

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <https://ejournal.brin.go.id/urania>



FORMULASI INHIBITOR KOROSI BERBASIS ZINK-FOSFAT DAN MIKO-DEA PADA PIPA PENDINGIN SEKUNDER REAKTOR SERBA GUNA GERRIT AUGUSTINUS SIWABESSY

Rosika Kriswarini¹, Andon Insani², Mohammad Khotib³, Komar Sutriah³,
Arif Nugroho¹, Juan Carlos Sihotang¹, Ade Saputra¹

¹Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir Dan Limbah Radioaktif – BRIN

Kawasan Sains dan Teknologi B.J Habibie Gd. 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314

²Pusat Riset Teknologi Analisis Berkas Nuklir – BRIN,

Kawasan Sains dan Teknologi B.J Habibie Gd. 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314

³Departemen Kimia, Fakultas MIPA, IPB University

Jl. Tanjung Kampus IPB, Dramaga, Bogor

e-mail: rosi004@brin.go.id

(Naskah diterima: 11–10–2024, Naskah direvisi: 24–12–2024, Naskah disetujui: 30–12–2024)

ABSTRAK

FORMULASI INHIBITOR KOROSI BERBASIS ZINK-FOSFAT DAN MIKO-DEA PADA PIPA PENDINGIN SEKUNDER REAKTOR SERBA GUNA GERRIT AUGUSTINUS SIWABESSY.

Material pipa pendingin sekunder RSG-GAS berupa baja karbon rendah. Pipa dialiri fluida yang berpotensi mengakibatkan korosi. Untuk menurunkan laju korosi ditambahkan inhibitor anorganik dan organik. Inhibitor yang digunakan merupakan campuran inhibitor zink-fosfat sebagai inhibitor anorganik dan miko-DEA sebagai inhibitor organik dalam media NaCl 0,1%. Inhibitor zink-fosfat pada variasi konsentrasi 25, 35 dan 50 ppm dan inhibitor miko-DEA pada konsentrasi 50, 75 dan 100 ppm. Untuk mempelajari pengaruh laju korosi dan perilaku korosi baja karbon diamati melalui metode elektrokimia yang meliputi *Open Circuit Potensial (OCP)* selama 600 detik, *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)* pada rentang frekuensi 10^5 Hz sampai dengan 0,01 Hz dan *Potensiodynamic Plot (PDP)* pada rentang tegangan -1 Volt sampai dengan 1 Volt menggunakan potensiostat. Untuk menunjang hasil uji korosi, dilakukan pengamatan morfologi permukaan sampel tanpa dan dengan inhibitor menggunakan SEM, kandungan fosfat dalam zink-fosfat menggunakan *UV-Vis*, senyawa yang terkandung dalam larutan zink-fosfat dan miko-DEA menggunakan *FTIR*. Formulasi optimal yang menghasilkan laju korosi terendah sebesar 10,57 mpy pada konsentrasi campuran zink-fosfat 50 ppm dan miko-DEA 75 ppm dalam media NaCl 0,1%.

Kata kunci: korosi, baja karbon, inhibitor zink-fosfat dan miko-DEA, formulasi, RSG-GAS.

Formulasi Inhibitor Korosi Berbasis Zink-Fosfat dan Miko-DEA
Pada Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy
(Rosika Kriswarini, Andon Insani, Mohammad Khotib, Komar Sutriah,
Arif Nugroho, Juan Carlos Sihotang, Ade Saputra)

ABSTRACT

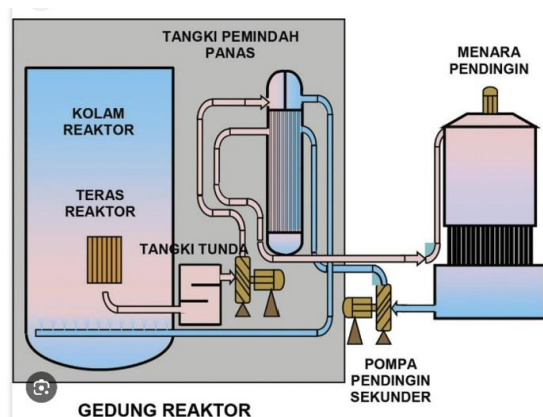
FORMULATION OF CORROSION INHIBITORS BASED ON ZINC-PHOSPHATE AND MIKO-DEA FOR THE SECONDARY COOLING PIPES OF THE GERRIT AUGUSTINUS SIWABESSY MULTI-PURPOSE REACTOR. *The material for the secondary cooling pipes of RSG-GAS is low carbon steel. The pipes carry fluids that have the potential to cause corrosion. To reduce the corrosion rate, both inorganic and organic inhibitors are added. The inhibitors used are a mixture of zinc-phosphate as an inorganic inhibitor and miko-DEA as an organic inhibitor in a 0.1% NaCl medium. Zinc-phosphate inhibitors are tested at concentrations of 25, 35, and 50 ppm, and miko-DEA inhibitors at concentrations of 50, 75, and 100 ppm. To study the effects on corrosion rate and the corrosion behavior of carbon steel, electrochemical methods were employed, including Open Circuit Potential (OCP) for 600 seconds, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) over a frequency range from 10^5 Hz to 0.01 Hz, and Potentiodynamic Plot (PDP) over a voltage range from -1 Volt to 1 Volt using a potentiostat. To support the corrosion test results, surface morphology of the samples with and without inhibitors was observed using SEM, and compounds in the zinc-phosphate and Miko-DEA solutions were identified using FTIR. The optimal formulation that resulted in the lowest corrosion rate was a mixture of 50 ppm zinc-phosphate and 75 ppm miko-DEA in a 0.1% NaCl medium. The achieved corrosion rate was 10.57 mpy.*

Keywords: corrosion, carbon steel, zinc-phosphate and miko-DEA inhibitors, RSG-GAS.

Formulasi Inhibitor Korosi Berbasis Zink-Fosfat dan Miko-DEA
 Pada Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy
 (Rosika Kriswarini, Andon Insani, Mohammad Khotib, Komar Sutriah,
 Arif Nugroho, Juan Carlos Sihotang, Ade Saputra)

PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy (RSG-GAS) merupakan salah satu fasilitas instalasi nuklir yang berada di Kawasan Sains Terpadu (KST) BJ Habibie Tangerang Selatan. Reaktor tersebut merupakan reaktor riset jenis kolam yang dioperasikan menggunakan bahan bakar U_3Si_2Al . Untuk mengungkung hasil fisi dari proses radiasi, maka diterapkan sistem perlindungan dari radiasi. Bentuk perlindungan tersebut berupa sistem pendingin reaktor yang terdiri dari sistem pendingin primer dan sekunder. Sistem pendingin primer menggunakan air demineralisasi sebagai mediana, sedangkan sistem pendingin sekunder menggunakan air tanah yang ditambah dengan zat aditif. Sistem pendingin reaktor ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem pendingin reaktor [1]

Ketika reaktor beroperasi, kualitas air pendingin primer sangat dipengaruhi oleh radiasi neutron. Radiasi ini mendegradasi air pendingin menjadi senyawa aktif sebagai oksidator seperti O_2 dan H_2O . Senyawa ini menginduksi terjadinya reaksi oksidasi dengan bahan terlarut di dalamnya sehingga membentuk lapisan/senyawa di alat penukar panas. Terbentuknya senyawa akan menurunkan efisiensi daya tukar panas yang mengakibatkan usia pengoperasiannya tidak sesuai dengan usia desain. Untuk menjamin keselamatan operasi, kendali kualitas pendingin primer dilakukan dengan menjaga kondisi/parameter air agar selalu sesuai

persyaratan. Sedangkan sistem pendingin sekunder menggunakan air tanah sebagai mediana dengan ditambah zat aditif untuk mencegah terjadinya korosi/ kerak [2]. Air pendingin sekunder mempunyai konduktivitas yang tinggi dengan banyaknya garam-garam yang larut di dalamnya seperti sulfat, kalsium dan klorida.

Baja karbon rendah (*low carbon steel/LCS*) yang mengandung karbon $< 0,25\%$ digunakan sebagai bahan pipa pendingin sekunder instalasi nuklir karena mempunyai keunggulan harga relatif murah, mempunyai sifat mekanik yang lunak dan ulet sehingga mudah dibentuk, kemampuan las yang baik, serbaguna untuk konstruksi tetapi mempunyai kelemahan mudah terkorosi [3]. Oleh karena itu untuk menghambat laju korosi LCS, dalam pengoperasiannya sebagai pendingin sekunder ditambahkan inhibitor yang mengandung zink-fosfat dalam air pendinginnya.

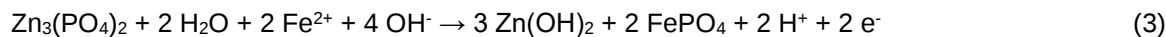
Inhibitor zink-fosfat merupakan salah satu jenis inhibitor yang sering digunakan dalam menghambat laju korosi karena mempunyai kelebihan dengan adanya fosfat yang memiliki kemampuan untuk meningkatkan adhesi organik lapisan atas dan pencegahan korosi pada lapisan permukaan. Aplikasi utama fosfat adalah untuk meningkatkan ketahanan korosi, adhesi cat dan mempromosikan isolasi listrik. Penelitian tentang fosfat sebagai pelapis permukaan logam untuk mencegah korosi didasarkan pada unsur seng, besi, dan mangan [4]. Selain itu penelitian tentang inhibitor zink-fosfat untuk perlindungan baja karbon yang dilakukan oleh Kusumastuti *et.al* [5] menyatakan bahwa efisiensi inhibitor sebesar 45,2% pada konsentrasi inhibitor 150 ppm. Penelitian yang telah dilakukan oleh Maman *et al.* [6] pada substrat baja karbon menunjukkan bahwa pada konsentrasi inhibitor zink-fosfat sebesar 90 ppm dalam media NaCl 3% memberikan efisiensi 66,46%.

Penambahan $Zn_3(PO_4)_2$ ke dalam air yang mengandung oksigen maka ion Fe^{2+} dan OH^- pada persamaan (3) akan bereaksi dengan $Zn_3(PO_4)_2$ sesuai dengan persamaan (1) dan (2) sebagai berikut [7].



Berdasarkan persamaan (1) dan (2), bila $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ ditambahkan dalam air maka

interaksi yang terjadi pada permukaan logam mengikuti persamaan (3) sebagai berikut.



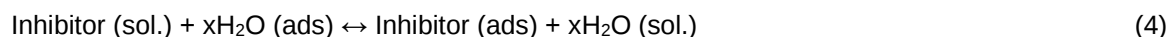
Selain inhibitor anorganik seperti zink-fosfat sebagai inhibitor korosi, dikenal juga inhibitor organik. Asam lemak dietanolamida (FADEA) merupakan salah satu tipe surfaktan nonionik yang banyak dikembangkan saat ini. *Fatty acid diethanolamide (FADEA)* merupakan amida tersier yang stabil pada media bersifat alkali. Selain itu, FADEA bersifat tidak toksik, *biodegradable*, tidak iritasi, dan ramah terhadap lingkungan. FADEA digunakan dalam formulasi produk sebagai kosmetik, fungisida, pelumas, agen pengontrol busa, pengemulsi, sampo, detergen, dan inhibitor korosi [8].

Sintesis FADEA dapat dilakukan dengan menggunakan teknik konduksi panas maupun mikrogelombang. Berbagai penelitian pembuatan FADEA telah dilakukan Yuniasri menyintesis coco-DEA dari minyak kelapa dan dietanolamina dengan katalis sodium metilat menggunakan metode langsung dan metode bertingkat dengan teknik secara konduksi panas [9]. Penelitian tentang sintesis FADEA dari FAME (*Fatty Acid Metil Ester*) biji mangga dan dietanolamina pada rasio 1:2 b/b menggunakan teknik konduksi panas dan mikrogelombang juga telah dilakukan. Berdasarkan hasil sintesis FADEA yang diperoleh, menunjukkan bahwa teknik mikrogelombang lebih baik daripada teknik konduksi panas. Rendemen produk yang diperoleh melalui teknik mikrogelombang sebesar 94,7% dengan waktu reaksi 10 menit,

sedangkan teknik konduksi panas sebesar 88,7% dalam waktu 420 menit [10].

Sintesis FADEA dibuat dari asam lemak minyak kotor (MIKO) sawit dan dietanolamida dengan bantuan mikrogelombang. MIKO merupakan hasil samping dari proses penyulingan minyak kelapa sawit yang memiliki asam lemak bebas (ALB) di atas 80%. FADEA dari MIKO sawit ini memiliki komposisi asam lemak bebas penyusun minyak sawit yaitu asam palmitat (40–45%) dan asam oleat (39–45%) [11]. Teknik mikrogelombang mempunyai karakteristik yang berbeda dengan teknik konduksi panas. Energi mikrogelombang dihantarkan secara langsung pada molekul-molekul yang bereaksi melalui reaksi kimia, sehingga perpindahan panas lebih efektif daripada secara konduksi panas. Teknik sintesis dengan mikrogelombang memiliki kelebihan yaitu pemanasan lebih merata dan bersifat selektif yang berarti tergantung dari sifat dielektrik bahan. Kecepatan reaksi dalam teknik sintesis mikrogelombang disebabkan oleh adanya hantaran energi secara langsung oleh molekul-molekul yang bereaksi melalui reaksi kimia [12].

Literatur tentang mekanisme penghambatan korosi menyatakan bahwa adsorpsi inhibitor disebabkan oleh reaksi substitusi yang terjadi antara molekul inhibitor dan molekul air. Hal ini merupakan langkah pertama dalam penghambatan korosi [13].



Dalam hal adsorpsi, faktor penting pada proses penghambatan korosi adalah muatan pada permukaan sampel, suhu, konsentrasi inhibitor yang digunakan dan lingkungan sekitar. Pada adsorpsi fisik, gaya elektrostatik dalam inhibitor terjadi pada permukaan sampel. Jadi, inhibitor dapat menghambat reaksi katodik dan anodik. Persyaratan untuk adsorpsi fisik adalah spesies bermuatan yang membentuk kompleks [14].

Penelitian korosi LCS menggunakan inhibitor anorganik (zink-fosfat) yang telah dilakukan perlu dikombinasi dengan inhibitor

organik (miko-DEA) untuk memperoleh efisiensi yang lebih baik. Pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan perilaku korosi menggunakan kombinasi inhibitor zink-fosfat dan miko-DEA dengan konsentrasi yang bervariasi dalam media NaCl 0,1% sehingga mendapatkan formulasi inhibitor yang optimal dan mampu mengurangi laju korosi secara signifikan.

METODOLOGI

Sampel baja karbon dipotong dan dibubut berbentuk silinder dengan diameter 1,5 cm dan ketebalan 3 mm, selanjutnya

Formulasi Inhibitor Korosi Berbasis Zink-Fosfat dan Miko-DEA
 Pada Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy
 (Rosika Kriswarini, Andon Insani, Mohammad Khotib, Komar Sutriah,
 Arif Nugroho, Juan Carlos Sihotang, Ade Saputra)

dimounting menggunakan resin dalam pralon berdiameter 2 cm dan ketebalan 7 mm. Sampel dihubungkan dengan kawat tembaga sepanjang 15 cm untuk keperluan uji korosi dan digerinda secara bertahap menggunakan kertas amplas grit 80, 220, 500, 800 dan 1200. Setelah digerinda, permukaan sampel dibersihkan dengan etanol dan dikeringkan.

Larutan NaCl 0,1% sebanyak 5 L dibuat dengan cara menimbang NaCl serbuk sebanyak 5 g dan dilarutkan dalam air reaktor hingga volume 5 L. Inhibitor induk zink-fosfat 1000 ppm sebanyak 200 mL dibuat dengan memipet 5,2 mL zink-fosfat kemudian dilarutkan menggunakan NaCl 0,1% hingga volume 200 mL. Sementara itu, inhibitor induk miko-DEA 1000 ppm sebanyak 200 mL dibuat dengan menimbang 0,2 g miko-DEA kemudian dilarutkan menggunakan NaCl 0,1% hingga volume 200 mL. Selanjutnya larutan inhibitor induk zink-fosfat dan miko-DEA digunakan untuk membuat larutan dengan variasi konsentrasi 25, 35, 50, 75 dan 100 ppm masing-masing sebanyak 200 mL dalam larutan NaCl 0,1%. Inhibitor campuran zink-fosfat dan miko-DEA disiapkan pada konsentrasi 25, 35 dan 50 ppm untuk zink-fosfat dan konsentrasi 50, 75 dan 100 ppm untuk miko-DEA dalam larutan NaCl 0,1%. Uji korosi LCS dalam larutan inhibitor dilakukan melalui metode *Open Circuit Potensial (OCP)*, *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)* dan *Potensiodynamic Polarization (PDP)*

Efisiensi inhibisi ditentukan dengan persamaan (5) berikut.

$$\%I = \frac{CR_{unh} - CR_{inh}}{CR_{unh}} \times 100\% \quad (5)$$

Dengan CR_{unh} adalah laju korosi blanko, dan CR_{inh} adalah laju korosi larutan yang mengandung inhibitor. Semakin besar nilai efisiensi inhibisi (%I) dari suatu larutan yang mengandung senyawa tertentu, semakin baik senyawa tersebut bertindak sebagai inhibitor korosi.

Pengujian perilaku korosi pada sampel LCS diawali dengan pengamatan OCP menggunakan potensiostat selama 600 detik. Pengujian lanjutan berupa EIS pada sampel LCS dengan rentang frekuensi pengukuran dari 10^5 Hz sampai dengan 0,01 Hz dan pengujian PDP pada rentang tegangan -1 sampai dengan 1 Volt dan scan rate 5 mV/detik. Analisis morfologi dan

distribusi unsur menggunakan SEM-EDS dengan perbesaran 3000 kali dilakukan pada permukaan sampel LCS tanpa dan dengan inhibitor zink fosfat.

Setelah diperoleh kondisi optimal masing-masing inhibitor zink-fosfat dan miko-DEA, selanjutnya dilakukan uji korosi LCS dalam campuran zink-fosfat dan miko-DEA untuk menentukan formulasi campuran optimal menggunakan metode *full factorial*. Metode *full factorial* merupakan metode yang memadukan 2 parameter pengujian. Jenis inhibitor dan konsentrasi inhibitor menjadi parameter dalam penelitian ini. Inhibitor zink-fosfat dan miko-DEA pada konsentrasi optimal masing-masing inhibitor dianalisis sehingga memberikan nilai laju korosi terendah. Setelah diperoleh konsentrasi optimal pada masing-masing inhibitor, selanjutnya konsentrasi optimal tersebut dikombinasi pada 3 titik konsentrasi yang mengacu pada konsentrasi optimal. Hal ini ditunjukkan pada Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Optimasi konsentrasi inhibitor metode *full factorial*.

Data ke-	zink fosfat	Miko-DEA
1	ZF1	MD1
2	ZF1	MD2
3	ZF1	MD3
4	ZF2	MD1
5	ZF2	MD2
6	ZF2	MD3
7	ZF3	MD1
8	ZF3	MD2
9	ZF3	MD3

ZF2 = konsentrasi zink-fosfat (ppm) untuk laju korosi terendah

MD2 = konsentrasi miko-DEA (ppm) untuk laju korosi terendah

ZF1 = konsentrasi zink-fosfat (ppm) yang lebih rendah daripada ZF2

MD1 = konsentrasi miko-DEA (ppm) yang lebih rendah daripada MD2

ZF3 = konsentrasi zink-fosfat (ppm) yang lebih tinggi daripada ZF2

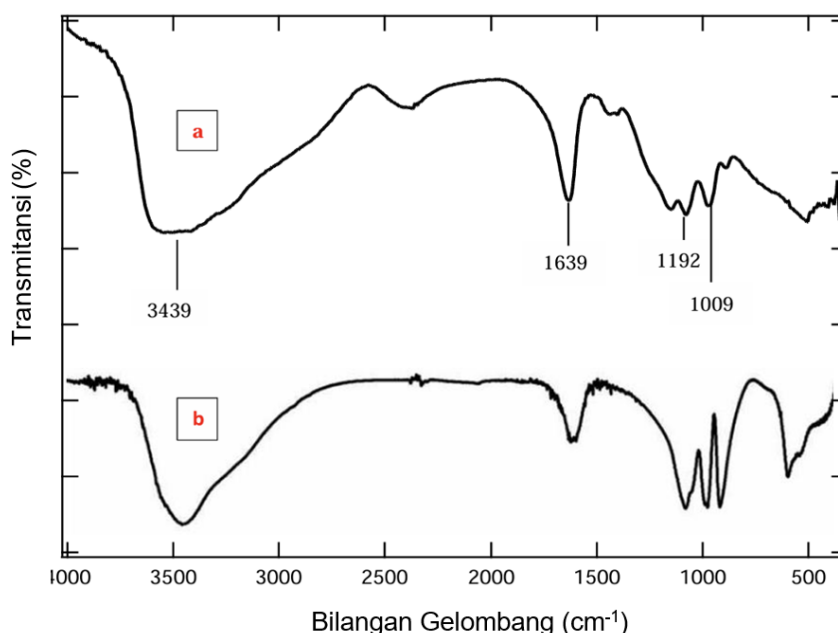
MD3 = konsentrasi miko-DEA (ppm) yang lebih tinggi daripada MD2

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sampel LCS yang digunakan dalam penelitian ini memiliki komposisi C sebesar 0,126%, Si 0,183%, Ti 0,051%, Mn 0,234% dan Cr 0,055%. Inhibitor yang digunakan berupa larutan yang mengandung Zn sebesar

3,77% dan fosfat sebesar 8,65%. Gugus fungsional inhibitor yang mengandung fosfat dikarakterisasi menggunakan FTIR seperti

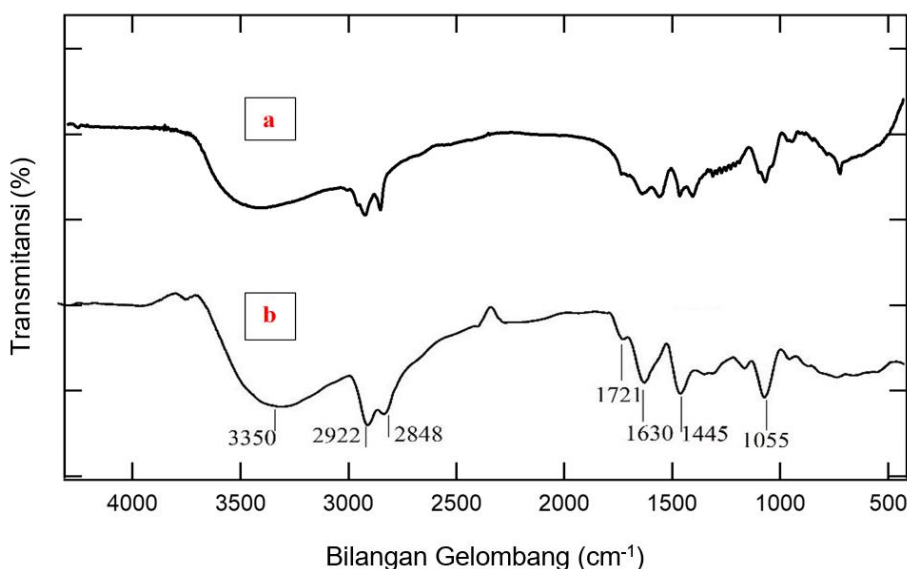
yang ditunjukkan sebagai spektrum pada Gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4. Spektrum inhibitor zink-fosfat, (a) hasil pengukuran, (b) referensi [15]

Gambar 4 menunjukkan bahwa dalam inhibitor zink-fosfat terdapat gugus fungsional O-H (hidroksil), C=O (β diketon), and PO_4^{3-} (fosfat). Gugus OH pada bilangan gelombang 3439 cm^{-1} termasuk daerah spektrum 4000-2500 cm^{-1} . Ikatan H_2O pada bilangan gelombang 1639/cm termasuk dalam daerah spektrum 2000-1500 cm^{-1} . Daerah spektrum

400-1500 cm^{-1} sebagai daerah *finger print* teridentifikasi spektrum PO_4^{3-} pada bilangan gelombang 1192 dan 1009 cm^{-1} [15]. Sebagai referensi, karakterisasi inhibitor sejenis telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya dengan hasil yang identik [5]. Sedangkan gugus fungsional inhibitor miko-DEA ditunjukkan pada Gambar 5 sebagai berikut.

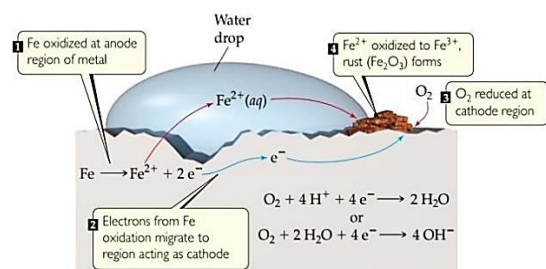


Gambar 5. Spektrum FTIR inhibitor miko-DEA, (a) hasil pengukuran, (b) referensi [16]

Formulasi Inhibitor Korosi Berbasis Zink-Fosfat dan Miko-DEA
 Pada Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy
 (Rosika Kriswari, Andon Insani, Mohammad Khotib, Komar Sutriah,
 Arif Nugroho, Juan Carlos Sihotang, Ade Saputra)

Spektrum pada Gambar 5 memberikan informasi adanya puncak serapan yang terdapat pada daerah bilangan gelombang 3350 cm^{-1} yang menandakan adanya gugus (-OH). Spektrum pada daerah bilangan gelombang 2922 dan 2848 cm^{-1} menandakan adanya gugus CH alifatik. Spektrum pada daerah bilangan gelombang 1445 cm^{-1} menandakan adanya gugus CH bending. Spektrum pada bilangan gelombang 1055 cm^{-1} menandakan adanya gugus CN bending. Spektrum pada bilangan gelombang 1630 cm^{-1} merupakan serapan khas pada karbonil (C=O) amida. Spektrum yang diperoleh masih terdapat sedikit serapan pada daerah bilangan gelombang 1721 cm^{-1} yang merupakan bahan baku asam lemak karboksilat yang belum membentuk gugus amida.

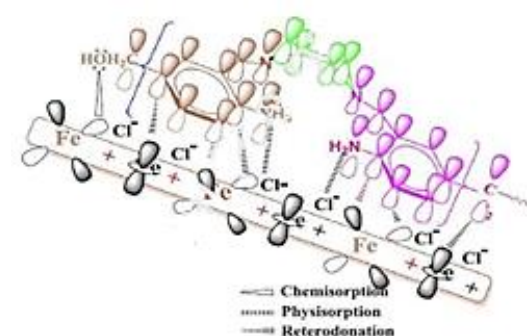
Pada sistem pipa sekunder RSG-GAS, oksigen dan gas-gas korosif lain dapat larut karena air pendingin dialirkan melalui menara pendingin yang berhubungan langsung dengan udara luar. Kondisi ini mengakibatkan pipa pendingin sekunder yang terbuat dari baja karbon mudah mengalami korosi. Proses terjadinya korosi seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Mekanisme korosi pada permukaan logam [17]

Pada Gambar 6 logam besi mengalami oksidasi pada kutub anoda sedangkan udara yang mengandung oksigen dan air pada kutub katoda mengalami reaksi reduksi. Dengan demikian besi mengalami oksidasi membentuk besi oksida dan besi hidroksida yang menimbulkan korosi dan karat. Mitigasi korosi didukung oleh data eksperimental seperti penurunan laju kerusakan sampel dengan peningkatan konsentrasi inhibitor, variasi linier dalam grafik pengukuran penurunan berat, penyimpangan pada lereng tafel [18]. Dalam kasus bahan kimia, ada pembentukan ikatan co-ordinat adsorpsi.

Mekanisme korosi yang terjadi ketika menggunakan inhibitor organik terdiri dari tiga jenis interaksi yaitu adsorpsi fisik, adsorpsi kimia dan reterodonasi [19]. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Mekanisme inhibitor korosi [19]

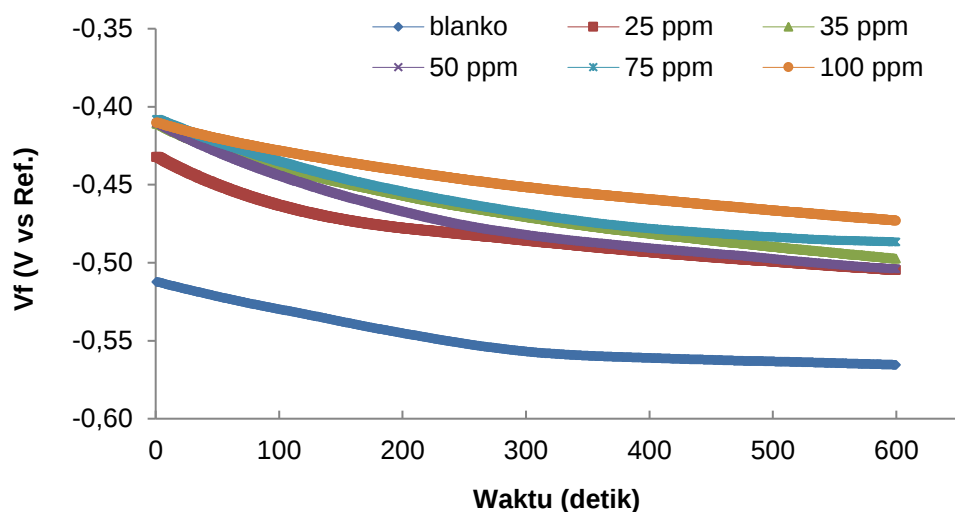
Berdasarkan pada Gambar 7, adsorpsi fisik terjadi karena adanya interaksi antara ion klorida dan ion amonium yang bermuatan atau dengan kata lain muatan pada molekul inhibitor organik berikatan dengan permukaan logam yang bermuatan listrik. Adsorpsi kimia terjadi karena terbentuknya ikatan antara pasangan oksigen pada inhibitor dan orbital kosong besi, dengan kata lain terjadi reaksi kimia antara pasangan elektron bebas yang tidak terikat dengan orbital-d yang tidak terisi pada permukaan logam untuk menghasilkan ikatan kimia koordinasi. Reterodonasi ditandai oleh transfer elektron dari orbital sampel yang terisi ke orbital kosong inhibitor. Untuk mengetahui interaksi antara inhibitor dengan logam besi dilakukan analisis spektrum dari sampel murni dan sampel dengan inhibitor menggunakan Infra Red (IR). Dengan membandingkan nomor gelombang spektrum sampel murni dan sampel yang dihambat dengan inhibitor, maka hal ini akan menunjukkan adanya interaksi antara permukaan sampel dan inhibitor [20].

Parameter-parameter yang terkait dengan inhibitor meliputi struktur kimia, distribusi muatan dan yang berkaitan dengan muatan permukaan logam. Efisiensi penghambatan molekul inhibitor organik meningkat ketika salah satu atom hidrogen pada atom karbon dalam cincin heterosiklik digantikan oleh gugus substituen aldehida, nitrosil, karboksil, atau amino. Reaksi anodik atau katodik juga terhambat ketika kepadatan elektron berubah pada logam ketika

berinteraksi dengan inhibitor. Dalam penelitian korosi, inhibitor organik ditambahkan ke lingkungan korosif, dan sampel logam atau paduan dipaparkan ke lingkungan korosif selama waktu tertentu. Kehilangan massa logam selama waktu paparan tertentu digunakan untuk menghitung laju korosi. Adanya inhibitor organik di lingkungan asam akan mengurangi kehilangan massa logam, sehingga mengurangi laju korosi. Ada berbagai model dalam penelitian yang menunjukkan mekanisme kerja inhibitor. Pada model terbaik yang diterima secara luas, molekul inhibitor diadsorpsi pada permukaan logam yang terkikis. Secara umum, adsorpsi memastikan penghilangan molekul air yang teradsorpsi pada permukaan logam. Stabilitas membran/lapisan molekul inhibitor organik yang diadsorpsi pada permukaan logam bergantung pada situs aktif, cincin aromatik, potensi hambatan sterik, kepadatan elektron

dalam molekul inhibitor, jenis larutan asam, dan sifat interaksi antara orbital-p dan orbital-d atom besi. Informasi dasar tentang mode penyerapan molekul organik pada permukaan logam dapat diekstraksi dari adsorpsi isotherm [21]. Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi inhibitor sebagai penghambat korosi adalah daya adsorpsi permukaan inhibitor, temperatur, konsentrasi inhibitor yang digunakan dan lingkungan sekitar [19].

Gambar 8 menunjukkan bahwa kurva OCP sampel LCS dalam larutan inhibitor miko-DEA memberikan tegangan kerja yang lebih positif dibanding dengan tegangan kerja larutan tanpa inhibitor. Hal ini menunjukkan bahwa semakin positif tegangan kerja maka pengaruh inhibitor dominan dalam proses menghambat laju korosi. Pada OCP 600 detik, tegangan kerja menunjukkan kecenderungan rata dengan beda tegangan < 5mV. Sehingga uji korosi bisa mulai dilakukan tanpa pengaruh faktor eksternal.



Gambar 8. Kurva OCP LCS variasi konsentrasi miko-DEA

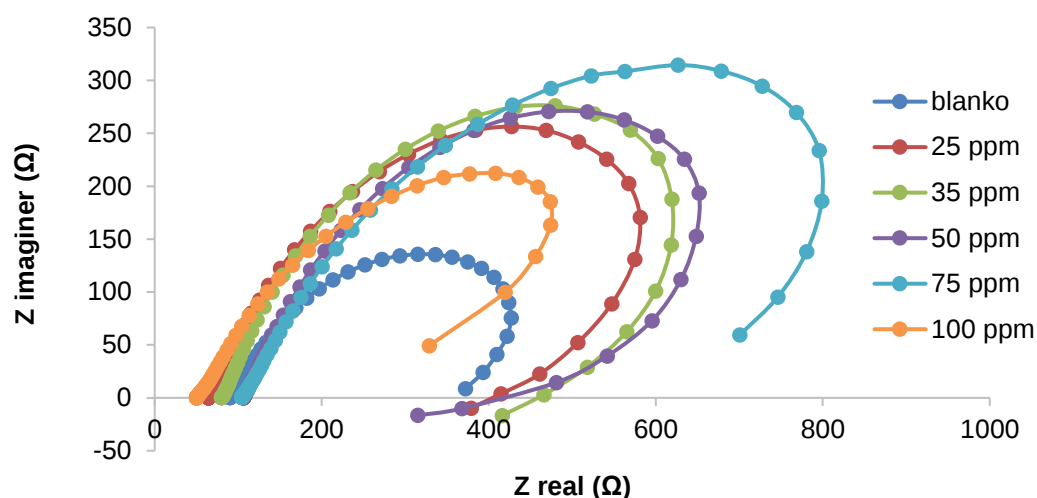
Pengujian EIS dilakukan untuk mengetahui perilaku korosi sampel LCS dalam larutan inhibitor miko-DEA pada konsentrasi yang bervariasi seperti yang dilakukan pada penelitian sebelumnya yang menggunakan larutan inhibitor zink-fosfat [22]. Hasil pengujian EIS ditunjukkan sebagai kurva *Niquist* pada Gambar 9.

Kurva *Nyquist* merupakan diagram X-Y yang menunjukkan plot antara impedansi nyata / Z real (ohm/Ω) pada sumbu-X dan impedansi imajiner / Z image (ohm/Ω) pada sumbu-Y. Berdasarkan *fitting* data pada

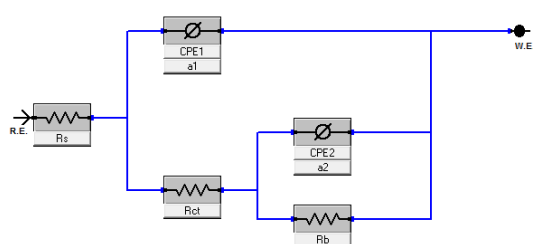
Gambar 9, maka diperoleh rangkaian listrik ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 10.

Pada umumnya penambahan inhibitor akan menaikkan tahanan transfer muatan (R_{ct}) sehingga menghambat transfer muatan atau elektron dari permukaan logam ke media larutan [23]. Dengan demikian reaksi oksidasi atom-atom besi dan reduksi ion dalam larutan menurun. Komponen yang terdapat pada rangkaian listrik pada Gambar 10 terdiri dari R_s , R_{ct} , R_b , CPE1 dan CPE2 [24]. Nilai kuantitatif komponen pada rangkaian listrik ditunjukkan pada Tabel 2.

Formulasi Inhibitor Korosi Berbasis Zink-Fosfat dan Miko-DEA
 Pada Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy
 (Rosika Kriswarini, Andon Insani, Mohammad Khotib, Komar Sutriah,
 Arif Nugroho, Juan Carlos Sihotang, Ade Saputra)



Gambar 9. Kurva Niquist LCS metode EIS variasi konsentrasi miko.DEA



Gambar 10. Rangkaian listrik ekivalen berdasarkan fitting Niquist pada Gambar 9

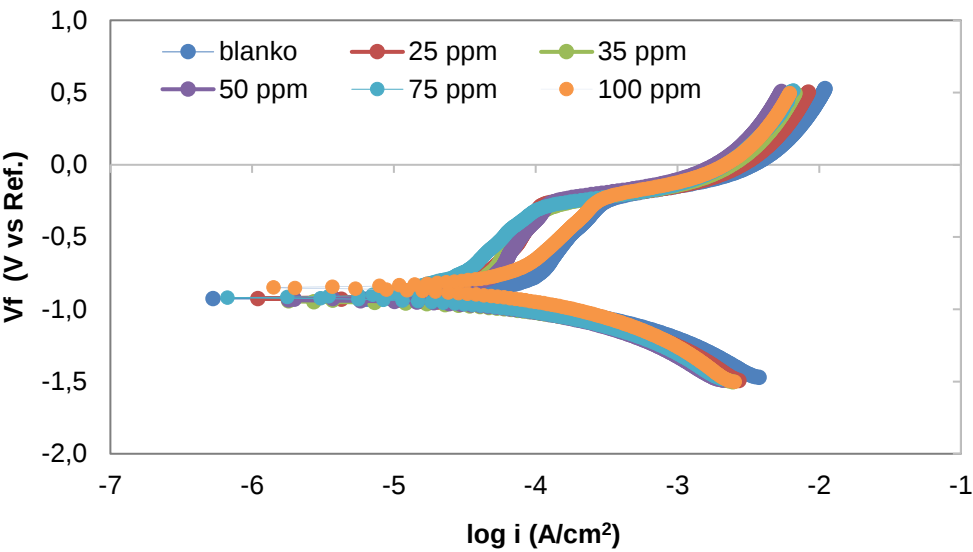
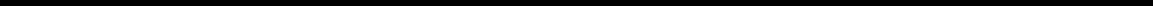
Laju korosi LCS dalam larutan inhibitor miko-DEA dalam NaCl 0,1% ditentukan melalui metode potensiodinamik. Hasil pengukuran LCS ditunjukkan pada Gambar 11. Berdasarkan Gambar 11, proses pelapisan permukaan substrat oleh inhibitor tergantung pada konsentrasi inhibitor dan diinterpretasikan dengan nilai arus (i) pada sumbu-X. Pada sumbu-Y nilai V (tegangan) -1,5 V sampai dengan -1,0 V pada katoda terjadi reaksi reduksi dan pada tegangan

>-1.0 V sampai 0,5 V pada anoda terjadi reaksi oksidasi. Hasil *fitting* dengan metode *tafel* pada kurva potensiodinamik diperoleh nilai arus korosi i_{corr} dan perhitungan efisiensi inhibitor berdasarkan i_{corr} . Hal ini dinyatakan pada Tabel 3.

Tabel 3 menunjukkan bahwa laju korosi menurun sampai dengan konsentrasi 75 ppm yaitu 9,59 mpy. Namun, pada konsentrasi 100 ppm, laju korosi meningkat lagi menjadi 23,57 mpy. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, laju korosi optimal menggunakan inhibitor zink-fosfat pada konsentrasi 35 ppm sebesar 11,70 mpy dengan efisiensi inhibitor 44,21% [22]. Sesuai Tabel 3, laju korosi optimal menggunakan inhibitor miko-DEA pada konsentrasi 75 ppm sebesar 9,59 mpy dengan efisiensi inhibitor 65,90%. Pada konsentrasi 100 ppm laju korosi kembali naik karena setelah konsentrasi optimal inhibitor mengandung ion Cl sebagai penyusun zink fosfat yang berlebih, sehingga menimbulkan kerak yang berakibat meningkatkan laju korosi.

Tabel 2. Komponen listrik LCS variasi konsentrasi inhibitor miko.DEA dalam NaCl 0,1%.

Konsentrasi inhibitor (ppm)	R_s (Ω)	R_{ct} (Ω)	R_b (Ω)	CPE1	CPE2	GoF
0	105,1	563,4	161,6	1,8e-3	3,9,e-4	1,5.e-3
25	90,0	334,5	167,3	2,3e-3	1,7e-6	3,0.e-4
35	64,8	295,8	460,2	1,7e-3	1,6e-6	6,1.e-4
50	81,5	230,5	376,5	9,0e-4	1,1e-3	1,6.e-4
75	1106,7	212,1	808,8	1,4e-3	9,2e-2	2,2.e-4
100	50,7	437,2	601,0	3,0e-3	2,4e-7	6,8.e-4



Gambar 11. Kurva potensiodinamik LCS variasi konsentrasi inhibitor miko-DEA

Tabel 3. Nilai i_{corr} dan efisiensi inhibitor (IE) miko.DEA dalam NaCl 0,1%

Konsentrasi inhibitor (ppm)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Laju korosi (mpy)	Efisiensi Inhibitor (%)
0	42,41	28,12	-
25	27,27	18,08	35,70
35	26,93	17,86	36,49
50	25,93	17,19	38,87
75	14,46	9,59	65,90
100	35,55	23,57	16,18

Setelah diperoleh kondisi optimal laju korosi untuk inhibitor zink fosfat dan miko-DEA, maka dilakukan uji korosi untuk inhibitor gabungan zink-fosfat dan miko-DEA. Analisis uji korosi menggunakan metode *full factorial*. Hasil perhitungan laju korosi ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai i_{corr} dan efisiensi inhibitor (IE) campuran zink-fosfat dan miko-DEA dalam NaCl 0,1%

Konsentrasi zink fosfat (ppm)	Konsentrasi miko.DEA (ppm)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion Rate (mpy)	Efisiensi Inhibitor (%)
0	0	42,8	28,12	-
25	50	22,7	14,90	47,01
25	75	19,9	13,13	53,31
25	100	24,5	16,12	42,67
35	50	27,7	18,52	35,28
35	75	24,4	16,01	43,07
35	100	27,5	18,07	35,74
50	50	17,2	11,32	59,74
50	75	16,1	10,57	62,41
50	100	23,3	15,95	43,28

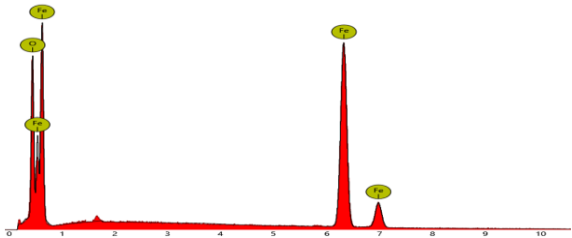
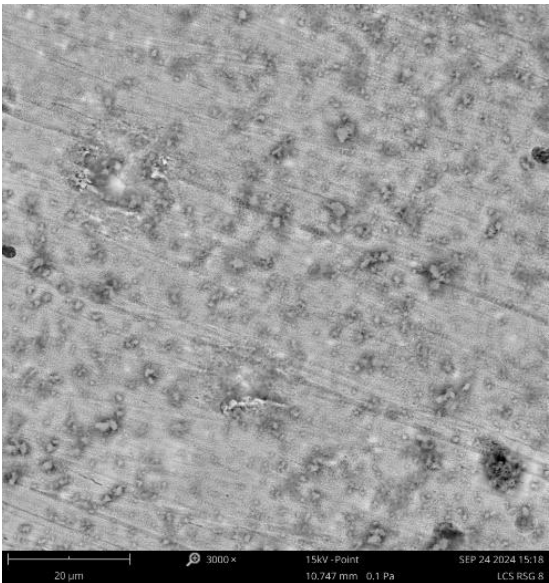
Sesuai dengan Tabel 4, diperoleh kondisi laju korosi optimal pada campuran inhibitor zink-fosfat maupun miko-DEA masing-masing pada konsentrasi 50 ppm dengan efisiensi inhibitor 62,41%. Nilai efisiensi campuran inhibitor lebih rendah dari

Formulasi Inhibitor Korosi Berbasis Zink-Fosfat dan Miko-DEA
Pada Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy
(Rosika Kriswarini, Andon Insani, Mohammad Khotib, Komar Sutriah,
Arif Nugroho, Juan Carlos Sihotang, Ade Saputra)

efiensi miko-DEA tetapi lebih tinggi daripada zink-fosfat. Hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya inhibitor miko-DEA akan menurunkan laju korosi karena miko-DEA mampu menghambat pembentukan kerak akibat terbentuknya FePO_4 (persamaan 3). Dengan demikian adanya inhibitor miko-DEA bersama dengan inhibitor zink-fosfat mampu menurunkan laju korosi dari 11,70 mpy menjadi 10,57 mpy yang artinya inhibitor miko-DEA mampu meningkatkan efisiensi

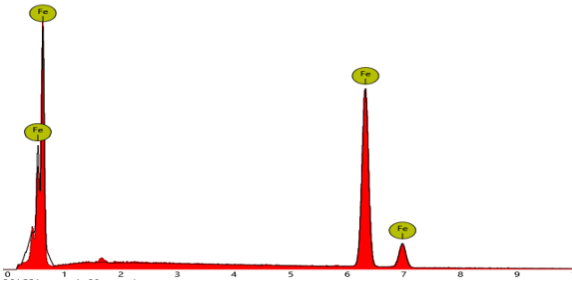
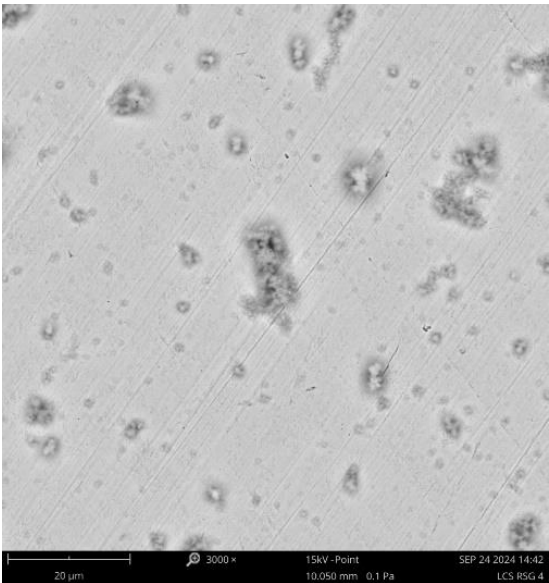
inhibitor dari 44,21% ketika hanya menggunakan inhibitor zink-fosfat menjadi 62,41% dalam campuran zink fosfat dan miko-DEA.

Pengamatan morfologi LCS sebelum dan sesudah inhibisi menggunakan SEM EDS dilakukan untuk melihat perbedaan permukaan sampel hasil uji korosi tanpa menggunakan inhibitor maupun setelah menggunakan inhibitor. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 12.



Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
26	Fe	Iron	68.61	88.41
8	O	Oxygen	31.39	11.59

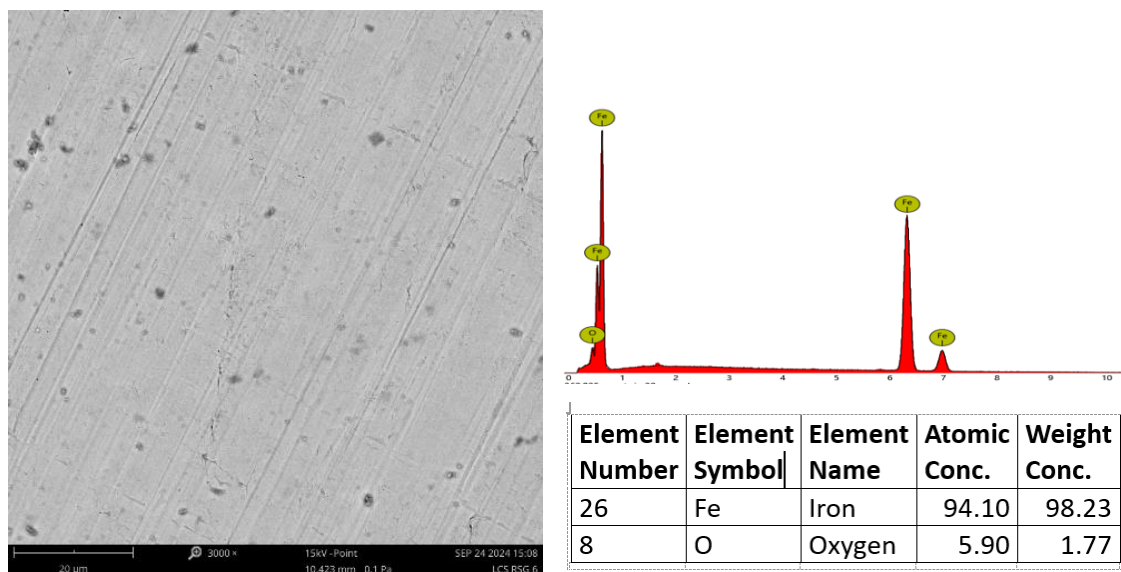
(a) Tanpa Inhibitor



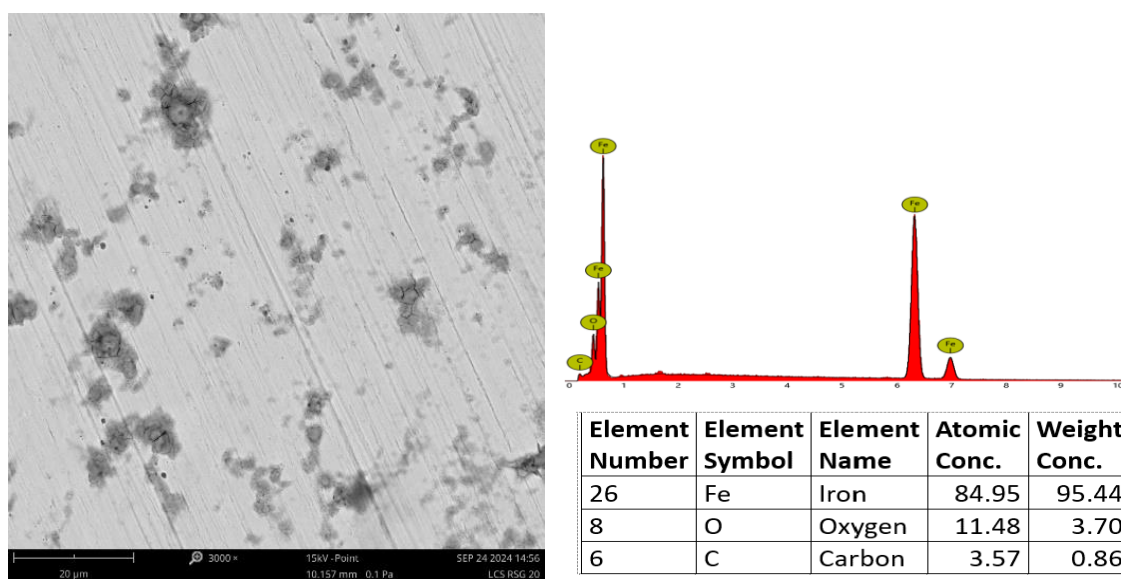
Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
26	Fe	Iron	100.00	100.00

(b) Inhibitor Zink-Fosfat

Formulasi Inhibitor Korosi Berbasis Zink-Fosfat dan Miko-DEA
 Pada Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy
 (Rosika Kriswarini, Andon Insani, Mohammad Khotib, Komar Sutriah,
 Arif Nugroho, Juan Carlos Sihotang, Ade Saputra)



(c) Inhibitor Miko-DEA



(d) Inhibitor Campuran Zink-Fosfat dan miko-DEA

Gambar 12. Pengamatan permukaan sampel LCS (a) tanpa inhibitor, (b) menggunakan inhibitor zink-fosfat, (c) menggunakan inhibitor miko-DEA dan (d) menggunakan inhibitor campuran zink-fosfat dan miko-DEA

Pada Gambar 12(a) uji korosi dilakukan tanpa menggunakan inhibitor. Berdasarkan evaluasi EDS ditunjukkan bahwa permukaan sampel LCS sebelum inhibisi terdiri dari Fe dan O. Hal ini menunjukkan bahwa dalam proses korosi Fe berikatan dengan O membentuk besi oksida. Pada Gambar 12(b) menunjukkan bahwa permukaan sampel hasil uji korosi menggunakan inhibitor zink fosfat

menunjukkan permukaan yang lebih bersih dibanding 12(a). Hal ini menunjukkan bahwa inhibitor zink fosfat berhasil melapisi permukaan sampel dengan didukung hasil EDS sehingga Fe sebesar 100%. Pada Gambar 12(c) permukaan sampel hasil uji korosi menggunakan inhibitor miko-DEA mirip dengan 12(b) tetapi berdasarkan EDS komposisi unsur pada 12(d) mengandung C selain unsur Fe dan O. Unsur C terdapat dalam

Formulasi Inhibitor Korosi Berbasis Zink-Fosfat dan Miko-DEA
 Pada Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy
 (Rosika Kriswarini, Andon Insani, Mohammad Khotib, Komar Sutriah,
 Arif Nugroho, Juan Carlos Sihotang, Ade Saputra)

inhibitor miko-DEA karena miko-DEA termasuk inhibitor organik. Sementara itu, sesuai dengan Gambar 12(d) permukaan sampel hasil uji korosi menggunakan inhibitor campuran zink-fosfat dan miko-DEA menunjukkan bahwa inhibitor campuran tersebut berhasil melapisi permukaan sampel dengan didukung oleh hasil analisis EDS yang menunjukkan komposisi unsur terdiri dari Fe, O dan C. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa penggunaan inhibitor zink-fosfat dan miko-DEA cukup berhasil menghambat laju korosi LCS, yang ditunjukkan oleh permukaan sampel hasil uji korosi bisa memberikan komposisi yang berbeda akibat efek inhibisi dan adsorpsi. Permukaan sampel yang dikenai inhibitor lebih bersih dibanding tanpa inhibitor.

KESIMPULAN

Penambahan inhibitor campuran zink-fosfat dan miko-DEA meningkatkan ketahanan korosi baja karbon rendah dari laju korosi 28,12 mpy tanpa inhibitor menjadi 10,57 mpy dengan menggunakan inhibitor. Konsentrasi optimal inhibitor campuran terdiri dari zink-fosfat pada konsentrasi 50 ppm dan miko-DEA pada konsentrasi 75 ppm. Efisiensi inhibitor campuran sebesar 62,41%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami sebagai penulis mengucapkan terimakasih kepada bapak Dr. Maman Kartaman Ajiriyanto atas diskusi tentang *basic science* dan *research novelty*, bapak Septian yang telah membantu dalam preparasi sampel uji, Ibu Noviarty S.ST yang memberikan masukan teknis penyiapan media larutan inhibitor serta bapak Abdul Aziz, bapak Ilham dan bapak Setio Budi Utomo yang telah berkenan memberikan sampel LCS dan larutan inhibitor sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Kuntoro, *Keselamatan Reaktor Nuklir RSG-GAS*. BRIN, 2018.
- [2] S. Sriyono et al., "The Debris Particles Analysis of RSG GAS Coolant to Anticipate Sediment Induced Corrosion," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 18, no. 1, p. 11, Oct. 2016, doi: 10.17146/jpen.2016.18.1.2675.
- [3] X. Chen et al., "Synthesis and electrochemical performance of vanadium sulfide as novel anode for lithium ion battery application," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, pp. 1–10, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01304-1>.
- [4] V. Asadi et al., "The Effect of Immersion Time and Immersion Temperature on the Corrosion Behavior of Zinc Phosphate Conversion Coatings on Carbon Steel," vol. 18, no. 4, pp. 706–713, 2015, doi: DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.343814>.
- [5] R. Kusumastuti, S. Sumaryo, and S. Sriyono, "Effect of Dukem Inhibitor on AISI 1010 in The Secondary Cooling System of RSG GAS," *J. Teknol. Reakt. Nukl. TRI DASA MEGA*, vol. 20, no. 2, p. 99, Aug. 2018, doi: 10.17146/tdm.2018.20.2.4471.
- [6] M. K. Ajiriyanto, R. Kriswarini, and D. E. Lestari, "Analisis Korosi Pipa Pendingin Sekunder RSG-GAS Dengan Teknik Electrochemical Impedance Spectroscopy," vol. 24.
- [7] H. Wan, D. Song, X. Li, D. Zhang, J. Gao, and C. Du, "Effect of Zinc Phosphate on the Corrosion Behavior of Waterborne Acrylic Coating/Metal Interface," *Materials*, vol. 10, no. 6, p. 654, Jun. 2017, doi: 10.3390/ma10060654.
- [8] D. Kumar et al., "One-Pot Solvent-Free Synthesis of N,N-Bis(2-Hydroxyethyl) Alkylamide from Triglycerides Using Zinc-Doped Calcium Oxide Nanospheroids as a Heterogeneous Catalyst," *catalysts*, vol. 9, no. 774, pp. 1–14, 2019.
- [9] K. Yuniasri, "Sintesis Coco-Diethanolamide dari Minyak Kelapa dengan Meode Amidasi." *Jurnal Riset Industri*, 2007.
- [10] L. A.R et al., "Kinetic Study on Synthesis of Alkanolamides of Fatty Acids of Mangokernel Oil (Mangifera Indica Linn)," *Int. J. Eng. Dev. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 444–450, 2016.
- [11] P. Setopramono, "Produksi Asam Lemak Dari Minyak Kelapa Sawit Dengan Proses Hidrolisis," *J. Tek. Kim.*, vol. 7, no. 1, pp. 26–31, 2012.
- [12] V. A. Umami, "Sintesis Biodiesel Dari Minyak Jelantah Dengan Gelombang Mikro." *UNNES*, 2015.
- [13] Z. Bensouda et al., "Extraction, Characterization and Anticorrosion

- Potential of an Essential Oil from Orange Zest as Eco-friendly Inhibitor for Mild Steel in Acidic Solution," *J. Bio-Tribo-Corros.*, vol. 5, no. 84, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s40735-019-0276-y>.
- [14] S. Dahiya et al., "Advanced quantum chemical and electrochemical analysis of ravage drugs for corrosion inhibition of mild steel," *J. Adhes. Sci. Technol.*, pp. 1–25, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1576353>.
- [15] S.-H. Jung et al., "Sonochemical Synthesis of Amorphous Zinc Phosphate Nanospheres," *Bull. Korean Chem. Soc.*, vol. 30, no. 10, pp. 2280–2282, 2009.
- [16] M. S. Ningrum, "Sintesis Fatty Acid Diethanolamide (FADEA) Berbasis Minyak Kotor (MiKo) Sawit Dengan Teknik Mikrogelombang." IPB University, 2022.
- [17] R. Edra, "Pengertian Korosi dan Faktor Penyebabnya," <https://staging-blog.sirogu.com/blog/pengertian-korosi-dan-faktor-penyebabnya>.
- [18] A. S. Fouda and A. A. Badawy, "Adsorption and Corrosion Inhibition of Cu in Nitric Acid by Expired Simvastatin Drug," *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, vol. 55, no. 3, pp. 1–11, 2019.
- [19] S. Sharma et.al and A. Kumar, "Recent advances in metallic corrosion inhibition: A review," *J. Mol. Liq.*, pp. 1–46, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114862>.
- [20] A. M. Guruprasad et.al, "Adsorption and inhibitive properties of seroquel drug for the corrosion of zinc in 0.1 M hydrochloric acid solution," *Int. J. Ind. Chem.*, pp. 1–14, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s40090-018-0168-x>.
- [21] A. Kadhim et.al, "A mini review on corrosion, inhibitors and mechanism types of mild steel inhibition in an acidic environment," *Int J Corros Scale Inhib*, vol. 10, no. 3, pp. 861–884, 2021, doi: <https://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-3-2>.
- [22] R. Kriswarini, "Perilaku Korosi Baja Karbon Rendah Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Dalam Inhibitor Zink Fosfat," *Urania*, vol. 30, no. 1, pp. 1–10, 2024. doi:<https://doi.org/10.55981/Urania.2024.7059>.
- [23] M. Gobara et.al, "Corrosion protection mechanism of Ce4+/organic inhibitor for AA2024 in 3.5% NaCl," *RSC Adv.*, vol. 10, pp. 2227–2240, 2020, doi: [10.1039/c9ra09552g](https://doi.org/10.1039/c9ra09552g).
- [24] C. Yang Li et al., "In vitro corrosion resistance of a Ta2O5 nanofilm on MAO coated magnesium alloy AZ31 by atomic layer deposition," *Bioactive Materials*, p. 38, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.001>.