendah. Metode yang digunakan meliputi tinjauan literatur dengan mengumpulkan data dari berbagai jurnal yang diterbitkan, analisis elektrokimia, dan tes penurunan berat badan. Temuan menunjukkan bahwa penggunaan inhibitor dapat menurunkan laju korosi sebesar 20%. Ketika konsentrasi HCl ditingkatkan menjadi 10%, efektivitas inhibitor mencapai 31%. Pada konsentrasi HCl maksimum 15%, inhibitor kalium kromat dapat menurunkan laju korosi sekitar 36%. Temperatur yang lebih tinggi mempercepat reaksi, menyebabkan peningkatan laju korosi pada baja karbon. Uji laju korosi pada baja ringan dilakukan pada suhu antara 37°C dan 50°C, menghasilkan laju korosi permukaan masing-masing sebesar 5,54, 11,91, dan 14,53 mpy (mil per tahun). Material yang direndam dalam media korosif selama empat minggu dengan lapisan logam berupa cat semprot menunjukkan laju korosi berkisar antara 64.617 hingga 62.881 mpy pada minggu pertama, 45.678 hingga 41.017 mpy pada minggu kedua, dan meningkat menjadi 34.376 mpy pada minggu kedua. 25.043 mpy pada minggu keempat.

Oleh karena itu, tinjauan literatur tentang baja karbon rendah menunjukkan bahwa perilaku korosi dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, komposisi kimia, dan metode pengujian. Lingkungan asam mempercepat korosi, sedangkan lingkungan basa cenderung mengurangnya. Kandungan karbon pada baja karbon rendah juga mempengaruhi tingkat korosinya. Metode pengujian yang berbeda, seperti analisis elektrokimia dan uji penurunan berat badan, menghasilkan data yang bervariasi, sehingga pemilihan metode menjadi penting. Strategi perlindungan korosi industri, termasuk pelapisan permukaan, penggunaan inhibitor, dan pengendalian lingkungan, efektif dalam mengurangi laju korosi pada baja karbon rendah.

### 3.1.4 Penelitian Rossi, S., Russo, F., Lemmi, A. M., Benedetti, M. & Fontanari, V. tentang *Fatigue corrosion behavior of friction welded dissimilar joints in different testing conditions.* tahun 2020.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perilaku korosi kelelahan pada sambungan yang berbeda sambil memanfaatkan pengukuran elektrokimia in situ untuk mengikuti proses korosi kelelahan, dengan menggunakan metode *microscopy and electrochemical techniques*. Berdasarkan pengujian didapat bahwa Penelitian ini menunjukkan bahwa perilaku korosi kelelahan pada sambungan las logam dapat dipelajari dengan peralatan sederhana di lingkungan agresif. Pengaturan buatan sendiri efektif untuk memantau pengujian melalui pengukuran elektrokimia. Perlindungan katodik memperbaiki kelelahan pada stres rendah, sedangkan korosi kelelahan dan aktivasi anodik memperburuk kondisi. Kegagalan terjadi di dekat antarmuka las pada daerah deformasi plastis, bukan di logam induk. Perbedaan kondisi pengujian mempengaruhi mekanisme kerusakan lokal secara signifikan.



**Gambar 8:** Grafik Hasil Uji Lelah pada Material ASTM A105  
 Sumber: Rossi. S et.al (2020)

Dapat disimpulkan perlindungan katodik pada sampel efektif dalam memperbaiki perilaku kelelahannya, khususnya pada nilai tegangan rendah. Sebaliknya, korosi kelelahan atau bahkan aktivasi anodik memperburuk perilaku sampel.

**3.1.5 Penelitian Arwati, I. G. A. & Ifani, F. tentang Corrosion Rate Analysis of JIS G-3141 Steel for Automotive Inner Wheel House Production with Weight Loss Method tahun 2022.**

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh nilai laju korosi dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik serta perubahan nilai komposisi karbon. Dengan mengetahui nilai laju korosi maka produksi untuk industri otomotif dapat dilakukan sebelum terjadi korosi akibat penyimpanan di gudang. Pengukuran laju korosi pada penelitian ini menggunakan metode *Loss Weight, dan Tensile Test*.

Hasil perhitungan data perhitungan laju korosi, pada waktu 720 jam, nilai rata-rata laju korosi baja karbon rendah JIS G-3141 sebesar 0,110 mg cm<sup>-2</sup> jam<sup>-1</sup>, nilai rata-rata laju korosi sampel baja karbon rendah JIS G -3141 pada 2 bulan atau 1440 jam yaitu 0,121 mg cm<sup>-2</sup> jam<sup>-1</sup>. Maka nilai laju korosi pada umur 3 bulan atau 2160 jam sebesar 0,305 mg cm<sup>-2</sup> jam<sup>-1</sup> dan nilai rata-rata laju korosi selama 4 bulan atau 2880 jam sebesar 0,427 mg cm<sup>-2</sup> jam<sup>-1</sup>. Laju korosi baja JIS G-3141 yang disimpan selama 3 bulan tidak mempengaruhi nilai kuat tarik, kuat luluh, dan elongasi. Namun terjadi peningkatan nilai nilai YPEL yang berarti semakin besar selisih perpanjangan benda uji awal dan akhir.

**Tabel 2:** Hasil perhitungan loss weight

SAMPLE	TIME (HOURS)	WEIGH LOSS (MG)	CR (MG CM <sup>-2</sup> JAM <sup>-1</sup> )
A	720	4000	0.132
		3000	0.099
		3000	0.099
B	1440	9000	0.149
		7000	0.116
		6000	0.099
C	2160	82000	0.353
		117000	0.276
		113000	0.287
D	2880	121000	0.471
		123000	0.438
		124000	0.372

Sumber: Arwati, I. G. A et.al (2022)

**Tabel 3:** Hasil perhitungan *tensile test*

SAMPLE	TIME (HOURS)	TENSILE TEST VALUE			
		TS (N/MM <sup>2</sup> )	YS (N/MM <sup>2</sup> )	YPEL (N/MM <sup>2</sup> )	EL (%)
Blank	0	331	208	0,39	45,0
A	720	331	196	0,42	43,8
B	1440	331	206	0,55	42,0
C	2160	331	207	0,53	43,6
D	2880	330	205	0,60	43,0

Sumber: Arwati, I. G. A et.al (2022)

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- Berdasarkan uji penurunan berat badan 720, 1440, 2160 dan 2880 jam, laju korosi tertinggi terdapat pada 2880 jam :  $0,427 \text{ mg cm}^{-2} \text{ jam}^{-1}$  dan terendah pada 720 jam:  $0,110 \text{ mg cm}^{-2} \text{ jam}^{-1}$ .
- Berdasarkan hasil pengujian sifat mekanik baja JIS G 3141 tidak terjadi perubahan pada nilai Tensile Strength, Yield Point dan Elongation yang besar.
- Hasil pengujian SEM-EDS pada baja JIS G-3141 tidak ditemukan adanya perubahan unsur pada 30 hari atau 720 jam dari sebelum perlakuan.

Dengan demikian, penelitian menunjukkan bahwa laju korosi tertinggi terjadi setelah 2880 jam dan terendah setelah 720 jam. Sementara itu, tidak ada perubahan signifikan pada sifat mekanik atau komposisi kimia baja JIS G 3141 setelah perlakuan dan pengujian.

### 3.1.6 Penelitian Arwati, I. G. A. & Sianipar, S. tentang *Corrosion Study of SS316L In Environment Sulphur Acid Using Weight Loss Method* tahun 2018.

Penelitian ini berfokus pada penilaian tingkat korosi SS 316 L dalam asam  $\text{H}_2\text{SO}_4$  melalui metode penurunan berat, dengan memeriksa periode perendaman 1 hari, 3 hari, dan 5 hari dalam lingkungan dengan konsentrasi 0,1 M, 0,3 M, dan 0,5 M. Temuan menunjukkan bahwa laju korosi meningkat dengan konsentrasi  $\text{H}_2\text{SO}_4$  yang lebih tinggi, mencapai laju korosi rata-rata (CR) sebesar  $2,729078 \times 10^{-6} \text{ mpy}$  selama durasi 5 hari. Analisis Mikroskop Elektron Pemindaian (SEM) mengungkap kerusakan morfologi pada SS 316 L, khususnya yang menunjukkan korosi pitting pada permukaan logam.[14]

### 3.1.7 Penelitian Arwati, I. G. A., Majlan, E.H., Alva, S., & Muhammad, W. tentang *Effect of Chitosan on the Corrosion Inhibition for Aluminium Alloy in $\text{H}_2\text{SO}_4$ Medium* tahun 2022.

Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi laju korosi pada Aluminium AA5052 yang digunakan dalam pelat bipolar Sel Bahan Bakar Membran Penukar Proton (PEMFC). Untuk menggantikan penggunaan inhibitor korosi anorganik seperti kromat yang berbahaya bagi lingkungan, digunakan kitosan sebagai alternatif ramah lingkungan. Melalui teknik Electrophoretic Deposition (EPD), permukaan AA5052 dilapisi dengan kitosan pada konsentrasi 0.5% berat selama 20 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan kitosan secara signifikan mengurangi laju korosi. Berdasarkan metode kehilangan berat, efisiensi inhibitor mencapai 87.89% setelah 72 jam perendaman, sementara metode elektrokimia menunjukkan efisiensi lebih tinggi, yaitu 95.12%. Analisis SEM-EDX mengungkapkan bahwa permukaan logam menjadi lebih halus dengan penurunan komposisi aluminium, serta adanya adsorpsi elemen O, N, dan S yang membentuk senyawa kompleks tidak larut, sehingga menurunkan laju korosi. Namun, peningkatan suhu diketahui dapat mengurangi efektivitas inhibitor tersebut.[15]

### 3.1.8 Penelitian Arwati, I. G. A., Alva, S., Fadilah, A. & Maryani, Y. tentang *Corrosion Analysis on Aluminum Metal (AMS 4050) Extreme Acid Rain Environment Method with Weight Loss* tahun 2021.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan korosi pada logam aluminium AMS 4050, yang memiliki komposisi utama Zn, Cu, Mg, Zr, Si, dan Mn, serta dikenal dengan keunggulan ringan, tahan korosi, dan konduktivitas yang baik. Meskipun lebih tahan retak dibandingkan aluminium lainnya, AMS 4050 tetap rentan terhadap korosi akibat paparan hujan asam. Menggunakan metode kehilangan berat, laju korosi diukur selama 1 hingga 4 minggu perendaman, dengan hasil rata-rata 0,03; 0,1; dan 0,12  $\text{mg/cm}^2/\text{jam}$ . Analisis EDX menunjukkan penurunan kadar aluminium sebesar 18,18% setelah terpapar kondisi korosif, mengindikasikan bahwa korosi dapat menyebabkan degradasi material meskipun material ini memiliki ketahanan retak yang baik.[16]

**3.1.9 Penelitian Xiyan Xua, Shuming Liua,, Ying Liua, Kate Smitha, & Yong Cuib. tentang *Corrosion of stainless steel valves in a reverse osmosis system: Analysis of corrosion products and metal loss* tahun 2019.**

Penelitian ini bertujuan untuk memahami perbedaan produk korosi yang terbentuk pada katup baja tahan karat di berbagai lokasi dalam sistem reverse osmosis di pabrik pengolahan air daur ulang, di mana lingkungan berair yang agresif dapat menyebabkan korosi dan kerusakan peralatan. Melalui analisis morfologis, mikrostruktural, mineralogis, dan kimia, penelitian ini menemukan bahwa katup mengalami berbagai tingkat korosi, termasuk pembentukan lubang, retakan, dan akumulasi produk korosi seperti oksida besi, hidroksida besi, oksida kromium, kalsium karbonat, siderit, dan karat hijau. Korelasi positif yang signifikan ditemukan antara peningkatan berat unsur-unsur tertentu dalam produk korosi dengan persentase kehilangan logam (MLP) pada permukaan katup. Unsur oksigen (O) dan karbon (C) menunjukkan korelasi paling kuat dengan kehilangan logam, yang berkorelasi secara linear dengan MLP, dan jalur reaksi pembentukan produk korosi ini diusulkan berdasarkan temuan tersebut.

**3.1.10 Penelitian Nan Ji, Changliang Li, Peng Wang, Lijuan Zhu1& Chun Feng. tentang *Corrosion Cause Analysis of a Surface Pipeline Flange* tahun 2023.**

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki penyebab korosi yang ditemukan pada dinding bagian dalam dan permukaan alur penyegel flange pipa permukaan di sebuah ladang minyak di Tiongkok barat setelah satu tahun penggunaan. Untuk menganalisis penyebab korosi, dilakukan serangkaian uji sifat fisik dan kimia, pemeriksaan metalografi, inspeksi menggunakan mikroskop elektron (SEM), analisis spektroskopi dispersi energi (EDS), dan analisis difraksi sinar-X (XRD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi kimia dan sifat mekanik flange sesuai dengan persyaratan parameter yang berlaku, dan fenomena korosi utamanya disebabkan oleh korosi CO<sub>2</sub>. Suhu tinggi dan laju aliran medium yang tinggi juga berpengaruh besar dalam mempercepat proses korosi. Korosi pada permukaan alur penyegel disebabkan oleh korosi galvanik, di mana perbedaan potensial korosi antara flange dan gasket merupakan faktor utama terjadinya korosi galvanik tersebut.[18]

**3.1.11 Penelitian Kulkarni, S.J. tentang *A Review on Studies and Research on Corrosion and Its Prevention* tahun 2015**

Penelitian ini bertujuan untuk merangkum dan mengkaji berbagai metode pengendalian korosi, yang merupakan salah satu penyebab utama kerusakan peralatan dan penurunan umur peralatan, serta sering kali menjadi penyebab kegagalan pipa yang berujung pada kecelakaan. Berbagai metode seperti perlindungan katodik, penggunaan inhibitor, dan pelapisan antikorosi telah digunakan untuk meminimalkan korosi. Faktor-faktor seperti kelembapan dan suhu di atmosfer, selain sifat logam dan bahan kimia yang terlibat, berperan penting dalam proses korosi. Tren baru dalam pengendalian korosi adalah penggunaan inhibitor ramah lingkungan (green inhibitors). Kajian ini merangkum penelitian-penelitian yang telah dilakukan terkait korosi dan metode-metode pengendaliannya, dengan fokus pada efektivitas berbagai pendekatan tersebut dalam mengurangi dampak korosi.[19]

**3.1.12 Penelitian Sui, P, Sun, J, Hua, Y et al. tentang *Effect of temperature and pressure on corrosion behavior of X65 carbon steel in water-saturated CO<sub>2</sub> transport environments mixed with H<sub>2</sub>S* tahun 2018.**

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh suhu dan tekanan terhadap perilaku korosi baja karbon X65 dalam CO<sub>2</sub> superkritis yang jenuh air dan mengandung H<sub>2</sub>S, serta untuk menentukan peran H<sub>2</sub>S dalam pembentukan produk korosi dan mekanisme korosi. Pengukuran kehilangan berat menunjukkan bahwa laju korosi tertinggi, yaitu 0,190 mm/tahun, tercatat pada suhu 35 °C dan tekanan 8 MPa. Kehadiran H<sub>2</sub>S sebesar 1000 ppmv menyebabkan produk korosi memiliki struktur lapisan ganda baik dalam kondisi superkritis maupun non-superkritis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kehadiran H<sub>2</sub>S secara signifikan mempengaruhi mekanisme korosi, morfologi, dan komposisi produk korosi, serta mendorong pengendapan air sesuai dengan model termodinamika.[20]

**3.1.13 Penelitian Mashuri, A et.al. tentang *Study of the Corrosion Speed of Nails in Agar- Agar Media* tahun 2023.**

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan laju korosi pada paku dengan menggunakan media agar. Penelitian dilakukan dengan menghitung laju korosi menggunakan metode kehilangan berat, berdasarkan korosi yang terjadi akibat berkarat ketika sampel direndam selama 36 jam, 72 jam, dan 108 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama waktu perendaman, laju korosi semakin kecil. Laju korosi paku sangat baik, yaitu kurang dari 0,02 mm/tahun, dan selama periode perendaman dalam media gelatin, laju korosi tercatat sangat rendah, kurang dari 1. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa paku memiliki ketahanan korosi yang sangat baik karena laju korosinya menurun dengan bertambahnya waktu perendaman.[21]

### 3.1.14 Penelitian A. Taheri & H. Ahmadi. tentang *Corrosion inhibition of carbon steel by acridine orange in HCl solution: Electrochemical and weight loss studies tahun 2023.*

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efek penghambatan acridine orange (AO) terhadap korosi baja karbon A105 dalam larutan asam klorida 0,5 M menggunakan metode potensiodinamik, spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS), dan uji kehilangan berat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa AO berfungsi sebagai penghambat yang efektif, dengan efisiensi penghambatan meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi inhibitor. AO berperilaku sebagai penghambat tipe campuran dalam larutan HCl. Data dari uji EIS menunjukkan bahwa resistansi transfer muatan meningkat dari 74,20  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  pada larutan tanpa inhibitor menjadi 250  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  pada konsentrasi 100 ppm AO. Perbandingan hasil dari ketiga metode menunjukkan kesesuaian yang baik. Pengaruh suhu dalam rentang 20-60 °C menunjukkan bahwa efisiensi penghambatan meningkat dengan suhu, mencapai 90% pada 40 dan 60 °C. Parameter termodinamik dari pelarutan baja, termasuk energi aktivasi, entalpi standar, dan entropi aktivasi, telah dihitung dan dibahas. Penyerapan AO pada permukaan baja mengikuti isotherm Langmuir dan berlangsung secara spontan.[22]

### 3.1.15 Penelitian Shafiekhani, H. et.al tentang *Electrochemical and Simulation Analysis of Salen as a Corrosion Inhibitor Original Research article Electrochemical and Simulation Analysis of Salen as a Corrosion Inhibitor tahun 2018.*

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efek penghambatan ligan Salen terhadap korosi baja karbon (A105) dalam larutan garam 3,5% NaCl dan asam klorida 1,0 M, menggunakan kurva polarisasi potensiodinamik, perhitungan kimia kuantum, dan simulasi dinamika molekuler. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penghambatan dalam larutan 3,5% NaCl dan 1,0 M HCl mencapai lebih dari 96% dan 95%, masing-masing pada suhu 25 °C. Penyerapan inhibitor pada permukaan baja mengikuti isotherm adsorpsi Langmuir, dengan sifat adsorpsi yang terutama bersifat kimia. Semua hasil menunjukkan bahwa Salen adalah penghambat korosi yang efektif untuk melindungi baja dalam medium garam dan asam.

## 3.2 Perbandingan Metode Penelitian

Tabel 4: Perbandingan Metode Penelitian

ASPEK	METODE PENGUJIAN BERAT HILANG	METODE PENGUJIAN ELEKTROKIMIA	METODE MICROSKOPI
Prinsip	Penurunan berat	Reaksi elektrokimia	Observasi permukaan
Kecepatan Pengujian	Lambat	Cepat	Bervariasi (tergantung teknik)
Kepekaan	Rendah	Tinggi	Tinggi (lokal)
Peralatan	Sederhana	Kompleks dan mahal	Kompleks dan mahal
Kemudahan Penggunaan	Mudah	Memerlukan keahlian khusus	Memerlukan keahlian khusus
Informasi yang diberikan	Laju korosi umum	Laju korosi dan mekanisme	Morfologi dan struktur
Aplikasi Utama	Evaluasi umum	Penelitian mekanisme, pemantauan	Analisis kegagalan, karakteristik

Sumber: Review Penelitian 2024

Dari perbandingan metode pengujian korosi di atas, metode yang tepat dan memberikan informasi paling komprehensif adalah Metode Pengujian Elektrokimia. Metode ini dipandang sangat efektif dalam banyak aplikasi. Metode pengujian elektrokimia dikatakan sebagai salah satu metode terbaik saat ini karena memiliki keunggulan dari metode yang lain, diantaranya memberikan hasil yang cepat, sensitif, dan komprehensif menjadikannya metode yang sangat berguna dalam banyak aplikasi, terutama untuk penelitian lanjutan dan pemantauan industri, serta dapat dikolaborasi dengan metode yang lain seperti mikroskopi untuk memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang korosi. Dimana, setelah melakukan pengukuran elektrokimia, analisis mikroskopi bisa digunakan untuk memvisualisasikan kerusakan permukaan secara detail.

## 4. KESIMPULAN

Faktor lingkungan, komposisi material, metode uji, dan perlindungan korosi berperan penting dalam laju korosi dan perilaku material. Penggunaan inhibitor dan teknik perlindungan dapat mengurangi korosi dan memperpanjang umur material. Abdulah et al., 2019, menemukan bahwa korosi pada oven wire belt (baja karbon AISI 1065) disebabkan oleh lingkungan dan bahan adonan kue, mengurangi kekuatan material. Mariami et al., 2019, menunjukkan bahwa NaNO<sub>2</sub> efektif mengurangi korosi pada ASTM A105 dibandingkan

Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>. Kusumawati & Fahriani, 2024, mengonfirmasi bahwa faktor lingkungan, komposisi kimia, dan metode uji mempengaruhi korosi pada baja karbon rendah, dengan pelapisan dan inhibitor efektif mengurangi laju korosi. Rossi et al., 2020, menyatakan perlindungan katodik memperbaiki perilaku kelelahan pada tegangan rendah. Arwati & Ifani, 2022, menemukan laju korosi tertinggi pada baja JIS G 3141 setelah 2880 jam tanpa perubahan signifikan pada sifat mekanik atau komposisi kimia.

Dari hasil review di atas, dapat disimpulkan bahwa metode yang relevan untuk digunakan dalam rencana penelitian pada Material ASTM A105N pada closure valve di PT. XYZ di Serang, Banten adalah Metode elektrokimia. Metode pengujian elektrokimia dikatakan sebagai salah satu metode terbaik saat ini karena memiliki keunggulan dari metode yang lain, diantaranya memberikan hasil yang cepat, sensitif, dan komprehensif, serta dapat dikolaborasi dengan metode yang lain. Dalam konteks kebaruan ini, rencana penelitian kedepannya dapat mengintegrasikan pendekatan dan temuan dari beberapa penelitian yang sudah ada dengan kondisi operasional yang spesifik di PT. XYZ, diantaranya dalam hal 1) Identifikasi potensi korosi dan 2) Pengembangan strategi perlindungan korosi.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. e Gokilakrishnan, S. Divya, R. Rajesh, and V. Selvakumar, “Operating torque in ball valves: a review,” *Int J Technol Res Eng*, vol. 2, no. 4, pp. 311–315, 2019.
- [2] L.-I. Ivancu and D. Popescu, “Design Solutions for Large Size Ball Valves,” *Bull. Polytech. Inst. Iași. Mach. Constr. Sect.*, vol. 68, no. 2, pp. 51–59, 2022.
- [3] S. B. Tandle, P. G. Student, P. M. Ramgir, and J. R. Tathwade, “Design & Analysis of Truinnion Mounted Ball Valve,” vol. 5, no. 9, pp. 2820–2823, 2019.
- [4] I. G. A. Arwati and F. Ifani, “Corrosion Rate Analysis of JIS G-3141 Steel for Automotive Inner Wheel House Production with Weight Loss Method,” *World Chem. Eng. J.*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2022.
- [5] A. Arninda, M. Arnold, S. Ugra, and A. Adawiyah, “Analisa Laju Korosi Dan Lifetime Material Pipa Stainless Steel 316L Di Pt Pertamina Geothermal Energy Area Lahendong Sumur Lhd 23 Unit 3&4 Cluster 5,” *e-Prosiding Semin. Nas. Teknol. Ind. VIII*, pp. 389–393, 2021.
- [6] E. D. Kusumawati and V. P. Fahriani, “Studi Baja Karbon Rendah Terhadap Laju Korosi,” *Sprocket J. Mech. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 59–65, 2024.
- [7] J. C. Eun, *Handbook of Engineering Practice of Materials and Corrosion*. 2020.
- [8] N. . Fontana, M.G., Greene, *Corrosion Engineering*. Singapore: McGraw-Hill Book Co, 1986.
- [9] G. Aryadi, A. Wibowo, C. B. Nugroho, and A. Arysawan, “Pengujian Korosi Intergranular Pada Material UNS 06625 Sesuai Standar ASTM G-28,” *J. Teknol. dan Ris. Terap.*, vol. 4, no. 2, pp. 82–86, 2022.
- [10] ASTM, *Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*. Headquarters: West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM International, 2004.
- [11] S. Rossi, F. Russo, A. M. Lemmi, M. Benedetti, and V. Fontanari, “Fatigue corrosion behavior of friction welded dissimilar joints in different testing conditions,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 8, pp. 1–14, 2020.
- [12] Amri Abdulah, A. Solehudin, and H. Nugraha, “Analisa Dampak Laju Korosi Terhadap Kekuatan Oven Wire Belt (Baja Karbon AISI 1065),” *Teknologika*, vol. 9, no. 2, 2019, [Online]. Available: <http://jurnal.stt-wastukencana.ac.id/index.php/teknologika/article/view/12/8>
- [13] T. Adistantria Mariami, B. Antoko, and S. Soim, “Analisis Laju Korosi dan Lifetime Pipa ASTM A105 dengan Perbandingan Inhibitor NaNO<sub>2</sub> dan Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>,” *Proceeding 4rd Conf. Pip. Eng. its Appl.*, no. 2656, pp. 254–259, 2019.
- [14] A. Arwati and S. Sianipar, “Corrosion Study of Ss316L in Environment Sulphur Acid Using Weight Loss Method,” *Sinergi*, vol. 22, no. 1, p. 24, 2018.
- [15] I. G. A. Arwati et al., “Effect of Chitosan on the Corrosion Inhibition for Aluminium Alloy in H<sub>2</sub>So<sub>4</sub> Medium,” *Proc. WHEC 2022 - 23rd World Hydrog. Energy Conf. Bridg. Cont. by H<sub>2</sub>*, pp. 720–722, 2022.
- [16] I. Gusti, A. Arwati, S. Alva, A. Fadilah, and Y. Maryani, “Corrosion Analysis on Aluminum Metal (AMS 4050) Extreme Acid Rain Environment Method with Weight Loss ARTICLE HISTORY ABSTRACT,” *World Chem. Eng. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 33–36, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/WCEJ>
- [17] A. Goffar, “Uji Korosi Internal pada Pipa Baja Standar API 5 L Grade B Menggunakan Perangkat Lunak CMS 100,” *Lembaran publikasi minyak dan gas bumi*, vol. 39, no. 3. pp. 36–44, 2022.

- [18] N. Ji, C. Li, P. Wang, L. Zhu, and C. Feng, “Corrosion Cause Analysis of a Surface Pipeline Flange,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2468, no. 1, 2023.
- [19] S. J. Kulkarni, “A Review on Studies and Research on Corrosion and Its Prevention,” *Int. J. Res. Rev.*, vol. 2, no. 9, p. 574, 2015, [Online]. Available: [www.ijrrjournal.com](http://www.ijrrjournal.com)
- [20] P. Sui *et al.*, “Effect of temperature and pressure on corrosion behavior of X65 carbon steel in water-saturated CO<sub>2</sub> transport environments mixed with H<sub>2</sub>S,” *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 73, pp. 60–69, 2018.
- [21] A. Mashuri *et al.*, “JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment Study of the Corrosion Speed of Nails in Agar-Agar Media,” vol. 2, no. December, pp. 37–40, 2023.
- [22] A. Taheri and H. Ahmadi, “Corrosion inhibition of carbon steel by acridine orange in HCl solution: Electrochemical and weight loss studies,” *Indian J. Chem. Technol.*, vol. 30, no. January, pp. 67–75, 2023.