

Analisis kegagalan dan evaluasi sisa umur *duplex filter tank* akibat *corrosion under insulation* pada sistem *heat recovery steam generator* kapasitas 300.000 BCWEPD

Aidil Dwi Anugerah¹, Priyo Tri Iswanto², Viktor Malau²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No 2., Daerah Istimewa Yogyakarta, 55281

²Kelompok Keahlian Rekayasa Material, Laboratorium Bahan Teknik, Yogyakarta
Jl. Grafika No 2., Daerah Istimewa Yogyakarta, 55281
Email korespondensi: aidil.dwi.anugerah@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Tangki *duplex filter* dalam sistem *heat recovery steam generator* (HRSG) yang telah beroperasi selama 18 tahun mengalami *unplanned shutdown* akibat kebocoran. Tangki *duplex filter* terdiri dari dua tangki yang dilapisi oleh lapisan insulasi untuk menjaga temperatur *feedwater* sebagai sumber utama produksi uap di HRSG. Namun, seiring dengan operasi yang terus-menerus serta tangki berada di lingkungan yang lembab, akibatnya terjadi penurunan tebal tangki disebabkan korosi di bawah isolasi (CUI). Fenomena menyebabkan terjadinya kebocoran yang mengakibatkan *unplanned shutdown* dan *loss production opportunity* (LPO). Kajian ini bertujuan untuk mengkaji model kegagalan dan akar penyebab kegagalan guna meningkatkan kehandalan unit serta rekomendasi untuk mencegah CUI pada sistem tangki dan perpipaan. Objek kajian ini adalah sampel tangki *duplex filter* yang lama dan baru. Metode yang digunakan untuk mengetahui kondisi kedua sampel adalah pengamatan visual, pengamatan struktur mikro, uji komposisi kimia, uji tarik, uji kekerasan, dan uji laju korosi. Hasil kajian menunjukkan bahwa konsentrasi korosi di bawah insulasi (CUI) pada bagian bawah tangki *duplex filter* merata dan terjadi pada satu titik karena tebal tangki sudah melebihi batas yang diperbolehkan. Akar penyebab kegagalan tersebut adalah karena adanya celah antara bahan isolasi dengan tangki sehingga memungkinkan lingkungan dan air hujan masuk dan terperangkap di bawah isolasi.

Kata kunci: *duplex filter tank*, HRSG, insulasi, CUI, laju korosi.

Abstract

A *duplex filter tank* in a *heat recovery steam generator* (HRSG) system which has been operating for 18 years experienced an *unplanned shutdown* due to leakage. *Duplex filter tank* consists of two tanks which are covered by an insulation to maintain the temperature of the *feedwater* as the main source of steam production in HRSG. However, along with continuous operation as well as tanks located in a humidity environment, this will affect the degradation of tank thickness due to corrosion under insulation (CUI). Then, it will lead to leaks resulting in *unplanned shutdown* and *loss steam production opportunity* (LPO). This study aims to examine the failure model and the root causes of failure in order to increase the reliability of the unit as well as the appropriate recommendations for preventing CUI in tank and piping systems. The object of this research is the existing *duplex filter tank* sample and the new *duplex filter tank* sample. The research method used to determine the condition of the two samples was visual observation, microstructure observation, chemical composition test, tensile test, hardness test, and corrosion rate test. The results showed that the corrosion under insulation (CUI) at the bottom of the *duplex filter tank* was evenly distributed and at one point occurred due to the thickness of the tank that had exceeded the permissible limit. The root cause of the failure is due to a gap between the insulation and the tank which allow the environment and rainwater to enter and be trapped under the insulation.

Keywords: *duplex filter tank*, HRSG, isolation, CUI, corrosion rate.

1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan rumah tangga maupun kebutuhan masyarakat dunia industri. Kebutuhan listrik dari tahun ke tahun semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk [7]. Pembangkit listrik dibangun untuk menambah pasokan listrik untuk kebutuhan listrik di suatu daerah. Oleh karena itu, pembangkit listrik memiliki peran yang sangat besar pada semua sektor masyarakat, sehingga eksistensi kehidupannya menjadi sangat penting [1].

Ada banyak jenis pembangkit listrik salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga gas. Pembangkit listrik tenaga gas menghasilkan daya listrik melalui siklus Brayton [2]. Pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) merupakan sebuah pembangkit yang berfungsi untuk mengubah energi panas (hasil pembakaran bahan bakar gas dan udara) menjadi energi listrik yang bermanfaat [8].

Sistem kerjanya yaitu udara dihisap ke dalam kompresor melalui penyaring udara agar partikel debu tidak ikut masuk ke dalam kompresor tersebut [3].

Tekanan udara dinaikkan di dalam kompresor, lalu dialirkan ke ruang bakar untuk dibakar bersama bahan bakar gas [9]. Campuran udara dan gas akan menimbulkan energi panas yang dapat menghasilkan torsi untuk menggerakkan turbin yang terhubung dengan generator.

Gas buang dari pembangkit listrik tenaga gas diteruskan menuju *heat recovery steam generator* (HRSG). Pada bagian HRSG ini, gas buang turbin mengalir untuk mengubah air menjadi uap. Uap tersebut dimanfaatkan untuk proses produksi (*cogeneration*) atau sebagai penggerak turbin uap (*combined cycle*) [10].

Salah satu komponen penting dalam sistem HRSG adalah *duplex filter tank*. *Duplex filter tank* berfungsi sebagai tangki penyaring kontaminan yang terkandung pada *feedwater* atau air umpan agar air tersebut bersih dari kontaminan dan tidak akan merusak *boiler feed water pump* (BFWP) [11]. *Duplex filter tank* mulai dioperasikan sejak tahun 1999 seiring dengan mulai beroperasinya pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) sistem *cogeneration* ini [12].

Duplex filter tank terdiri dari dua buah tangki yang diselubungi oleh suatu lapisan isolasi agar menjaga suhu *feedwater* sebagai sumber utama produksi uap pada HRSG [13]. Namun, operasi dan produksi yang terus-menerus serta tangki terletak di lingkungan yang dapat menghasilkan kelembaban mengakibatkan terjadinya degradasi ketebalan tangki akibat *corrosion under insulation* (CUI) [14].

Corrosion under insulation (CUI) adalah salah satu masalah yang dihadapi industri minyak dan gas saat ini serta biaya pemeliharaannya cukup besar. Menurut para ahli, *downtime* akibat CUI termasuk *unplanned shutdown* [1]. Kerusakan akibat CUI dapat berakibat pada produktivitas, integritas aset, lingkungan, kesehatan, dan keselamatan jika tidak diprediksi dan ditangani dengan baik [2]. Prediksi untuk CUI sangat sulit karena sistem perpipaan terisolasi dan tidak dapat dilihat langsung secara visual [3]. Menurut API 581, laju korosi CUI berada pada suhu operasi terbatas kisaran -12°C hingga 176°C .

Korosi merupakan degradasi dari sifat material karena interaksi dengan lingkungan dan korosi dari sebagian besar bahan logam tidak bisa dihindari, baik di dalam pipa maupun permukaan luar pipa. Korosi pada permukaan luar pipa berkembang perlahan dan sangat sulit untuk dideteksi dan diukur [4].

Peningkatan aktivitas korosi di bawah isolasi disebabkan oleh kelembaban yang ada pada permukaan pipa dengan isolasi [15]. Sistem isolasi tertutup ini mengurangi penguapan dan memungkinkan untuk terjadinya korosi. Jika kelembaban menembus isolasi pipa dan mencapai permukaan pipa, maka korosi akan mulai terbentuk [5].

Pada tanggal 2 November 2017, operator yang sedang melakukan ORDC (*operator routine duty checklist*) menemukan rembesan air pada tanah yang sumbernya

dari kebocoran pada *duplex filter tank*, yang ditunjukkan pada Gambar 1. Setelah itu, tim *maintenance* melakukan pelepasan isolasi tangki dan menemukan terjadinya korosi eksternal yang cukup parah pada bagian bawah dari tangki [16].



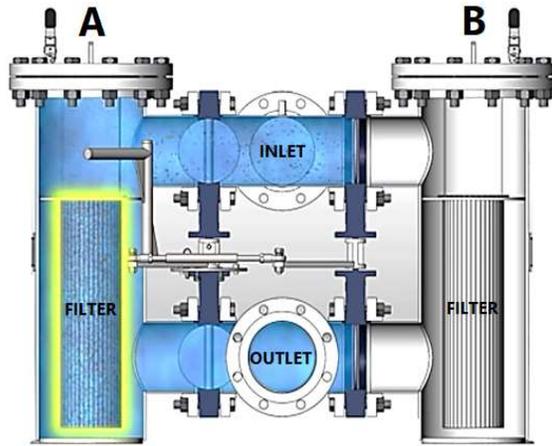
Gambar 1. Kebocoran pada duplex filter tank.

Dugaan awal dari temuan tersebut yaitu air hujan masuk melalui celah-celah yang ada pada isolasi dan menumpuk di dalam isolasi, sehingga menjadi penyebab utama terjadinya *corrosion under insulation* (CUI) [17].

Kajian ini berkaitan dengan analisis kegagalan dan validasi material *duplex filter tank* (tangki B) yang mengalami kebocoran pada bagian bawah tangki, sehingga proses produksi uap terganggu [18]. Setelah terjadi kebocoran pada tangki B, kajian juga dilakukan terkait sisa umur pakai dari tangki A yang secara visual menunjukkan tanda-tanda yang sama seperti tangki B [19].

Investigasi dan identifikasi dilakukan terhadap kondisi dari insulasi yang menyebabkan korosi hingga berdampak pada terjadinya kebocoran tangki B. Selain itu, laju korosi dan sisa umur pakai dari tangki A yang juga mengalami CUI juga dihitung agar dapat mengantisipasi terjadinya kebocoran akibat dari penipisan tebal tangki karena CUI serta cara meminimalisir terjadinya CUI di kemudian hari [20].

Ilustrasi kerja dari sistem *duplex filter tank* A dan B dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi kerja sistem duplex filter tank.

2. Metode

Bagian ini berisi tata kerja yang telah dilakukan serta ditulis dengan jelas, sehingga kajian yang telah dilakukan dapat diulang dengan hasil yang sama.

Prosedur pengujian dilakukan pada spesimen yang lebih dahulu telah dipersiapkan. Adapun metode-metode pengujian yang dilakukan dalam kajian ini adalah sebagai berikut.

Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilakukan sebagai tahapan awal analisis kerusakan dan sebagai acuan penentuan pengujian yang harus dilakukan selanjutnya. Pengamatan visual ini dilakukan dengan menggunakan kamera digital dan analisis visual. Pengamatan visual dilakukan pada dua buah sampel dari *duplex filter tank* yang lama dan yang baru. Hal yang diperhatikan pada pengamatan visual yaitu permukaan kedua sampel dan ketebalan dari sampel yang diuji.

Pengukuran Tebal Tangki

Dalam menentukan umur dari sebuah peralatan yang diakibatkan oleh korosi, laju korosi adalah variabel terpenting di dalam perhitungan. Laju korosi ditentukan oleh dua pembacaan tebal peralatan dibagi interval waktu pembacaan. Pengukuran tebal pada kedua spesimen dilakukan dengan menggunakan 3 alat ukur yaitu jangka sorong, mikrometer, dan *ultrasonic thickness gauge* yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Penentuan laju korosi dibagi menjadi dua yaitu laju korosi jangka pendek dan laju korosi jangka panjang. Laju korosi jangka pendek ditentukan oleh dua pembacaan tebal terbaru, sedangkan laju korosi jangka panjang ditentukan oleh pembacaan tebal terbaru dan yang diambil lebih awal pada masa pakai peralatan.



Gambar 3. Pengukuran tebal menggunakan jangka sorong, mikrometer, dan ultrasonic thickness gauge.

Persamaan laju korosi (CR) dan perkiraan sisa umur (RLA) menggunakan Persamaan 1, Persamaan 2, dan Persamaan 3 berikut.

$$CR_{Long Term} = \frac{t_{initial} - t_{actual}}{\text{time between } t_{initial} \text{ and } t_{actual} \text{ (years)}} \quad (1)$$

$$CR_{Short Term} = \frac{t_{previous} - t_{actual}}{\text{time between } t_{previous} \text{ and } t_{actual} \text{ (years)}} \quad (2)$$

$$Remaining Life = \frac{t_{actual} - t_{required}}{High Corrosion Rate} \quad (3)$$

dengan,

$t_{initial}$ = tebal saat awal masa pemakaian (mm)

t_{actual} = tebal saat pemeriksaan terakhir (mm)

$t_{previous}$ = tebal sebelum pemeriksaan terakhir (mm)

$t_{required}$ = tebal minimum agar peralatan masih bisa digunakan (mm)

Tebal minimum tangki pada arah *circumferential* agar peralatan masih bisa digunakan dapat dihitung melalui Persamaan 4 berikut.

$$t_{required} = \frac{P.R}{2.S.E+0,4P} \quad (4)$$

Tebal minimum pada arah longitudinal agar peralatan masih bisa digunakan dapat dihitung melalui Persamaan 5 berikut.

$$t_{required} = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 P} \quad (5)$$

dengan,

P = tekanan di dalam tangki (kPa)

R = jari-jari luar tangki (mm)

S = tegangan maksimum yang diperbolehkan (kPa)

E = faktor kualitas longitudinal tangki

Uji Tarik

Uji tarik merupakan suatu pengujian yang dilakukan untuk mengukur kemampuan suatu bahan terhadap penerapan beban statis secara lambat. Tujuan dilakukan uji tarik adalah untuk mengetahui sifat mekanis suatu material yang diuji.

Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan masing-masing permukaan material dalam menahan goresan, indentasi, ataupun penetrasi yang dilakukan oleh sebuah indentor. Mesin yang digunakan untuk uji kekerasan metode *Vickers* adalah merk *Buehler Hardness Tester*.

Uji Komposisi

Uji komposisi dilakukan untuk mengetahui komposisi dari material yang digunakan, sehingga dapat diketahui karakteristik dari material tersebut. Mesin yang digunakan untuk uji komposisi adalah mesin spektrometer.

Uji Pengamatan Struktur Mikro

Uji pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui hubungan antara hasil metalografi dengan sifat atau karakter dari perlakuan yang pernah dialami oleh suatu material. Alat yang digunakan adalah mikroskop optik.

Uji Laju Korosi

Uji laju korosi dilakukan untuk mengetahui laju korosi dari penentuan parameter potensial korosi, tahanan korosi, dan arus korosi melalui kurva polarisasi (E vs $\log I$). Uji korosi dilakukan dengan menggunakan sel tiga elektroda yang dihubungkan ke potensiostat dan seperangkat komputer sebagai pengolah data.

Untuk mempercepat terjadinya korosi, maka antara elektroda kerja dan elektroda acuan diberi tegangan. Saat terjadi korosi, arus yang dihasilkan dari elektroda kerja kemudian akan dialirkan ke luar larutan oleh elektroda pembantu yang terbuat dari karbon.

Arus yang dialirkan ini akan terukur oleh potensiostat dan akan didapatkan hasil data berupa kurva *Tafel* juga besarnya rapat arus (I_{corr}). Penentuan harga rapat arus korosi secara tepat sangat diperlukan, karena rapat arus

korosi sebanding dengan laju korosi suatu logam dalam lingkungannya.

Persamaan untuk menghitung laju korosi [6] dalam *mils* (0,001 in) *per year* (mpy) ditunjukkan pada Persamaan 6 berikut.

$$CR = 0,129 \frac{I \rho}{E_w} \quad (6)$$

dengan CR = laju korosi (mpy), ρ = berat jenis (gr/cm^3), I = kerapatan arus korosi ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), E_w = berat ekuivalen (NEQ^{-1}).

Untuk perhitungan laju korosi sebuah logam paduan/*alloy*, membutuhkan berat ekuivalen dari masing masing elemen utama penyusun paduan logam tersebut [6]. Total number equivalent (NEQ) dapat dituangkan kedalam Persamaan 7 berikut.

$$\text{NEQ} = \sum \frac{f_i \cdot n_i}{a_i} \quad (7)$$

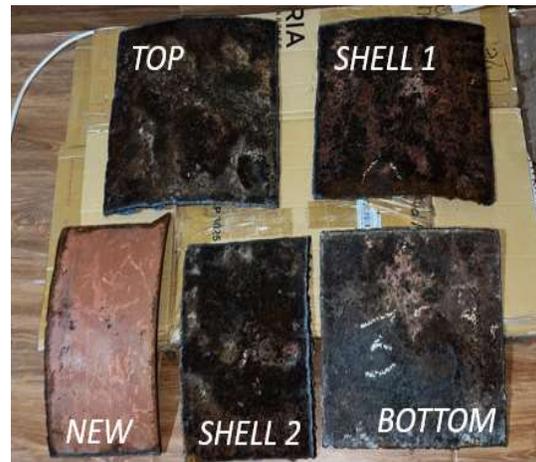
dengan f_i = massa fraksi (%), n_i = elektron valensi,

a_i = berat atom (gram/mol), NEQ = berat ekuivalen = E_w .

3. Hasil dan Pembahasan

Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilakukan terhadap spesimen material dari potongan *duplex filter tank* yang mengalami korosi dan potongan *duplex filter tank* yang baru, seperti ditunjukkan pada Gambar 4 di bawah ini.



Gambar 4. Sampel material dari potongan duplex filter tank yang mengalami CUI dan potongan duplex filter tank yang baru.

Pada sampel material yang mengalami korosi, terlihat jelas pada bagian luar terjadi korosi eksternal dan terlihat tanda-tanda penipisan tebal dari sampel material. Sementara untuk sampel material yang baru, tidak terdapat korosi yang terjadi maupun degradasi ketebalan yang terjadi.

Pengukuran Tebal Tangki

Berikut hasil pengukuran tebal untuk kedua spesimen dengan menggunakan tiap alat pengukuran.

Tabel 1. Pengukuran tebal menggunakan jangka sorong.

Spesimen	Pengukuran (dalam mm)					
	1	2	3	4	5	6
Spesimen Lama	9,448	9,347	4,368	3,860	9,931	9,296
Spesimen Baru	12,014	12,242	12,217	12,166	12,141	12,268

Tabel 2. Pengukuran tebal menggunakan mikrometer.

Spesimen	Pengukuran (dalam mm)					
	1	2	3	4	5	6
Spesimen Lama	9,55	9,48	4,49	3,88	10,15	9,22
Spesimen Baru	12,05	11,96	11,88	12,10	11,85	12,15

Tabel 3. Pengukuran tebal menggunakan ultrasonic thickness gauge.

Spesimen	Pengukuran (dalam mm)					
	1	2	3	4	5	6
Spesimen Lama	8,22	7,84	4,68	3,45	9,12	8,99
Spesimen Baru	12,05	11,98	12,10	12,11	12,06	12,22

Dari hasil pengukuran dengan menggunakan ketiga alat ukur, diketahui bahwa degradasi tebal material spesimen lama terjadi dengan tebal minimum yang diperoleh yaitu sekitar 3,45 mm. Hal ini menunjukkan material *duplex filter tank* mengalami korosi eksternal yaitu *corrosion under insulation* yang mengakibatkan penipisan tebal tangki akibat dari air hujan yang masuk melalui celah antara tangki dengan *rockwool insulation* dan kemudian terperangkap dalam waktu yang cukup lama.

Perhitungan sisa umur pakai dilakukan setelah mendapatkan hasil pengukuran tebal dengan menggunakan alat *ultrasonic thickness gauge*. Hasil pengukuran tebal selanjutnya akan disebut dengan t_{actual} . Nilai $t_{initial}$ merupakan nilai tebal yang dijadikan acuan dasar dari ASTM A36 yaitu sesuai standar. Nilai $t_{previous}$ merupakan nilai tebal hasil pengukuran sebelum pengukuran terakhir yang dilakukan. Setelah mendapatkan nilai hasil pengukuran aktual, maka selanjutnya dilakukan perhitungan batas tebal yang diizinkan, laju korosi, dan sisa umur pakai. Hasil perhitungan sisa umur pakai *duplex filter tank A* disajikan pada Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Perhitungan sisa umur pakai duplex filter tank A.

INSPECTED ITEM	YEAR	1999	2019	2022	MAT	CR Short Term (mm/year)	CR Long Term (mm/year)	RCA	RL (years)
PART	Position	mm	mm	mm	mm			mm	
DUPLEX TANK A	A	12,00	8,24	8,22	2,44	0,01	0,16	5,78	35,17
0FW-STRS-A	B	12,00	7,86	7,84	2,44	0,01	0,18	5,40	29,86
	C	12,00	4,72	4,68	2,44	0,01	0,32	2,24	7,04
	D	12,00	3,48	3,45	2,44	0,01	0,37	1,01	2,72
	E	12,00	9,15	9,12	2,44	0,01	0,13	6,68	53,35
	F	12,00	9,02	8,99	2,44	0,01	0,13	6,55	50,05

Hasil perhitungan sisa umur pakai dari *duplex filter tank A* yaitu sekitar 2,72 tahun atau sekitar 2.533,71 hari dari pengukuran tebal tangki yang dilakukan pada 14 Maret 2022, sehingga *duplex filter tank A* masih dapat beroperasi setidaknya hingga 16 November 2024.

Uji Tarik

Uji kekuatan tarik material dilakukan untuk mengetahui sifat mekanis material dengan melakukan pengujian sesuai standar ASTM E8. Spesimen yang telah dibentuk sesuai standar diuji pada mesin uji tarik *Servopulser* (lihat Gambar 5). Beban maksimal yang implementasikan pada spesimen uji tarik sebesar 10 ton atau 50% dari beban maksimal mesin.



Gambar 5. Spesimen lama dan baru setelah dilakukan uji tarik.

Pengujian ini menghasilkan dua tegangan (*stress*) yakni tegangan luluh (*yield stress/σ_y*) dan tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile stress/σ_{uts}*). Dengan mengetahui nilai tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile stress*), maka dapat diketahui nilai kekuatan tarik (*ultimate strength*), sedangkan dari nilai tegangan luluh (*yield stress*) dapat diketahui nilai kekuatan luluh (*yield strength*). Hasil perhitungan kekuatan tarik ditunjukkan pada Tabel 5 berikut ini.

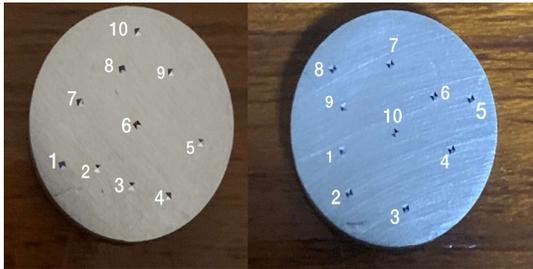
Tabel 5. Hasil perhitungan kekuatan tarik spesimen lama dan spesimen baru vs standar material ASTM A-36

Spesimen	σ_{us}	σ_y
	(MPa)	(MPa)
Spesimen Lama	538,9	324,4
Spesimen Baru	521,1	308,7
Standar Material A-36	400 – 550	250 (Min)

Dari Tabel 4. diperoleh kekuatan tarik material tangki ASTM A-36 spesimen lama sebesar 538,9 MPa dan kekuatan luluh 353,31 MPa. Hasil kekuatan tarik dan kekuatan luluh dari spesimen baru yaitu secara berturut-turut sebesar 521,1 MPa dan 308,7 MPa. Jika dibandingkan dengan standar material A-36, maka hasil kekuatan tarik dan kekuatan luluh dari spesimen lama dan spesimen baru yang diuji memenuhi standar spesifikasi ASTM A-36. Hal ini juga mengonfirmasi bahwa material yang digunakan adalah benar baja karbon ASTM-A36.

Uji Kekerasan

Uji kekerasan pada spesimen dilakukan dengan metode Vickers dengan alat Buehler Hardness Tester. Beban yang digunakan sebesar 240 N.



Gambar 6. Spesimen uji kekerasan (spesimen lama dan spesimen baru).

Hasil uji kekerasan pada permukaan spesimen (lihat Gambar 6) dihitung sesuai dengan standar ASTM E384. Hasil perhitungan terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil perhitungan kekerasan spesimen lama dan spesimen baru vs standar material ASTM A-36.

Spesimen	VHN
Spesimen Lama	148
Spesimen Baru	147
Standar Material A-36	125 - 170

Hasil uji kekerasan untuk spesimen lama dan spesimen baru menurut data perhitungan pada Tabel 2 berturut-turut adalah 148 VHN dan 147 VHN.

Hasil uji kekerasan yang diperoleh jika dibandingkan dengan standar material ASTM A-36 yaitu dengan

rentang 125 - 170 VHN, maka uji kekerasan spesimen tangki baja ASTM A-36 memenuhi standar.

Uji Komposisi

Komposisi kimia yang terdapat dalam material diketahui dari hasil uji komposisi. Pengujian ini menggunakan mesin Spektrometer dengan program FELAST. Komposisi dari material dapat dilihat pada Tabel 7.

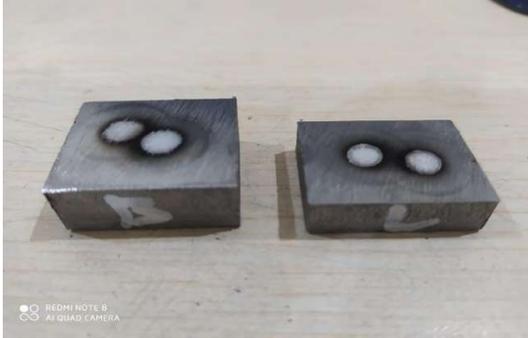
Tabel 7. Komposisi kimia spesimen lama dan spesimen baru (wt%).

Unsur	Spesimen Lama	Spesimen Baru
	%	%
C	0,2230	0,2386
Si	0,2225	0,1445
Mn	0,9519	0,2963
P	0,0083	0,0110
S	0,0046	0,0033
Cr	0,0306	0,0167
Al	0,0268	0,0345
Sn	0,0053	0,0002
Cu	0,0207	0,0115
Ni	0,0168	0,0163
Mo	0,0048	0,0029
W	0,0000	0,0000
Ti	0,0021	0,0008
Nb	0,0010	0,0000
V	0,0034	0,0011
Co	0,0037	0,0017
Pb	0,0011	0,0008
Ca	0,0028	0,0008
Zn	0,0033	0,0019
Fe	98,46	99,21

Sedangkan apabila dibandingkan dengan standar ASTM-A36, maka akan diperoleh perbandingan komposisi kimia sesuai Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan komposisi kimia material dengan standar ASTM A-36 (wt%).

Komposisi	C	Cu	Mn	P	S	Si	Fe
Spesimen Lama	0,2230	0,0207	0,9519	0,0083	0,0046	0,2225	Balance
Spesimen Baru	0,2386	0,0115	0,2963	0,0110	0,0033	0,1445	Balance
Standar ASTM A-36	0,2500	0,2000	1,0300	0,0400	0,0500	0,2800	Balance

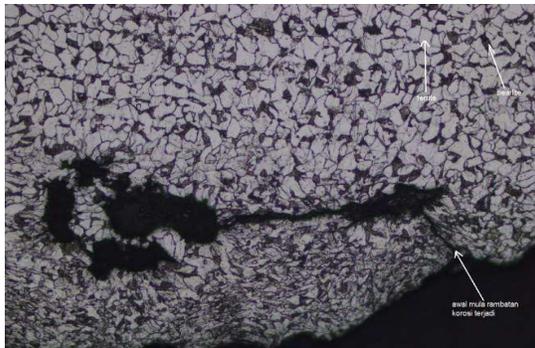


Gambar 7. Hasil uji komposisi dari spesimen lama dan spesimen baru.

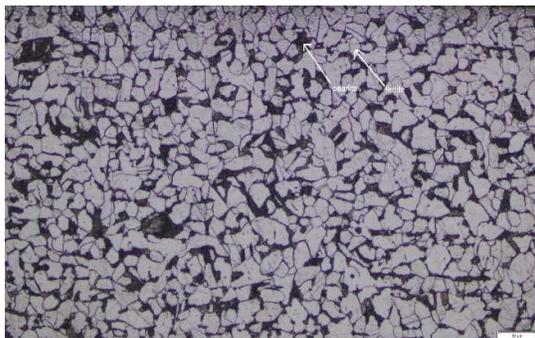
Hasil perbandingan tersebut juga menunjukkan bahwa komposisi kimia utama pada kedua spesimen uji yang digunakan (lihat Gambar 7) dalam kajian ini berada dalam batas standar yang diijinkan sesuai dengan standar ASTM-A36.

Uji Pengamatan Struktur Mikro

Uji pengamatan struktur mikro material pada kajian ini dianalisis dengan menggunakan mikroskop optik. Spesimen standar sesuai prosedur uji metalografi (pengamplasan, pemolesan, dan etsa) disiapkan untuk pengujian struktur mikro. Hasil pengamatan struktur mikro yang dilakukan pada spesimen lama dan spesimen baru dari baja karbon ASTM-A36 ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Struktur mikro material spesimen lama ASTM A-36 dengan 200x pembesaran.



Gambar 9. Struktur mikro material spesimen baru ASTM A-36 dengan 200x pembesaran.

Butiran ferit (*ferrite*) ditunjukkan oleh butiran yang berwarna lebih terang, sedangkan butiran perlit (*pearlite*) berwarna lebih gelap. Sebaran ferit dan perlit merupakan struktur khas paduan baja karbon rendah. Ferit dikenal sebagai struktur besi murni dengan struktur BCC (*Body Centre Cubic*) yang bersifat lunak dan ulet. Perlit menggabungkan dua sifat struktur yakni, kekerasan dan kekuatan sementit dengan keuletan ferit yang merupakan sifat dominan dari paduan baja.

Hasil pengamatan mikrostruktur di bawah mikroskop untuk spesimen lama ditunjukkan pada Gambar 8 dan untuk spesimen baru ditunjukkan pada Gambar 9. Struktur mikro baik pada spesimen lama maupun spesimen baru merupakan ferit dan perlit. Pada sampel lama terlihat mulai terjadinya korosi mula pada tepian spesimen yang kemudian merambat menuju bagian tengah spesimen. Korosi yang terjadi merupakan korosi eksternal dan mempengaruhi bagian permukaan luar material dan membuat terjadinya degradasi material. Sementara itu untuk spesimen baru terlihat struktur mikronya masih padu dan tidak terjadi korosi sama sekali.

Uji Laju Korosi

Laju korosi dipengaruhi oleh kerapatan arus (I_{corr}), berat ekuivalen atom-atom penyusun material (E_w) dan berat jenis material (ρ). Perhitungan laju korosi pada sebuah logam paduan membutuhkan berat ekuivalen (E_w) dari masing-masing elemen utama penyusun paduan logam tersebut. Perhitungan berat ekuivalen material dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Perhitungan berat ekuivalen material.

Unsur	Komposisi (%)	Elektron Valensi	Berat Atom (gr/mol)	N_{EQ} (mol/gr)
Fe	98,46	2	55,85	0,035114
Mn	0,9519	2	54,94	0,000261
C	0,223	4	12,01	0,000660
Si	0,2225	4	28,09	0,000312
			ΣN_{EQ}	0,036349

Dari Tabel 9, maka perhitungan berat ekuivalen adalah:

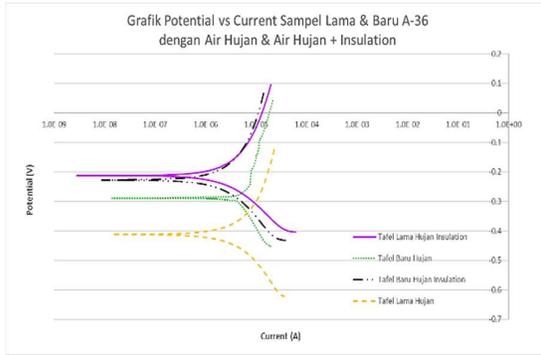
$$E_w = 1/N_{EQ} = 1/0,036349 = 27,5107$$

Laju korosi dapat dihitung dengan memasukkan hasil pengujian ke dalam persamaan berikut.

$$CR = 0,129 \frac{I_{corr}}{\rho} E_w$$

$$CR_{LHI} = 11,5753 \text{ mpy} \quad | \quad CR_{BHI} = 14,2865 \text{ mpy}$$

$$CR_{LH} = 23,4481 \text{ mpy} \quad | \quad CR_{BH} = 18,7608 \text{ mpy}$$



Gambar 10. Grafik potensial vs current sampel lama dan baru A-36 dengan air hujan dan air hujan + insulation.

Pengujian laju korosi dengan spesimen lama dan spesimen baru dari baja karbon rendah A-36 di lingkungan air hujan tanpa *rockwool insulation* (LH dan BH) dan di lingkungan air hujan dengan *rockwool insulation* (LHI dan BHI) grafik Tafel ditunjukkan pada Gambar 10.

Tabel 10. Laju korosi pada tiap spesimen dengan media berbeda.

Media	I_{corr}	E_{corr}	Laju Korosi	
	($\mu A/cm^2$)	(mV)	(mpy)	(mm/year)
L H I	25,441	-30,210	11,5753	0,29401
B H	41,234	-120,74	18,7608	0,47653
B H I	31,400	-14,557	14,2865	0,36288
L H	51,536	-170,28	23,4481	0,59558

Dari Tabel 10 di atas dapat dilihat bahwa laju korosi spesimen lama di lingkungan air hujan (LH) adalah 23,44 mpy atau 0,595 mm/year, sedangkan laju korosi spesimen baru di lingkungan air hujan (BH) adalah 18,76 mpy atau 0,476 mm/year. Selanjutnya, hasil laju korosi spesimen lama di lingkungan air hujan ditambah *rockwool insulation* (LHI) adalah 11,57 mpy atau 0,294 mm/year, sedangkan laju korosi spesimen baru di lingkungan air hujan ditambah *rockwool insulation* (BHI) adalah 14,28 mpy atau 0,362 mm/year.

Perhitungan sisa umur pakai dilakukan pada keempat spesimen uji laju korosi dengan acuan tahun pemasangan dan pengoperasian awal *duplex filter tank* yaitu tahun 1999. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 11 di bawah ini.

Tabel 11. Perhitungan sisa umur pakai tiap spesimen uji laju korosi.

YEAR	1999	Long Term Reading Interval	MAT		CR Long Term (mm/year)	RCA		RL (years)
			mm	inch		mm	inch	
LH	12.00	23	2.44	0.096	0.59558	9.56	0.376	16.05
LHI	12.00	23	2.44	0.096	0.29401	9.56	0.376	32.52
BH	12.00	23	2.44	0.096	0.47653	9.56	0.376	20.06
BHI	12.00	23	2.44	0.096	0.36288	9.56	0.376	26.34

Hasil perhitungan sisa umur pakai spesimen uji laju korosi pada spesimen lama dan baru dengan air hujan tanpa *rockwool insulation* (LH dan BH) yaitu sekitar 16 tahun dan 20 tahun. Sementara itu, hasil perhitungan sisa umur pakai spesimen uji laju korosi pada spesimen lama dan baru dengan air hujan ditambah *rockwool insulation* (LHI dan BHI) yaitu sekitar 26 tahun dan 32 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa material A-36 akan lebih rendah laju korosi dan makin tinggi umur pakainya jika dilapisi dengan *rockwool insulation* dibandingkan dengan material A-36 tanpa dilapisi *rockwool insulation*.

4. Kesimpulan

Hasil pengujian pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa terdapat korosi mula pada bagian tepi spesimen *duplex filter tank* yang merambat hingga bagian tengah permukaan atas spesimen. Korosi tersebut termasuk dalam korosi eksternal dan sesuai dengan kejadian di lapangan yaitu *duplex filter tank* yang mengalami *corrosion under insulation* (CUI).

Akar penyebabnya adalah adanya celah di antara tangki dan insulasi yang menyebabkan masuknya air hujan melalui celah tersebut, mengendap dalam waktu yang lama, dan selanjutnya mengakibatkan terjadinya CUI.

Pengujian dan perhitungan laju korosi menunjukkan bahwa laju korosi pada spesimen lama dan spesimen baru lebih tinggi pada pengujian laju korosi pada lingkungan air hujan tanpa *rockwool insulation* (LH dan BH) dibandingkan dengan di lingkungan air hujan ditambah *rockwool insulation* (LHI dan BHI). Maka dari itu, *rockwool insulation* harus dipasang secara benar dan tepat pada tangki maupun pipa, sehingga tidak membentuk celah yang dapat membuat air hujan masuk ke dalam sistem insulasi tersebut.

Duplex filter tank A mempunyai sisa umur pakai sekitar 2,72 tahun atau sekitar 2.533,71 hari dari pengukuran tebal tangki yang dilakukan pada 14 Maret 2022, sehingga *duplex filter tank* A masih dapat beroperasi setidaknya hingga 16 November 2024.

Pemasangan *rockwool insulation* disarankan untuk tetap dilakukan pada *duplex filter tank* A karena tangki tersebut masih dapat dioperasikan. Hasil pengujian dan validasi material menunjukkan bahwa sifat material tangki A masih cukup baik. Hal ini dapat dilihat dari hasil pengujian komposisi kimia maupun sifat mekaniknya.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada PT Pertamina Hulu Rokan, PT PLN Migas Energy, serta Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada atas dukungan selama kajian ini dilakukan, sehingga kajian ini dapat terselesaikan.

Daftar Pustaka

- [1] Geary, W., 2013, Analysis of a corrosion under insulation failure in a carbon steel refinery hydrocarbon line, *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 1. 249–256, 10.1016/j.csefa.2013.09.001.
- [2] Javaherdashti, Reza. 2014, Corrosion under Insulation (CUI) A review of essential knowledge and practice, *J. of Materials Science and Surface Engineering*, 1. 36-43.
- [3] Mohsin, K.M., Mokhtar, A.A., Tse, P.W.. (2019). A fuzzy logic method: Predicting corrosion under insulation of piping systems with modelling of CUI 3D surfaces. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 175, 103929, ISSN 0308-0161.
- [4] Moon, Sunghye, Tateno, S., Matsuyama, H. (2010) Efficient management method of corrosion under insulation using Group numbering of continuous conditions. 590-595.10.1109/ICCAS.2010.5669864.
- [5] Caines, Susan, Khan, F., Zhang, Y., Shirokoff, J. (2017) Simplified electrochemical potential noise method to predict corrosion and corrosion rate. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Volume 47. Pages 72-84. ISSN 0950-4230.
- [6] Jones, D. A. (1996). *Principle and Prevention of Corrosion* (2 ed). New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc.
- [7] Maleque, M. A., and Salit, M.S., 2013, *Materials Selection and Design*, Springer, London.
- [8] Meyers, M., and Chawla, K., 2008, *Mechanical Behaviour of Material*, Cambridge university press.
- [9] Mohsin, K.M., Mokhtar, A.A., Tse, P.W., 2019, A fuzzy logic method: Predicting corrosion under insulation of piping systems with modelling of CUI 3D surfaces, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 175, 103929, ISSN 0308-0161.
- [10] Moon, Sunghye, Tateno, S., Matsuyama, H., 2010, Efficient management method of corrosion under insulation using Group numbering of continuous conditions, 590-595. 10.1109/ICCAS.2010.5669864.
- [11] NACE International. 2011. *Internal Corrosion for Pipelines*. Houston, USA: The Corrosion Society.
- [12] Nishida, S.I., 1992, *Failure analysis in engineering application*, Butterworth-Heinemann Ltd.
- [13] ASM International. In: *ASM Handbook*, 2005, *Failure Analysis and Prevention*. Vol. 11, Materials Park, OH.
- [14] DJ, Wulpi., 1999, *Understanding How Components Fail*, Second Edition, Materials Park, Ohio, USA: ASM International.
- [15] DP, Dennies., 2005, *How to Organize and Run a Failure Investigation*, ASM International.
- [16] O'Donoghue, Mike, Datta, V., Fletcher, I., Sykes, G., 2019, Low temperature curing coating technology for corrosion under insulation mitigation, *E3S Web Conf.* 121 05002.
- [17] Otegui, J. L., 2014, *Failure Analysis, Fundamental and Applications in Mechanical Components*, Springer, New York.
- [18] R.W., Revie, and Uhlig, H.H., 2008, *Corrosion and Corrosion Control, An Introduction to Corrosion Science and Engineering*, 4th Edition, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [19] Velazquez J.L., 2018, *Fractography and failure analysis, Structural integrity 3*, Springer.
- [20] Zheng, J. P., & Roy, D. 2002. The Role of Glycine in the Chemical Mechanical Planarization of Copper. 149, pp. G352-361.