

## APLIKASI CERIUM-NANOPORI DIATOM ALGA EKSOSKELETON UNTUK PROTEKSI KOROSI AKTIF PADA COATING EPOKSI-AMINA BAJA KARBON RENDAH

Vinda Puspasari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Penelitian Metalurgi dan Material-Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia  
e-mail :<sup>1</sup>vind001@lipi.go.id

### ABSTRACT

Carbon steel becomes a main material which mainly used in infrastructure, transportation, weaponry, and utensils. Corrosion properties of carbon steel can be increased using coating and inhibitors. In this study, the effect of inhibitor addition to corrosion resistance of carbon steel will be studied. Epoxy-amine coating as base coat is chosen because of its properties such as environmental friendly and easy to use. However, the using of hexavalent chromium (CrVI) –based corrosion inhibitors are carcinogenic and toxic to environment. Diatom algae exoskeleton is used to minimize the negative inhibitor-coating matrix interactions so that it will be more friendly to environment. These minerals can be used as storage inhibitors due to their unique characteristics which are environmentally friendly and have nanopores that are time released or can be regulated by the time of inhibitor release. The use of micron sized nanoporous diatom algae exoskeletons for inhibitor storage and sustained corrosion protection of coated carbon steel materials upon damage is presented. Electrochemical testing was conducted to evaluate the effect of inhibitor addition and corrosion protection by loaded diatom algae exoskeletons. The experiment results show that the corrosion rate of 0,5 grams addition of diatom alga exoskeleton and 0,5 grams cerium to carbon steel materials show the highest corrosion rate of all samples.

**Keywords :** carbon steel, diatom algae exoskeleton, inhibitor, electrochemical test, corrosion rate.

### INTISARI

Baja menjadi material utama dalam infrastruktur, transportasi, persenjataan, dan alat perkakas. Sifat dan karakteristik korosi pada baja karbon dapat ditingkatkan dengan penggunaan coating dan inhibitor. Dalam penelitian ini, efek penambahan inhibitor terhadap ketahanan korosi akan dievaluasi. Coating epoksi-amina sebagai lapisan dasar dipilih karena sifatnya yang ramah lingkungan dan mudah untuk diaplikasikan. Namun, penggunaan inhibitor berbasis hexavalent chromium (CrVI) sangat berbahaya bagi lingkungan karena bersifat karsinogenik dan bersifat racun bagi lingkungan. Oleh karena itu, diatom alga eksoskeleton digunakan untuk meminimalkan interaksi negative antara inhibitor dan coating pada matriks sehingga akan lebih ramah lingkungan. Mineral ini dapat digunakan sebagai penyimpan inhibitor dikarenakan sifatnya yang unik yaitu ramah lingkungan dan memiliki pori berukuran nano yang dapat diatur pelepasannya dalam menyimpan inhibitor. Penggunaan nanopori diatom alga eksoskeleton untuk penyimpan inhibitor dan proteksi korosi pada coating baja karbon telah dipelajari. Pengujian elektrokimia dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan inhibitor dan proteksi korosi oleh penambahan diatom alga eksoskeleton. Hasil percobaan menunjukkan bahwa laju korosi pada sampel baja karbon dengan penambahan 0,5 gram diatom alga eksoskeleton dan 0,5 gram cerium menunjukkan laju korosi tertinggi dari semua sampel.

**Kata kunci :** baja karbon, diatom alga eksoskeleton, inhibitor, uji elektrokimia, laju korosi.

### 1. PENDAHULUAN

Korosi merupakan masalah yang penting untuk diperhatikan khususnya dalam bidang industri. Korosi dapat mengakibatkan kerusakan dan kebocoran pada pipa gas dan minyak, kerusakan pada bangunan, gedung, jembatan, bahkan kapal (Valipour *et al.*, 2014). Korosi dapat mengikis material dan mengakibatkan penurunan sifat mekanik yang dapat mengakibatkan kegagalan (Poursaee, 2010). Salah satu solusi untuk menghambat korosi pada material yaitu dengan proses *coating*. *Coating* merupakan proses pelapisan permukaan logam dengan cairan atau serbuk, yang melekat secara kontinu pada logam yang dilindungi (Asri *et al.*, 2017). Adanya lapisan pada permukaan logam dapat meminimalkan kontak antara logam dengan lingkungannya sehingga mencegah proses terjadinya korosi atau terbentuknya oksida di permukaan logam. *Coating* dapat berupa *coating* logam, anorganik, dan organik, dimana *coating* organik yang dipilih dalam penelitian ini yaitu *coating* epoksi-amina dikarenakan ramah lingkungan dan penggunaannya lebih mudah (Chou *et al.*, 2001). Inhibitor umumnya digunakan untuk meningkatkan proteksi korosi diiringi dengan penggunaan *coating* pada material (Aribo *et al.*, 2017). Metode penambahan inhibitor merupakan metode yang murah dan banyak digunakan di industri. Namun, inhibitor umumnya memiliki efek yang negatif yaitu dapat merusak lingkungan dan bersifat karsinogenik contohnya inhibitor yang mengandung unsur *hexavalent chromium* (CrVI) (Hosseini *et al.*, 2011).

Tantangan saat ini adalah meminimalkan efek negatif inhibitor terhadap lingkungan yaitu dengan meminimalkan interaksi negatif antara inhibitor dengan matriks sehingga inhibitor dapat lebih efisien, dan mengontrol waktu pelepasan inhibitor terhadap waktu. Ketika konsentrasi inhibitor menjadi menjadi cukup tinggi, kerapatan arus katodik pada potensial pasifasi primer menjadi lebih tinggi dari kerapatan arus kritis anodik, sehingga menggeser potensial ke arah stabil dan akibatnya logam terpasifasi. Inhibitor akan mengurangi laju dari salah satu atau kedua reaksi parsial (oksidasi anoda atau reduksi katoda). Salah satu cara meminimalkan efek negatif inhibitor terhadap lingkungan yaitu dengan menggunakan metode enkapsulasi yang dapat menyimpan inhibitor sehingga dapat mengontrol pelepasan inhibitor dengan beberapa mekanisme yaitu difusi, derajat keasaman (pH), redoks, dan pertukaran ion (Mulyaningsih, 2019). Metode enkapsulasi juga mencegah reaksi negatif yang tidak diinginkan dari inhibitor dengan sekeliling matriks dan mencegah pelepasan inhibitor yang terlalu cepat yang dapat menyebabkan penggelembungan pada lapisan *coating* substrat (*blistering*) (Denissen & Garcia, 2017).

Diatom adalah grup dari uniseluler alga dengan nanopori eksoskeleton silika yang berbentuk unik. Spesies ini dapat ditemukan dalam bentuk mineral (*diatomaceous earth*) dengan variasi ukuran partikel (2 $\mu$ m – 4 mm) dengan bentuk yang bermacam-macam (bintang, silinder, oval, dan lempengan) serta variasi nanopori (Aw *et al.*, 2013). Diatom alga eksoskeleton berfungsi sebagai struktur “pill-box” yang dapat menyimpan dan mengatur pelepasan inhibitor terhadap waktu (Wang *et al.*, 2013). Inhibitor korosi yang digunakan yaitu cerium nitrat dengan penambahan diatom alga eksoskeleton dan kalium kromat sebagai pembanding. Cerium nitrat  $Ce(NO_3)_3$  dipilih dikarenakan ion trivalen cerium ( $Ce^{3+}$ ) diketahui sebagai inhibitor korosi yang sangat baik pada baja karbon medium. Cerium Nitrat  $Ce(NO_3)_3$  akan disimpan di dalam diatom alga eksoskeleton sehingga penggunaannya akan lebih efektif. Pengaruh penambahan cerium nitrat pada coating epoksi-amina yang diaplikasikan pada substrat baja karbon medium dalam media NaCl 0,1 M akan dipelajari dengan menggunakan alat elektrokimia yang dilengkapi dengan potensiostat. Sampel yang telah dicoating dan dienkapsulasi dengan inhibitor direndam dalam larutan NaCl pada waktu tertentu untuk mengetahui peran inhibitor korosi dalam mengendalikan korosi dalam sampel.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu substrat baja karbon dengan ketebalan 1,5 mm dan dimensi 2x2 cm, resin epoksi, *crosslinker* amina, *xylene*, aqua DM, *Diatomaceous Earth* (DE). Larutan yang digunakan meliputi *Cerium Nitrat* ( $Ce(NO_3)_3$ ),  $K_2Cr_2O_7$ , NaCl 0,1 M, dan NaOH 2 M. Alat yang digunakan yaitu: timbangan, pipet gelas, gelas kimia, kertas saring, batang pengaduk, *magnetic stirrer*, tungku untuk memanaskan sampel yang telah dicoating.

### 2.2. Pembuatan sampel penelitian

Pembuatan sampel penelitian ini terdiri dari beberapa tahap yaitu:

#### 1. Pembuatan Cerium-Nanopori Diatom Alga Eksoskeleton (*Cerium-Diatomaceous Earth*)

##### a. Proses *Refining* Nanopori Diatom Alga Eksoskeleton

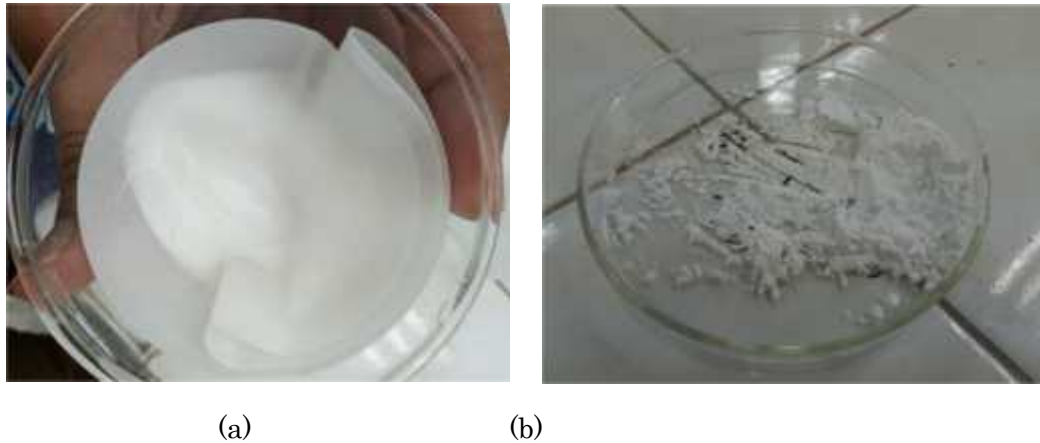
Proses *refining* bertujuan untuk mengurangi kadar pengotor. Proses ini dimulai proses pelarutan *Diatomaceous Earth* seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dengan melarutkan 10 gram mineral *diatomaceous earth* ke dalam 100 ml aqua DM. Proses pelarutan dibantu dengan pengadukan menggunakan *stirrer* pada temperatur 64 $^{\circ}$ C selama 30 menit agar mendapatkan larutan yang merata.



Gambar 1. Proses Pelarutan *Diatomaceous Earth*

Bagian supernatan (terdiri dari cairan pengotor yang mengapung di atas larutan) diambil dan dipisahkan dengan menggunakan pipet gelas. Gambar 2. a. menunjukkan proses *refining* pada *diatomaceous earth*.

Proses *refining* diulangi selama 5 kali agar serbuk *diatomaceous earth* benar-benar bersih. Setelah itu disaring dengan kertas saring agar mendapatkan serbuk halus yang bebas pengotor dan dikeringkan di oven selama 12 jam pada temperatur 60°C. Serbuk *diatomaceous earth* yang halus dan bebas pengotor dapat dilihat pada Gambar 2.b.



**Gambar 2.** Pembuatan sampel penelitian (a) Proses *Refining Diatomaceous Earth*, (b) Hasil *Diatomaceous Earth Refined*

b. Proses *Doping* dengan Cerium Nitrat ( $Ce(NO_3)_3$ )

Proses *doping* dilakukan dengan mencampurkan larutan cerium nitrat sebanyak 0,1 gram dengan serbuk halus *diatomaceous earth* sebanyak 0,1 gram dan ditambahkan 10 mL air demineralisasi. Campuran tersebut dilakukan pengadukan dengan stirer agar campuran homogen dan merata. Selanjutnya dilakukan pengeringan dalam tungku pada temperatur 80°C selama 6 jam dan didapatkan serbuk CE-DE dengan komposisi 0,1 gr CE- 0,1 gr DE. Cara yang sama dilakukan untuk variasi enkapsulasi sampel dengan 0,5 gr CE- 0,5 gr DE.

**2.3 Coating Substrat Baja Karbon Medium**

Substrat terlebih dahulu dibersihkan dengan kertas amplas dan direndam di dalam larutan NaOH 2M. Coating organik dibuat dengan terlebih dahulu dengan menyiapkan larutan epoksi-amina-xylene dengan perbandingan massa 3:2:1. Setelah itu dilakukan pengadukan menggunakan stirer selama 5 menit dan didiamkan pada temperatur kamar selama 30 menit sebelum ditambahkan inhibitor.

Semua sampel yang akan dievaluasi inhibitor korosinya menggunakan epoksi-amina sebagai coating dasar. Setelah itu ditambahkan inhibitor (serbuk cerium-nitrat (CE), serbuk cerium-*diatomaceous earth* (CE-DE), dan  $K_2Cr_2O_7$ ) yang divariasikan sesuai pada Tabel 1. Selanjutnya campuran epoksi-amina dengan inhibitor dilakukan pengadukan dengan stirer supaya homogen. Proses *coating* dilakukan dengan metode *dip coating* selama 15 menit dan dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali agar lapisan *coating* benar-benar menempel. Selanjutnya dilakukan proses *curing* pada temperatur 60°C selama 2 jam dan didapatkan sampel baja karbon medium yang siap untuk diuji dan dikarakterisasi.

**Tabel 1.** Penamaan Sampel.

Nama Sampel	Inhibitor	Massa inhibitor
Sampel 1	-	-
Sampel 2	CE-DE	0,1 gram CE- 0,1 gram DE
Sampel 3	CE-DE	0,5 gram CE – 0,5 gram DE
Sampel 4	CE	0,5 gram CE
Sampel 5	$K_2Cr_2O_7$	0,5 gram $K_2Cr_2O_7$

**2.4 Pengujian Korosi**

Proses pengujian korosi menggunakan larutan NaCl 0,1 M dengan prinsip elektrokimia menggunakan *software Gamry*. Pengukuran polarisasi dilakukan dengan metode Tafel. Sampel yang telah *dicoating* ditempatkan secara vertikal di dekat elektroda *counter* dan *reference*. Selama pencelupan di dalam larutan NaCl 0,1 M, dilakukan pengukuran arus, potensial, dan laju korosi yang terjadi.

**2.5 Karakterisasi SEM dan EDS**

Scanning electron microscope yang digunakan dalam penelitian ini yaitu JEOL Model JSM-5400 untuk menganalisis morfologi produk korosi sampel. Komposisi kimia produk korosi dianalisis menggunakan EDS.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil OES Spesimen Baja Karbon

*Optical electron spectroscoy* digunakan untuk mengetahui kadar unsur yang terkandung dalam material sehingga kita dapat mengetahui jenis material yang kita gunakan. Sampel OES berukuran 2x4 cm dan dilakukan penembakan dengan menggunakan gas argon seperti ditunjukkan pada Gambar. 3.



Gambar 3. Hasil OES pada Sampel Baja Karbon Medium

Unsur	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Kadar	99,8	0,0328	<0,01	0,087	<0,005	<0,005	0,02	<0,005	<0,005
Unsur	Nb	Ti	V	W	Pb	Cu	Co		
Kadar	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,01	<0,005	0,0057		

Tabel 2. Komposisi Unsur Material Sampel dengan Uji OES.

Tabel 2 menunjukkan hasil OES sampel baja karbon dan dapat diketahui kadar karbon yaitu 0,0328 yang menandakan sampel adalah baja karbon rendah dikarenakan memiliki kadar kurang dari 0,5%. Material ini merupakan logam paduan rendah karena memiliki paduan dengan jumlah kurang dari 10% yang terdiri dari C, Si, Mn, P, S, dan Cr.

#### 3.2 Hasil Coating

*Coating* dilakukan pada sampel baja karbon berukuran 2x2 cm. *Coating* divariasikan berdasarkan enkapsulasi dengan menggunakan *diatomaceous earth* dan penggunaan inhibitor. Sampel *dicoating* dengan metode *dip coating* yaitu *coating* dengan pencelupan selama 10 menit dan dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali agar lapisan menempel dengan sempurna. Hasil *coating* dapat dilihat pada gambar berikut.

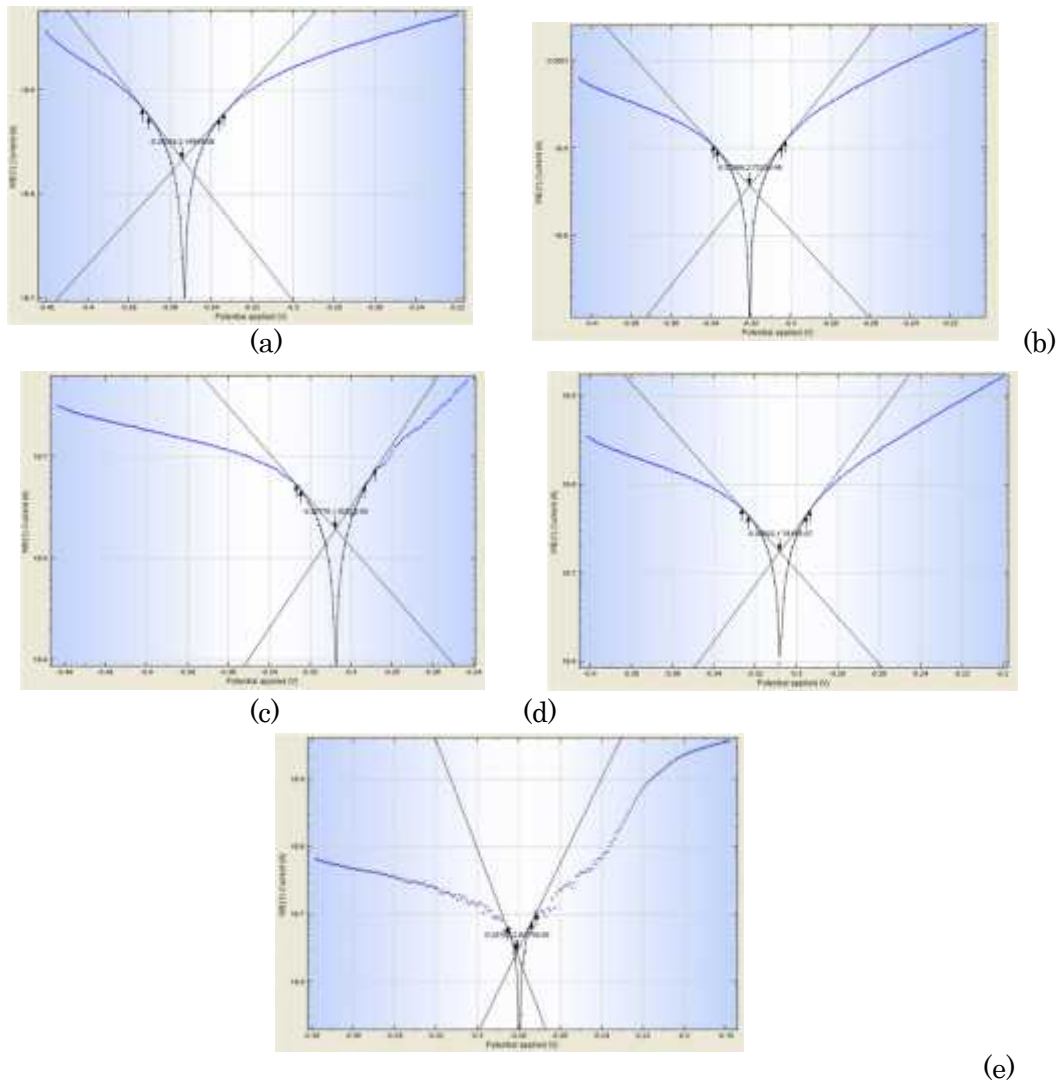


Gambar 4. Hasil *Coating* pada Sampel Baja Karbon Rendah

Gambar 4 menunjukkan hasil *coating* dengan variasi inhibitor pada sampel baja karbon rendah. Hasil *coating* masih memiliki permukaan yang kurang merata dan masih terdapat gelembung pada sampel. Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa Sampel 5 dengan penambahan inhibitor serbuk  $K_2Cr_2O_7$  menunjukkan gelembung paling banyak dibanding sampel yang lain dikarenakan kelarutan dari  $K_2Cr_2O_7$  sangat tinggi dan menyebabkan fenomena *blistering* pada *coating* (Denissen & Garcia, 2017).

#### 3.3 Polarisasi Tafel

Pengujian korosi dilakukan untuk mengetahui laju korosi pada spesimen baja karbon medium berdasarkan pengaruh adanya variasi inhibitor menggunakan polarisasi tafel dengan media larutan NaCl 0,1M. Hasil polarisasi tafel ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Hasil Polarisis Tafel pada Sampel Baja Karbon dengan Variasi Inhibitor (a) tanpa inhibitor, (b) 0,1 gr CE-0,1 gr DE, (c) 0,5 gr CE- 0,5 gr DE, (d) CE, (e)  $K_2Cr_2O_7$ .

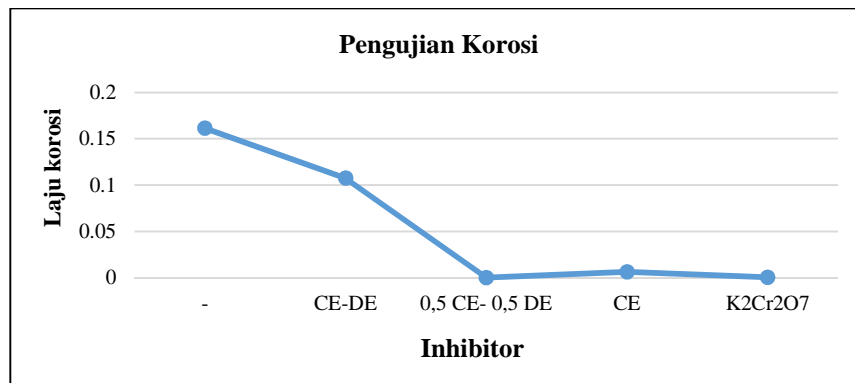
Gambar 5 menunjukkan hasil polarisis tafel dengan variasi penambahan inhibitor. Terdapat perbedaan Kurva polarisis tafel pada setiap sampel. Semakin besar penambahan kadar inhibitor dalam larutan, maka rapat arus yang dihasilkan akan cenderung bergeser ke bawah atau bernilai semakin kecil (Kadhun *et al.*, 2018). Hal ini dapat dilihat dengan penambahan massa cerium nitrat dan *diatomaceous earth* pada sampel 3 menunjukkan titik rapat arus bergeser ke bawah dengan nilai yang lebih kecil dibanding sampel 2. Jika rapat arus semakin kecil, maka nilai aliran arus akan mengecil pula sehingga laju korosi akan turun. Sampel dengan penambahan kalium dikromat memiliki nilai rapat arus yang lebih kecil dibanding sampel dengan penambahan cerium nitrat sehingga kurva cenderung bergeser ke bawah.

**3.4 Analisis Variasi Inhibitor terhadap Laju Korosi**

Parameter yang didapat dari hasil pengujian ini adalah potensial korosi ( $E_{corr}$ ), rapat arus ( $I_{corr}$ ) dan laju korosi. Parameter yang dihasilkan pada pengujian polarisis ditunjukkan oleh Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil Pengujian Korosi

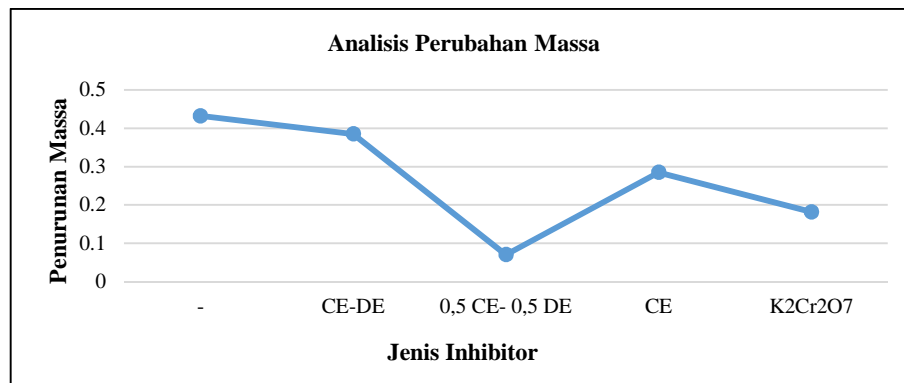
Sampel	Inhibitor	- $E_{corr}$ (mV)	$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Laju korosi (mm/year)
Sampel 1	-	353,230	6,949	0,16124
Sampel 2	0,1 gr CE- 0,1 gr DE	320,920	4,635	0,10754
Sampel 3	0,5 gr CE- 0,5 gr DE	307,750	1,548	0,0003593
Sampel 4	CE	308,020	28,566	0,0066279
Sampel 5	$K_2Cr_2O_7$	281,070	3,260	0,0007548



Gambar 6. Grafik Laju Korosi terhadap Inhibitor

Jika dilihat dari Gambar 6 yang menunjukkan grafik laju korosi, sampel yang memiliki laju korosi yang paling rendah yaitu sampel 3 dengan nilai 0,0003593 mm/year. Hal ini membuktikan bahwa adanya *diatomaceous earth* dapat meningkatkan ketahanan korosi dibanding dengan tanpa adanya *diatomaceous earth*. *Diatomaceous earth* mengontrol laju pelepasan inhibitor sehingga inhibitor akan lebih efektif pemakaiannya. Pada waktu yang sama membuktikan sampel dengan inhibitor cerium nitrat dengan enkapsulasi menggunakan 0,5 gram *diatomaceous earth* memiliki laju korosi yang lebih rendah dibanding sampel 4, hal ini menunjukkan adanya proteksi korosi aktif oleh cerium nitrat pada penambahan 0,5 gram *diatomaceous earth*. Adanya penambahan *diatomaceous earth* dapat meminimalisir interaksi negatif antara *coating* dan *inhibitor* sehingga laju korosi akan lebih rendah dibanding sampel tanpa enkapsulasi. Sampel dengan penambahan inhibitor  $K_2Cr_2O_7$  menunjukkan nilai laju korosi yang rendah dibanding *coating* cerium nitrat dikarenakan *coating*  $K_2Cr_2O_7$  menunjukkan proteksi korosi aktif yang sangat cepat disebabkan oleh kelarutan dan efisiensi inhibitor  $K_2Cr_2O_7$  yang tinggi. Selain itu Cr akan membentuk  $Cr_2O_3$  pada lapisan permukaan baja karbon yang meningkatkan ketahanan dan durabilitas baja karbon terhadap korosi.

### 3.5 Analisis Perubahan Massa terhadap Sampel Hasil Pengujian Korosi



Gambar 7. Grafik Perubahan Massa terhadap Jenis Inhibitor

Gambar 7 menunjukkan grafik perubahan massa terhadap jenis inhibitor. Perubahan massa pada sampel menunjukkan kehilangan massa yang terjadi selama pengujian korosi. Semakin besar perubahan massa menunjukkan sampel semakin banyak mengalami kehilangan massa (Dariva & Galio, 2014). Sampel yang mengalami perubahan massa yang paling kecil adalah sampel dengan *coating* 0,5 gram CE dan 0,5 gram *diatomaceous earth* yaitu senilai 0,0705 gram. Hal ini disebabkan karena adanya isolasi dari inhibitor cerium oleh cangkang silika alga dari *diatomaceous earth* yang mengurangi reaksi yang tidak diinginkan serta mempertahankan pelapasan inhibitor cerium pada area yang terdegradasi sehingga massa yang berkurang juga semakin sedikit.

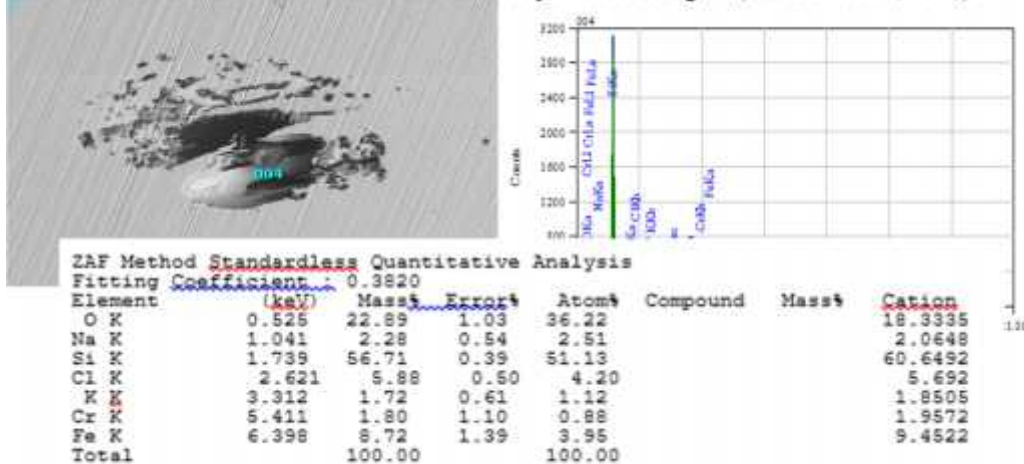
### 3.6 Analisis Karakterisasi SEM dan EDS pada produk korosi

Karakterisasi SEM dan EDS ditujukan untuk mengetahui morfologi produk korosi dan elemen penyusun produk korosi.



Gambar 8. Hasil SEM Produk Korosi pada Sampel 5

Berdasarkan Gambar 8, terlihat bahwa produk korosi memiliki gradasi warna yang berbeda dengan logam induk yaitu produk korosi memiliki warna yang lebih gelap dibanding warna logam induk. Korosi terlihat seperti pit (lubang kecil) yang biasanya terjadi apabila suatu logam baja terekspos terhadap lingkungan klorida. Selain itu terlihat korosi yang tersebar di sekitar pit yang berupa korosi seragam (Marcuci *et al.*, 2014).



Gambar 9. Spektrum Hasil EDS pada daerah Sampel 5

Hasil EDS pada titik yang ditunjukkan pada Gambar 9 menunjukkan adanya unsur oksigen yang merupakan elemen utama penyusun oksida (produk korosi) sebesar 22,89% massa. Selain itu juga terdapat unsur Si yaitu sebesar 56,71% massa yang umumnya hadir sebagai oksida logam ( $\text{SiO}_2$ ) yang kemungkinan berasal dari diatom silika eksoskeleton. Unsur lain seperti Fe umumnya berpadu dengan oksigen membentuk produk oksida (karat).

#### 4 KESIMPULAN

Kegunaan potensial dari eksoskeleton berbasis alga (*diatomaceous earth*) sebagai material pembawa yang sangat baik untuk penyimpanan inhibitor lokal yang mengarah pada proteksi korosi aktif yang sangat tinggi pada area yang telah terdegradasi pada logam yang telah *coating*. Penggunaan diatom alga silika eksoskeleton telah membuktikan peningkatan proteksi korosi pada logam baja karbon dengan penambahan inhibitor cerium nitrat. Laju korosi yang diamati menunjukkan bahwa penambahan 0,5 gram *diatomaceous earth* pada inhibitor cerium nitrat dapat menurunkan laju korosi sampel menjadi 0,0003593 mm/year. Adanya penambahan *diatomaceous earth* dapat meminimalisir interaksi negatif antara *coating* dan *inhibitor* sehingga laju korosi akan lebih rendah dibanding sampel tanpa enkapsulasi. Sampel yang mengalami perubahan massa yang paling kecil adalah sampel dengan *coating* 0,5 gram CE dan 0,5 gram *diatomaceous earth* yaitu senilai 0,0705 gram. Hasil EDS pada produk korosi menunjukkan adanya unsur oksigen yang merupakan elemen utama penyusun oksida logam serta adanya unsur Si dan Fe. Penggunaan metode enkapsulasi inhibitor oleh alga eksoskeleton untuk penghambat korosi dapat menjadi solusi untuk proteksi korosi yang ramah lingkungan pada *coating* logam.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Aribo, S., Olusegun, S. J., Ibhadiyi, L. J., Oyetunji, A., & Folorunso, D. O. (2017). Green inhibitors for corrosion protection in acidizing oilfield environment. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 24, 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2016.08.001>
- Asri, N. F., Husaini, T., Sulong, A. B., Majlan, E. H., & Daud, W. R. W. (2017). Coating of stainless steel and titanium bipolar plates for anticorrosion in PEMFC: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14), 9135–9148. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.241>
- Aw, M. S., Bariana, M., Yu, Y., Addai-Mensah, J., & Losic, D. (2013). Surface-functionalized diatom microcapsules for drug delivery of water-insoluble drugs. *Journal of Biomaterials Applications*, 28(2), 163–174. <https://doi.org/10.1177/0885328212441846>
- Chou, T. P., Chandrasekaran, C., Limmer, S. J., Seraji, S., Wu, Y., Nguyen, C., & Cao, G. (2001). Organic-inorganic hybrid coatings for corrosion protection. *International SAMPE Technical Conference*, 33, 948–958.
- Dariva, C. G., & Galio, A. F. (2014). Corrosion inhibitors: Principles, mechanisms and applications. In *Corrosion Inhibitors - Principles, Mechanisms and Applications* (pp. 365–379). <https://doi.org/10.5772/57255>
- Denissen, P. J., & Garcia, S. J. (2017). Cerium-loaded algae exoskeletons for active corrosion protection of coated AA2024-T3. *Corrosion Science*, 128(February), 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.09.019>
- Hosseini, M. G., Jafari, M., & Najjar, R. (2011). Effect of polyaniline-montmorillonite nanocomposite powders addition on corrosion performance of epoxy coatings on Al 5000. *Surface and Coatings Technology*, 206(2–3), 280–286. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.012>
- Kadhum, M. Yousef, Bkhakh, C. K., & Albehadili, M. H. (2018). The Effect of Sodium Hydroxide Solutions with Different Ph on the Corrosion Of Iron Alloy (C1010) In Industrial Water. *Journal of Advances in Chemistry*, 15(1), 6136–6141. <https://doi.org/10.24297/jac.v15i1.7134>
- Marcuci, J. R. J., Souza, E. C. de, Camilo, C. C., Lorenzo, P. L. Di, & Rollo, J. M. de A. (2014). Corrosion and microstructural characterization of martensitic stainless steels submitted to industrial thermal processes for use in surgical tools. *Brazilian Journal of Biomedical Engineering*, 30(3), 257–264.
- Mulyaningsih, N. (2019). Influence of organic corrosion inhibitor on corrosion behavior of St-37 carbon steel in NaCl medium. *AIP Conference Proceedings*, 2097(April). <https://doi.org/10.1063/1.5098183>
- Poursae, A. (2010). Corrosion of steel bars in saturated Ca(OH)<sub>2</sub> and concrete pore solution. *Concrete Research Letters*, 1(3), 90–97.
- Valipour, M., Shekarchi, M., & Ghods, P. (2014). Comparative studies of experimental and numerical techniques in measurement of corrosion rate and time-to-corrosion-initiation of rebar in concrete in marine environments. *Cement and Concrete Composites*, 48, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.001>
- Wang, Y., Cai, J., Jiang, Y., Jiang, X., & Zhang, D. (2013). Preparation of biosilica structures from frustules of diatoms and their applications: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97, 453–460. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4568-0>