



KOVALEN: Jurnal Riset Kimia

<https://bestjournal.untad.ac.id/index.php/kovalen>



Analisis Termodinamika dan Kinetika Nanopartikel Karbon (C-Dot) dari Buah Durian Sebagai Inhibitor Korosi Tembaga

[Thermodynamics and Kinetics Analysis of Carbon-Dots from Durian as Copper Corrosion Inhibitor]

Faradisa Anindita^{1*}, Noviyan Darmawan², Zainal Alim Mas'ud²

¹⁾ Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Sembilanbelas November Kolaka

²⁾ Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor

Abstract. Corrosion is a physical interaction between the metal and its environment, which results in changes in the metal's properties due to chemical or electrochemical reactions. The corrosion rate can be reduced by adding a corrosion inhibitor. Uses of nanotechnology for corrosion prevention is one of the first technical because almost made structures rely on the stability of a 1–2 nm thick passive film which provides stability to the underlying material. Herein we report the thermodynamic and kinetic analysis of carbon-dots from Durian as inhibitor copper corrosion. To test the anticorrosive performance and analyze thermodynamic properties in its role as a corrosion inhibitor on copper using potentiodynamic polarization. The thermodynamic-kinetic parameters of corrosion obtained values of $\Delta H^\ddagger = 60.44 \text{ kJmol}^{-1}$, $\Delta S^\ddagger = -73.9 \text{ kJmol}^{-1}$, and $\Delta G^\ddagger = 82.83 \text{ kJmol}^{-1}$, show that the attendance of C-dot as a corrosion inhibitor causes a non-spontaneous reaction rate to be proven by increasing spontaneity (ΔG^\ddagger). The value of activation energy samples was higher than the blank, indicates the presence of C-dot effective to reduce the rate of corrosion of the metal.

Keywords: C-dots, Durian, corrosion inhibitor, copper, thermodynamics, kinetics.

Abstrak. Korosi merupakan interaksi fisik antara logam dan lingkungannya yang mengakibatkan terjadinya perubahan sifat logam akibat reaksi kimia atau elektrokimia. Laju korosi dapat diminimalkan dengan menambahkan inhibitor korosi. Penggunaan nanoteknologi untuk pencegahan korosi adalah salah satu metode yang dapat digunakan karena dapat membentuk struktur yang bergantung pada stabilitas film pasif setebal 1–2 nm sehingga memberikan stabilitas pada material di bawahnya. Pada studi ini, kami melaporkan analisis termodinamika dan kinetika karbon dot dari Durian sebagai inhibitor korosi tembaga. Pengujian kemampuan antikorosif dan analisis sifat termodinamika dalam perannya sebagai penghambat korosi pada tembaga menggunakan polarisasi potensiodinamik. Parameter termodinamika-kinetika korosi diperoleh nilai $\Delta H^\ddagger = 60,44 \text{ kJmol}^{-1}$, $\Delta S^\ddagger = -73,9 \text{ kJmol}^{-1}$, dan $\Delta G^\ddagger = 82,83 \text{ kJmol}^{-1}$, menunjukkan bahwa kehadiran C-dot sebagai penghambat korosi menyebabkan laju reaksi non-spontan dibuktikan dengan peningkatan spontanitas (ΔG^\ddagger). Nilai energi aktivasi sampel yang lebih tinggi dari blanko menunjukkan bahwa karbon dot efektif untuk mengurangi laju korosi pada logam.

Kata kunci: C-dot, Durian, inhibitor korosi, tembaga, termodinamika, kinetika.

Diterima: 1 September 2021, Disetujui: 1 Desember 2021

Sitasi: Anindita, F., Darmawan, N., dan Mas'ud, ZA. (2021). Analisis Termodinamika dan Kinetika Nanopartikel Karbon (C-Dot) dari Buah Durian Sebagai Inhibitor Korosi Tembaga. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 7(3): 169-177.

* Corresponding author

E-mail: faradisaanindita66@gmail.com

<https://doi.org/10.22487/kovalen.2021.v7.i3.15608>



2477-5398/ © 2021 Anindita et al.
This is an open-access article under the CC BY-SA license.

LATAR BELAKANG

Tembaga dan paduannya adalah bahan yang paling terkenal telah digunakan secara luas dalam sistem manufaktur yang berhubungan dengan air laut dan teknik kelautan karena sifat ketahanan korosinya yang hebat. Oleh karena itu, paduan tembaga telah mendapat banyak perhatian dari para ahli di seluruh dunia. Ketika paduan tembaga berinteraksi dengan air langsung membentuk lapisan tembaga oksida Cu_2O sebagai pelindung karena mencegah oksidasi tembaga lebih lanjut (Carvalho, 2014). Namun demikian, lapisan tipis ini dipengaruhi oleh kondisi aliran tertentu, misalnya suhu air, kecepatan, dan disolusi (Gallegos *et al.*, 2005). Proses pengangkatan lapisan pelindung oksida menyebabkan permukaan logam bersentuhan langsung dengan lingkungan sehingga proses korosi terjadi dengan cepat.

Pencegahan korosi menggunakan inhibitor korosi adalah salah satu cara yang paling umum, menarik, dan efisien untuk menghambat korosi logam pada air laut. Beberapa senyawa organik dan anorganik telah digunakan sebagai penghambat korosi, namun senyawa ini cukup toksik dan proses sintesisnya memerlukan metode yang kompleks. Nanomaterial merupakan salah satu material yang dapat digunakan sebagai penghambat korosi. Luas permukaan nanomaterial yang besar dapat memperluas susunan situs aktif pada permukaan logam (Saji & Cook, 2012). Salah satu nanomaterial yang dapat digunakan sebagai penghambat korosi adalah C-dot. C-dot merupakan material karbon berukuran nanometer dengan ukuran kurang dari 10 nm dan memiliki kapasitas fluorescent yang tinggi (Zuo *et al.*, 2016). Senyawa ini merupakan inhibitor anorganik

yang memiliki heteroatom dari penyesuaian gugus fungsi organik pada permukaannya. C-dot berpotensi sebagai inhibitor korosi yang dapat teradsorpsi di permukaan (inhibitor organik) dan membentuk lapisan pelindung (inhibitor anorganik). Secara teoritis nilai efisiensi inhibisi akan meningkat bila terdapat dua teknik inhibisi dalam satu inhibitor (Cui *et al.*, 2017).

Telah dilaporkan oleh Anindita *et al.* (2018) bahwa C-dot yang disintesis dari durian dapat mencegah laju korosi pada tembaga. Daya penghambat korosi C-dot terhadap tembaga diamati menggunakan polarisasi potensiodinamik dalam larutan NaCl 1%. Hasil pengujian menemukan efisiensi hambatan terbesar sebesar 89% pada konsentrasi C-dot 800 ppm (Anindita *et al.*, 2018). Prosedur polarisasi potensiodinamik menguji inhibitor korosi tergantung pada perubahan arus ke potensial (Al-Amiery *et al.*, 2018). C-dot yang disintesis dari durian menunjukkan sifat sangat larut dalam air karena kaya akan gugus hidrofilik berdasarkan hasil karakterisasi menggunakan FTIR, meliputi gugus $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{C}$, dan $\text{S}=\text{O}$. Ditambah lagi dengan elektron yang kaya pada gugus fungsi permukaan C-dot, misalnya ester dan sulfur oksida yang berperan dalam pembentukan lapisan pelindung pada permukaan tembaga sehingga korosi dapat dihambat (Anindita *et al.*, 2018).

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, maka perlu dilakukan kajian termodinamika dan kinetika karbon dot dari durian sebagai inhibitor korosi untuk mengkaji fenomena inhibisi dengan pendekatan termodinamika dan kinetika. Studi termodinamika meliputi perubahan entropi aktivasi (ΔS^\ddagger), perubahan entalpi aktivasi (ΔH^\ddagger), dan perubahan aktivasi energi bebas Gibbs (ΔG^\ddagger), sedangkan

parameter kinetika meliputi energi aktivasi (EA). Energi aktivasi adalah jumlah energi minimum yang dibutuhkan untuk terjadinya reaksi kimia (Rafiquee et al., 2008). Perubahan entalpi aktivasi (ΔH^\ddagger) adalah energi yang dibutuhkan untuk memutuskan atau membentuk ikatan kimia yang terjadi ketika reaktan ke kompleks diaktifkan (keadaan transisi). Penyesuaian energi bebas Gibbs (ΔG^\ddagger) menunjukkan derajat spontanitas suatu reaksi (Liu, 2009). Inhibitor korosi diharapkan dapat menurunkan nilai spontanitas karena menghambat proses oksidasi pada korosi. Persamaan keadaan transisi Arrhenius dapat digunakan untuk melihat nilai perubahan termodinamika (Rafiquee et al., 2008).

METODE PENELITIAN

Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Durian diperoleh dari pasar lokal Bogor, Indonesia. Etanol 96% (Merck), aseton 99,5% (Merck), H_2SO_4 98% (Merck), dan NaCl 99% (Merck). Kupon tembaga (99,9%) dengan ukuran $1,0 \times 1,5 \times 0,1$ cm.

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah peralatan gelas, kertas saring, neraca analitik, botol Schot Duran, sentrifus, pelat pemanas, pengaduk magnet, oven, lampu UV 366 nm, Spektrofotometer UV-Vis 1700 Shimadzu, Mikroskop Pemindai Elektron, dan Potensiostat DY2300 dilengkapi program DY2300 Potensiostat.

Prosedur Penelitian

Sintesis C-dot dari jus durian (Anindita et al., 2018)

Karbon dot disintesis melalui pemanasan sederhana jus durian. Daging durian dipisahkan dari biji sebanyak 80 g dan

dihaluskan menjadi pasta dengan 100 mL air kemudian dimasukkan dalam botol Duran 500 mL. Kemudian 120 mL jus (bebas bulir) ditambahkan dengan 120 mL etanol dan dipanaskan pada suhu konstan $125^\circ C$ dalam oven selama 12 jam. Produk coklat gelap diperoleh setelah pendinginan pada suhu kamar dan selanjutnya dilarutkan dalam 120 mL air. Residu dipisahkan dengan penyaringan. Etanol sebanyak 300 mL ditambahkan ke dalam filtrat dan disentrifugasi pada $960 \times g$ selama 15 menit untuk memisahkan partikel besar. Pelarut diuapkan pada $80^\circ C$ untuk memperoleh C-dot dalam bubuk halus berwarna hitam. Selanjutnya untuk membuktikan hasil sintesis berhasil, C-dot dilarutkan di dalam aquades dan diletakkan di bawah sinar UV.

Pengukuran elektrokimia inhibitor korosi

Studi elektrokimia dilakukan dalam larutan uji NaCl 1%, menggunakan tiga elektroda dalam satu sel kompartemen. Platinum digunakan sebagai elektroda pembantu dan Ag/AgCl sebagai referensi. Elektroda kerja adalah tembaga (99,99%) yang berbentuk batang silindris yang tertanam dalam resin, dengan permukaan bawah ($3,34 \text{ cm}^2$) terbuka untuk paparan. Sebelum percobaan, spesimen secara mekanis diampelas dengan kertas silikon karbida (ukuran 500-1000), dicuci dengan akuades, dan dikeringkan dengan aseton. Penentuan elektrokimia dalam sistem sel tiga elektroda diproses oleh DY 2300 Potentiostat/Galvanostat. Deteksi dilakukan pada suhu kamar dan teknik pengukuran menggunakan linear sweep voltammetry dengan rentang potensial $-1,5 \text{ V}$ sampai $0,5 \text{ V}$, laju payar $0,01 \text{ V/s}$, dan sensitivitas $0,001$.

Parameter termodinamika proses korosi

Parameter termodinamika ditentukan dengan menggunakan persamaan Arrhenius keadaan transisi (Rafiquee *et al.*, 2008).

$$\ln \frac{C_R}{T} = \frac{R}{N_A h} + \frac{\Delta S^\ddagger}{R} - \frac{\Delta H^\ddagger}{RT} \quad (1)$$

Nilai ΔH^\ddagger dan ΔS^\ddagger merupakan perubahan entalpi dan entropi keadaan transisi, sedangkan $N_A h$ merupakan tetapan Planck molar ($3,99 \times 10^{-10} \text{ JSmol}^{-1}$). Dengan memvariasikan suhu sebesar 30, 40, 50, dan 60°C (T), maka ΔH^\ddagger dan ΔS^\ddagger dapat ditentukan dari kurva $\ln(C_R/T)$ vs $1/T$, sedangkan perubahan energi bebas Gibbs transisi (ΔG^*) dihitung menurut persamaan termodinamika berikut:

$$\Delta G^* = \Delta H^\ddagger - T\Delta S^\ddagger \quad (2)$$

Kinetika laju korosi dengan tinjauan energi aktivasi

Energi aktivasi dihitung dari luaran data antara $\ln C_R$ dan $1/T$ berdasarkan persamaan Arrhenius berikut (Morad & El-Dean, 2006):

$$C_R = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

$$\ln C_R = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (4)$$

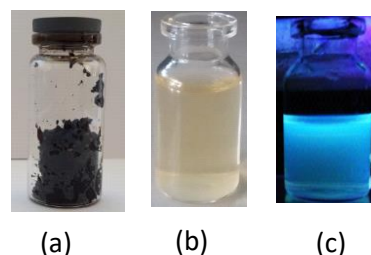
Dengan A adalah konstanta Arrhenius yang ditentukan secara empiris, E_a adalah energi aktivasi selama proses korosi (kJ/mol), R adalah konstanta gas ideal ($8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$), dan T adalah suhu (K).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Sintesis dan Karakterisasi Karbon Dot

Karbon dot (C-dot) disintesis melalui karbonisasi jus durian dan etanol dengan pemanasan sederhana pada suhu 125 °C selama 12 jam. Durian yang mengandung

karbohidrat seperti fruktosa, glukosa, sukrosa, dan maltosa dengan total gula 11,7-18,95% (Belgis *et al.*, 2016) dapat berperan sebagai sumber karbon, serta senyawa berbasis sulfur yaitu 1-(etilsulfanil)-etanathiol (J.-X. Li *et al.*, 2017), dietil-disulfida, dietil trisulfida, 3-etil-2,4-ditiaheksan-5-on, dan etil n-propil disulfida (Hong *et al.*, 2008) yang dapat bertindak sebagai agen pasivasi dari C-dot. C-dot yang dihasilkan dalam bentuk bubuk halus berwarna hitam dengan kelarutan yang tinggi dalam air. Larutan encer C-dot menampilkan warna coklat muda di bawah sinar tampak dan memancarkan fluoresens berwarna biru yang intens di bawah sinar UV (366 nm), maka hasil tersebut menunjukkan secara kualitatif adanya karbon nanopartikel (Gambar 1) (De & Karak, 2013).



Gambar 1. (a) C-Dot hasil sintesis, (b) Larutan C-dot dalam aquades, (c) Larutan C-dot di bawah sinar UV

Studi Inhibisi Korosi

C-dot dapat berperan sebagai inhibitor korosi disebabkan oleh heteroatom seperti O dan S pada permukaan C-dot dapat dengan mudah mengisi orbital 3d kosong pada atom tembaga karena pasangan elektron bebas, dan ikatan koordinat yang terbentuk antara heteroatom dan permukaan tembaga (Cen *et al.*, 2019). Studi inhibisi korosi C-dot pada tembaga dilakukan pada berbagai variasi suhu. Suhu dapat memodifikasi interaksi antara tembaga dan media garam dalam ketiadaan dan kehadiran inhibitor. Pengaruh suhu pada reaksi inhibisi media garam-logam sangat

kompleks, karena banyak perubahan terjadi pada permukaan logam seperti desorpsi inhibitor, dan inhibitor itu sendiri mungkin mengalami dekomposisi (Bentiss *et al.*, 2005). Perubahan suhu akan mempengaruhi arus korosi merupakan salah satu parameter korosi (Atkins & Paula, 2010; McCafferty, 2010). Beberapa faktor yang dapat meningkatkan korosivitas pada logam adalah kenaikan suhu dan adanya padatan terlarut (Antonijević *et al.*, 2009; Larabi *et al.*, 2006) dalam hal ini digunakan NaCl sebagai padatan terlarutnya.

Ion Cl⁻ adalah ion yang sangat agresif terhadap logam Cu. Ion ini juga dapat menyebabkan terjadinya pitting, korosi retak, dan juga menyebabkan pecahnya aloi (Al-Abdallah *et al.*, 2009). Kehadiran ion Cl⁻ pada reservoir menyebabkan terjadinya korosi pada logam Cu dan membentuk senyawa CuCl₂ (Khaled, 2011). Penambahan berbagai variasi suhu yang diberikan terhadap reservoir akan semakin meningkatkan arus korosi pada logam (Tabel 1).

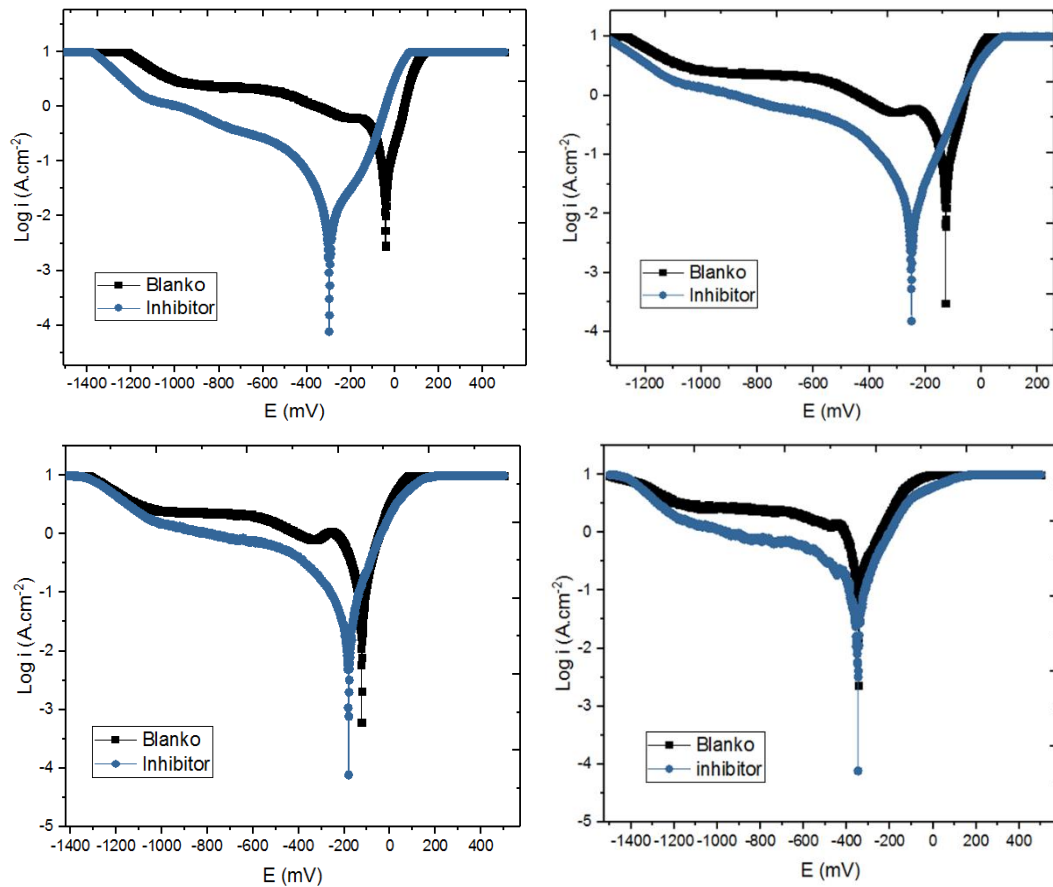
Tabel 1 . Parameter korosi tembaga pada berbagai suhu

Suhu (K)	Kode	Persamaan		E _{corr} (mV)	i _{corr} (mA)	V _{corr} (mm/y)	θ	η _p (%)
		Katoda	Anoda					
303	B	y = -0,0076x - 1,809	y = 0,012x + 0,4819	-117	0,120	0,416	-	-
	I	y = -0,0077x - 4,2397	y = 0,0057x - 0,3534	-290	0,010	0,034	0,92	91,5
313	B	y = -0,0049x - 1,3231	y = 0,0155x + ,9079	-110	0,163	0,566	-	-
	I	y = -0,0074x - 3,1222	y = 0,0096x - 0,1276	-176	0,015	0,053	0,90	90
323	B	y = -0,0064x - 1,8179	y = 0,0121x + 1,8257	-197	0,277	0,961	-	-
	I	y = -0,0064x - 2,2377	y = 0,0092x - 0,0691	-139	0,045	0,156	0,85	84,8
333	B	y = -0,0053x - 2,1437	y = 0,0081x + 1,9943	-309	0,311	1,079	-	-
	I	y = -0,0035x - 2,1766	y = 0,0092x + 1,9974	-329	0,094	0,327	0,73	72,8

Keterangan :
B = Blanko
I = Inhibitor

Tabel 1 menunjukkan bahwa peningkatan laju korosi lebih jelas dengan kenaikan suhu untuk larutan blanko. Nilai arus korosi (i) pada blanko maupun sampel semakin meningkat seiring dengan kenaikan suhu sebesar 10 K pada rentang suhu 303-333 K. Penggunaan suhu lebih dari 333 K menyebabkan nilai arus yang semakin tidak stabil. Hal tersebut berkorelasi jika semakin tingginya suhu yang diberikan maka pergerakan ion Cl⁻ akan semakin cepat pula di dalam reservoir, akan tetapi jika suhu yang diberikannya terlampaui tinggi maka waktu kontak ion Cl⁻ dengan elektrode logam yang diuji akan semakin cepat. Sehingga efektivitas

ion Cl⁻ sebagai konstituen korosif untuk mengkorosi elektrode logam akan berkurang pula. Hal ini didukung oleh grafik tafel pada setiap suhu (Gambar 2) memperlihatkan bahwa nilai potensial inhibitor bergeser mendekati blanko seiring dengan kenaikan suhu. Kehadiran inhibitor memberikan efek inhibisi korosi yang baik terhadap elektrode logam dengan variasi suhu yang ada, dimana terjadi penurunan efisiensi inhibisi dengan peningkatan suhu. Hal tersebut mungkin disebabkan oleh meningkatnya laju desorpsi inhibitor dari permukaan tembaga pada suhu yang tinggi (Li *et al.*, 2009).

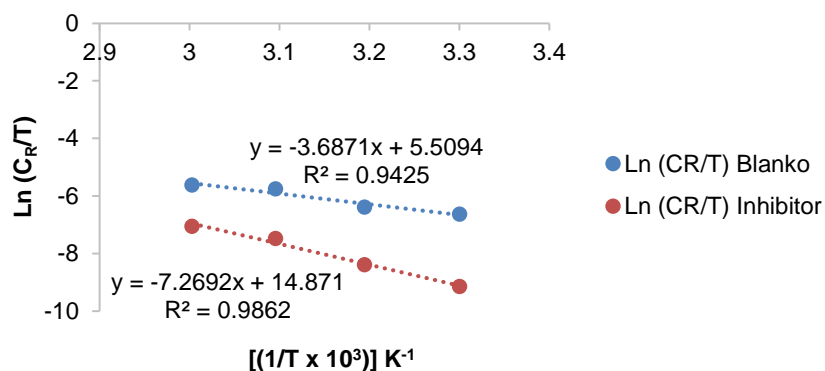


Gambar 2. Grafik polarisasi Tafel pada berbagai suhu (a) 303K, (b) 313K, (c) 323K, dan (d) 333K

Kajian Termodinamika dan Kinetika Reaksi

Hubungan kurva $\ln(C_R/T)$ terhadap $[(1/T \times 10^3)] K^{-1}$ sebagai parameter termodinamika korosi ditunjukkan pada Gambar 3. Kurva

hubungan tersebut sesuai dengan persamaan Arrhenius keadaan transisi yang selanjutnya akan berhubungan dengan nilai ΔH^\ddagger , ΔS^\ddagger , dan ΔG^\ddagger .



Gambar 3. Kurva persamaan Arrhenius transisi parameter termodinamika

Pada Tabel 2, ditunjukkan efektivitas kinerja inhibitor lebih baik dibandingkan blanko, terbukti selisih ΔH^\ddagger antara sampel dan blanko yang cukup besar. Hal ini mengindikasikan bahwa diperlukan energi yang lebih besar

untuk terjadinya korosi dengan kehadiran C-dot di permukaan logam Cu. Nilai ΔH^\ddagger positif menunjukkan sifat endotermik dari proses pelarutan tembaga, karena adsorpsi C-dot pada permukaan tembaga mencegah transfer

muatan, yang berarti bahwa pelarutan tembaga lambat dan sulit (Zhang *et al.*, 2021). Selain itu, perubahan transisi entropi menjelaskan derajat ketidakteraturan sistem. Kehadiran C-dot sebagai inhibitor pada sistem akan meningkatkan derajat ketidakteraturan yang ditunjukkan oleh peningkatan nilai ΔS^\ddagger seiring dengan kehadiran inhibitor korosi. Menurut Zhang *et al.* (2021) berat molekul dan ukuran nanopartikel jauh lebih besar dari molekul air maka semakin positif ΔS^\ddagger berarti bahwa entropi adsorpsi zat terlarut dan desorpsi pelarut meningkat, sehingga mengurangi gangguan

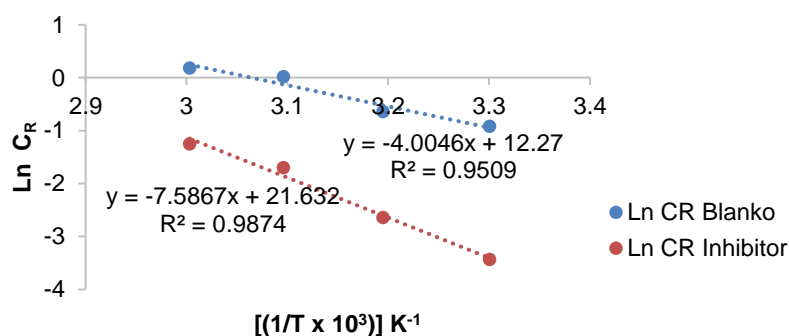
antarmuka logam/larutan. Hubungan antara ΔH^\ddagger dan ΔS^\ddagger akan menghasilkan nilai spontanitas atau ΔG^\ddagger . Nilai ΔG^\ddagger sampel yang lebih besar dari blanko menjelaskan bahwa kehadiran inhibitor korosi menyebabkan reaksi berjalan semakin tidak spontan, artinya dengan kehadiran inhibitor korosi ini reaksi logam untuk terkorosi semakin sulit. Nilai ΔG^\ddagger yang positif mengindikasikan proses elektrokimia belum terjadi secara spontan, karena membutuhkan pasokan energi eksternal berupa energi listrik (Sutriah *et al.*, 2018).

Tabel 2. Parameter termodinamika-kinetika korosi

Larutan	Persamaan	ΔH^\ddagger (kJmol ⁻¹)	ΔS^\ddagger (kJmol ⁻¹)	ΔG^\ddagger (kJmol ⁻¹)	Ea (kJmol ⁻¹)
Blanko	$y = -3,6871x + 5,5094$	30,65	-151,74	76,63	102,01
Inhibitor	$y = -7,2692x + 14,871$	60,44	-73,90	82,83	179,85

Parameter kinetika korosi dapat dilihat dari nilai energi aktivasi (Ea) yang diperoleh. Nilai energi aktivasi ini diperoleh dari kurva Arrhenius hubungan antara $\ln C_R$ terhadap $[(1/T$

$\times 10^3)] K^{-1}$ (Gambar 4) dengan mengalikan nilai kemiringan kurva yang didapat dengan nilai tetapan gas ideal (R).



Gambar 4. Kurva persamaan Arrhenius transisi parameter kinetika

Tabel 2 yang menunjukkan bahwa nilai energi aktivasi sampel yang lebih besar dibandingkan dengan blanko artinya bahwa elektrode logam yang telah ditambahkan dengan inhibitor akan menaikkan energi minimum logam untuk terjadinya korosi, sehingga logam lebih sulit untuk terkorosi. Menurut Zhang *et al.* (2021) nilai energi aktivasi

yang diukur dalam medium dengan kehadiran C-dot lebih tinggi daripada nilai tanpa kehadiran C-dot, menunjukkan bahwa penghalang energi yang lebih rendah pada tahap pertama proses adsorpsi adalah adsorpsi elektrostatis, yang bermanfaat untuk mempromosikan interaksi antara Cu⁺ dan inhibitor. Kehadiran inhibitor dapat membentuk lapisan protektif pada

permukaan logam, akan memberikan energi yang lebih besar juga terhadap konstituen korosif dalam melakukan proses korosi.

KESIMPULAN

C-dot merupakan inhibitor tipe campuran yang menunjukkan efektivitas inhibisi yang besar dan dapat dimanfaatkan sebagai inhibitor korosi pada logam tembaga dalam larutan NaCl 1%. Parameter kinetika termodinamika-korosi menunjukkan bahwa keberadaan C-dot sebagai inhibitor korosi menyebabkan reaksi lebih spontan dan dapat dibuktikan dengan meningkatkan spontanitas (ΔG^\ddagger). Nilai energi aktivasi sampel yang lebih tinggi dari blanko menunjukkan bahnya dengan adanya C-dot efektif dapat menurunkan laju korosi logam.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih ditujukan kepada laboran Laboratorium Jasa Pengujian, Kalibrasi, dan Sertifikasi IPB yang telah membantu secara signifikan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Abdallah, M. M., Maayta, A. K., Al-Qudah, M. A., & Al-Rawashdeh, N. A. F. (2009). Corrosion Behavior of Copper in Chloride Media. *The Open Corrosion Journal*, 2(1), 71–76. <https://doi.org/10.2174/1876503300902010071>
- Al-Amiery, A. A., Ahmed, M. H. O., Abdullah, T. A., Gaaz, T. S., & Kadhum, A. A. H. (2018). Electrochemical studies of novel corrosion inhibitor for mild steel in 1 M hydrochloric acid. *Results in Physics*, 9, 978–981. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.04.004>
- Anindita, F., Darmawan, N., & Mas'ud, Z. A. (2018). Fluorescence carbon dots from durian as an eco-friendly inhibitor for copper corrosion. *AIP Conference Proceedings*, 2014(1), 020008. <https://doi.org/10.1063/1.5054412>
- Antonijević, M. M., Milić, S. M., & Petrović, M. B. (2009). Films formed on copper surface in chloride media in the presence of azoles. *Corrosion Science*, 51(6), 1228–1237. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.026>
- Atkins, P., & Paula, J. (2010). *Physical Chemistry. 9th Ed.* Oxford Press, Oxford (UK).
- Belgis, M., Wijaya, C., Apriyantono, A., Kusbiantoro, B., & Yuliana, N. (2016). Physicochemical differences and sensory profiling of six lai (*Durio kutejensis*) and four durian (*Durio zibethinus*) cultivars indigenous Indonesia. *International Food Research Journal*, 23(4), 1466–1473.
- Bentiss, F., Lebrini, M., & Lagrenée, M. (2005). Thermodynamic characterization of metal dissolution and inhibitor adsorption processes in mild steel/2,5-bis(n-thienyl)-1,3,4-thiadiazoles/hydrochloric acid system. *Corrosion Science*, 47(12), 2915–2931. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.034>
- Carvalho, M. L. (2014). *Corrosion of copper alloys in natural seawater: Effects of hydrodynamics and pH* [THESE DE DOCTORAT DE]. Université Pierre et Marie Curie.
- Cen, H., Chen, Z., & Guo, X. (2019). N, S co-doped carbon dots as effective corrosion inhibitor for carbon steel in CO₂-saturated 3.5% NaCl solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 99, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.02.036>
- Cui, M., Ren, S., Xue, Q., Zhao, H., & Wang, L. (2017). Carbon dots as new eco-friendly and effective corrosion inhibitor. *Journal of Alloys and Compounds*, 726, 680–692. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.027>
- De, B., & Karak, N. (2013). A green and facile approach for the synthesis of water soluble fluorescent carbon dots from banana juice. *RSC Advances*, 3(22), 8286–8290. <https://doi.org/10.1039/C3RA00088E>
- Gallegos, A. A., Martinez, S. S., & Reyes, J. L. R. (2005). Evaluation of Water Corrosivity Using a Corrosion Rate Model for a Cooling Water System. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 8(2), 133–142.

- Hong, Z., Hua, Z., Ying, F., LianSong, Y., & Ruguo, Z. (2008). Analysis of Volatile Components of 'Jinzheng' Durian Fruit by TCT-GC/MS. *Food Science (Shipin Kexue)*, 29, 517–519.
- Khaled, K. F. (2011). Studies of the corrosion inhibition of copper in sodium chloride solutions using chemical and electrochemical measurements. *Materials Chemistry and Physics*, 125(3), 427–433. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.10.037>
- Larabi, L., Benali, O., Mekelleche, S. M., & Harek, Y. (2006). 2-Mercapto-1-methylimidazole as corrosion inhibitor for copper in hydrochloric acid. *Applied Surface Science*, 253(3), 1371–1378. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.02.013>
- Li, J.-X., Schieberle, P., & Steinhaus, M. (2017). Insights into the Key Compounds of Durian (*Durio zibethinus* L. 'Monthong') Pulp Odor by Odorant Quantitation and Aroma Simulation Experiments. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(3), 639–647. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b05299>
- Li, X., Deng, S., & Fu, H. (2009). Synergism between red tetrazolium and uracil on the corrosion of cold rolled steel in H₂SO₄ solution. *Corrosion Science*, 51(6), 1344–1355. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.023>
- Liu, Y. (2009). Is the Free Energy Change of Adsorption Correctly Calculated? *Journal of Chemical & Engineering Data*, 54(7), 1981–1985. <https://doi.org/10.1021/jc800661q>
- McCafferty, E. (2010). *Introduction to Corrosion Science*. Springer, Berlin.
- Morad, M. S., & El-Dean, A. M. K. (2006). 2,2'-Dithiobis(3-cyano-4,6-dimethylpyridine): A new class of acid corrosion inhibitors for mild steel. *Corrosion Science*, 11(48), 3398–3412. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.12.006>
- Rafiquee, M. Z. A., Saxena, N., Khan, S., & Quraishi, M. A. (2008). Influence of surfactants on the corrosion inhibition behaviour of 2-aminophenyl-5-mercapto-1-oxa-3,4-diazole (AMOD) on mild steel. *Materials Chemistry and Physics*, 107(2), 528–533. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.08.022>
- Saji, V., & Cook, R. (2012). *Corrosion Protection and Control Using Nanomaterials—1st Edition*. Woodhead Publishing. <https://www.elsevier.com/books/corrosion-protection-and-control-using-nanomaterials/saji/978-1-84569-949-9>
- Sutriah, K., Mas'ud, Z. A., Khotib, M., & Zuliandanu, D. (2018). Thermodynamic and Kinetic Study of Zinc bis-(Dipalmithyl Dithiophosphate) Activity as Anti-Corrosion Additive-Fatty Acid Based Through Potentiodynamic Polarization Technique. *Indonesian Journal of Chemistry*, 16(2), 214–221. <https://doi.org/10.22146/ijc.21166>
- Zhang, Y., Zhang, S., Tan, B., Guo, L., & Li, H. (2021). Solvothermal synthesis of functionalized carbon dots from amino acid as an eco-friendly corrosion inhibitor for copper in sulfuric acid solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 604, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.07.034>
- Zuo, P., Lu, X., Sun, Z., Guo, Y., & He, H. (2016). A review on syntheses, properties, characterization and bioanalytical applications of fluorescent carbon dots. *Microchimica Acta*, 183(2), 519–542. <https://doi.org/10.1007/s00604-015-1705-3>