

Studi Isoterm Adsorpsi dan Termodinamika Pada Proses Penyisihan Ion Fe (III) Menggunakan Pektin dari Kulit Pisang

Adsorption Isotherm and Thermodynamic Studies of Fe (III) Ions Removal Using Pectin from Banana Peels

Indriana Lestari^{a*}, Yuli Ristiningsih^a, Alit Istiani^a and Titi Tiara Anastasia^b

^aProgram Studi Teknik Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Jl. SWK 104 (Lingkar Utara) Condong Catur, Yogyakarta 55283, Indonesia

^bJurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta Jl. SWK 104 (Lingkar Utara) Condong Catur, Sleman, 55283, Indonesia

Artikel histori :

Diterima 28 Juni 2023
Diterima dalam revisi 27 Oktober 2023
Diterima 27 Oktober 2023
Online 1 November 2023

ABSTRAK: Adsorben berupa pektin berhasil diekstraksi dari kulit pisang menggunakan larutan asam kuat dan telah digunakan untuk menyisihkan ion Fe^{3+} dalam air. Pengaruh berbagai parameter terhadap proses adsorpsi, seperti waktu kontak, pH larutan, dosis adsorben, dan temperatur adsorpsi diinvestigasi dalam suatu sistem batch. Konsentrasi ion Fe^{3+} dalam larutan air diukur menggunakan *Atomic Absorption Spectrometry*. Efisiensi adsorpsi terbaik diperoleh pada waktu kontak selama 4 jam, pH larutan 2, dosis adsorben sebesar 3 g, dan temperatur 20°C. Mekanisme proses adsorpsi dan perubahan energi bebas Gibbs, entalpi, serta entropi telah dievaluasi. Model isoterm Freundlich dan Temkin paling sesuai untuk menggambarkan mekanisme adsorpsi ion Fe^{3+} pada pektin dengan R^2 berturut-turut 0,9871 dan 0,9591. Data parameter termodinamika membuktikan bahwa adsorpsi ion Fe^{3+} bersifat eksotermis dan berlangsung secara tidak spontan pada rentang temperatur 20 hingga 60°C. Penelitian ini menunjukkan bahwa kulit pisang dapat dimanfaatkan sebagai adsorben murah yang menjanjikan untuk menghilangkan ion Fe^{3+} dalam air.

Kata Kunci: pektin; ion Fe^{3+} ; adsorpsi isoterm; termodinamika; kulit pisang

ABSTRACT: The adsorbent in the form of pectin was successfully extracted from banana peels using a strong acid solution and has been used to remove Fe^{3+} ions in water. The effect of various parameters on the adsorption process, such as contact time, solution pH, adsorbent dosage, and adsorption temperature was investigated in a batch system. The concentration of Fe^{3+} ions in aqueous solutions was measured using *Atomic Absorption Spectrometry*. The best adsorption efficiency was obtained at a contact time of 4 hours, a solution pH of 2, an adsorbent dose of 3 g, and a temperature of 20°C. The mechanism of the adsorption process and the change in Gibbs free energy, enthalpy, and entropy had evaluated. Freundlich and Temkin's isotherm model is more suitable to describe the mechanism of adsorption of Fe^{3+} ions on pectin with R^2 of 0.9871 and 0.9591, respectively. The thermodynamic parameter data proves that the adsorption of Fe^{3+} ions is exothermic and takes place unspontaneously at a temperature range of 20 to 60°C. This study shows that banana peels can be used as a cheap adsorbent that promises to remove Fe^{3+} ions in water.

Keywords: pectin; Fe^{3+} ions; isotherm adsorbtion; thermodynamic; banana peels

1. Pendahuluan

Air adalah aset berharga yang memainkan peran penting dalam menjaga kehidupan dan ekosistem planet kita. Air jumlahnya sangat melimpah. Sekitar 71% permukaan bumi ditutupi oleh air, namun hanya 2,5% air yang layak untuk

dikonsumsi oleh manusia dan makhluk hidup lainnya (Marshall et al., 2007). Dilain sisi, air rentan terhadap pencemaran dari berbagai sumber, termasuk limbah industri, limbah domestik, dan kegiatan pertanian. Pencemaran air dapat mengancam kualitas air dan mengganggu ekosistem

* Corresponding Author:
Email: indriana.lestari@upnyk.ac.id

air, serta membahayakan kesehatan manusia yang mengandalkan air bersih.

Logam berat merupakan polutan air yang dapat bersifat karsinogenik. Logam berat adalah logam yang memiliki berat jenis lebih dari 5 g/cm^3 yang berdampak buruk bagi lingkungan dan organisme hidup, salah satunya adalah besi. Pada konsentrasi tinggi, besi dapat membentuk radikal besi sehingga merusak protein dan membran yang dapat menyebabkan kerusakan sel pada makhluk hidup (Jaishanka et al, 2014). Oleh karena itu, konsentrasi ion logam besi di dalam air harus dijaga agar jumlahnya tidak berlebihan. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menghilangkan logam berat dalam air baik secara konvensional maupun non-konvensional. Metode konvensional diantaranya adalah pengendapan kimia, kagulasi/flokulasi, pertukaran ion, teknologi membran dan elektrokimia, sedangkan cara non-konvensional antara lain adsorpsi, microbial fuel cells, nanoteknologi, reaksi fenton dan fitoremediasi (Zamora-Ledezma et al., 2021).

Adsorpsi merupakan salah satu metode terbaik untuk menghilangkan berbagai kontaminan di air, termasuk logam berat. Beberapa kelebihan metode adsorpsi yaitu murah, melimpah, kapasitas penyisihan logam yang tinggi, konsumsi energi yang relatif rendah, dan persyaratan teknis pengoperasian yang sederhana (Mudhoo et al., 2012). Saat ini, adsorben berbahan dasar limbah agroindustri banyak menarik perhatian peneliti. Biopolimer seperti selulosa, kitosan, alginat dan pektin merupakan adsorben yang baik karena memiliki kapasitas adsorpsi, biokompatibilitas tinggi dan dapat digunakan berulang kali (Ahmad et al., 2017).

Pektin merupakan polisakarida alam yang kompleks, tidak beracun, banyak ditemukan pada dinding tanaman, yang dapat diperoleh dari berbagai macam sumber alami seperti kulit jeruk dan limbah padat ekstraksi apel. Pektin terbukti memiliki afinitas yang tinggi terhadap ion-ion logam, dan polutan lainnya (Wang et al, 2019). Sayangnya, aplikasi pektin dan turunannya sebagai adsorben belum banyak dipelajari dan dikembangkan saat ini.

Limbah kulit pisang merupakan sisa industri pengolahan pisang untuk berbagai jenis makanan dan jumlahnya sangat melimpah di Indonesia. Limbah kulit pisang secara umum mengandung pektin sekitar 15,89 – 24,08% dari berat kering kulit pisang (Khamsucharit et al., 2018). Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu kontak, pH, massa pektin dan temperatur terhadap penyisihan ion Fe^{3+} dalam air. Selain itu interaksi antara adsorbat dengan adsorben dan termodinamika adsorpsi ion Fe^{3+} pada pektin kulit pisang juga dievaluasi. Mekanisme adsorpsi didekati dengan empat buah model isotherm adsorpsi dan parameter-parameter termodinamika dihitung dengan menggunakan persamaan Van't Hoff. Bahan adsorben berupa pektin diekstraksi dari kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca L.*) menggunakan asam kuat pada konsentrasi dan temperatur tertentu berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

2. Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Bahan baku pektin berasal dari limbah kulit pisang kepok salah satu restoran di Kabupaten Sleman, Yogyakarta, dan senyawa kimia berupa etanol 96 % (teknis), Asam klorida 0,25 N, Feri klorida anhidrat (pro analisis) dan aquadest.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari rangkaian alat ekstraksi pektin dan adsorpsi. Perlengkapan ekstraksi terdiri dari labu leher tiga yang dilengkapi dengan pendingin balik dan termometer air raksa, serta magnetic stirrer, sedangkan perlengkapan adsorpsi terdiri dari gelas beaker, magnetic stirrer, termometer dan pH meter.

2.2. Prosedur Percobaan

Langkah kerja pada penelitian ini terbagi menjadi dua bagian yaitu ekstraksi pektin dilanjutkan dengan proses adsorpsi. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, mula-mula limbah kulit pisang disortir dan dibersihkan, kemudian dicacah dengan ukuran 3 – 4 cm. Selanjutnya kulit dihilangkan kandungan airnya dengan cara dijemur di bawah sinar matahari selama tiga hari, diikuti penghalusan menggunakan blender dan pengeringan lanjut menggunakan oven pada temperatur $35 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 8 jam. Serbuk kulit pisang kering tersebut diekstraksi menggunakan pelarut HCl 0,25 N pada temperatur $80 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 90 menit dengan kecepatan pengadukan 300 rpm. Pektin yang diperoleh dari hasil ekstraksi masih bersifat asam dan mengandung pelarut, untuk itu pektin perlu dicuci dengan menggunakan alkohol 96% hingga pH netral dengan perbandingan 1:1 (Ristiningsih et al., 2021).

Pengaruh waktu kontak, pH, massa pektin dan temperatur terhadap adsorpsi ion Fe^{3+} dipelajari dengan melakukan pengamatan dalam sistem batch mengikuti langkah berikut: sejumlah massa pektin ditambahkan ke dalam masing-masing sampel berisi 125 mL larutan FeCl_3 2 ppm dan dilakukan pengadukkan selama 15 menit. Kemudian proses adsorpsi dilakukan dengan berbagai variasi waktu kontak (1; 2; 3; 4; 5 jam), pH (2; 4; 7; 8; 10), dosis pektin (1; 2; 3 gram), dan temperatur (20; 30; 40; 50; 60°C). Selanjutnya dilakukan analisis AAS pada masing-masing sampel untuk mengetahui konsentrasi ion Fe^{3+} yang tersisa di dalam larutan. Adapun efektivitas adsorpsi ion Fe^{3+} dihitung berdasarkan persamaan (1) berikut ini:

$$\text{Efisiensi adsorpsi } (\eta \%) = \frac{C_0 - C_t}{C_t} \times 100\% \quad (1)$$

Dengan C_0 adalah konsentrasi awal logam dalam larutan (ppm), C_t adalah konsentrasi pada waktu tertentu (ppm).

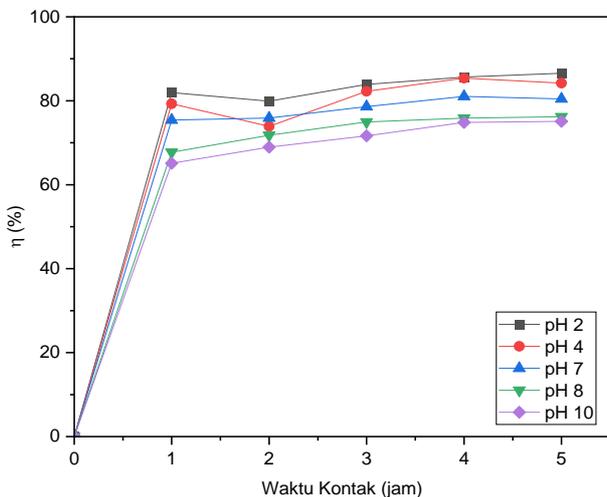
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh Waktu Kontak dan pH Larutan

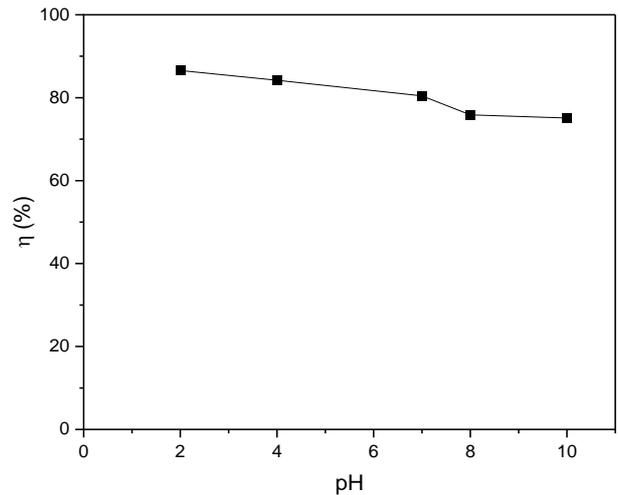
Gambar 1 memperlihatkan bagaimana efisiensi adsorpsi ion Fe^{3+} oleh pektin berubah terhadap waktu kontak hingga 5 jam proses adsorpsi. Efisiensi adsorpsi mengalami kenaikan yang tajam dan linear sampai waktu 1 jam, kemudian kenaikannya mulai melandai sampai waktu 4 jam, setelah itu

mulai mengalami penurunan, sampai pada akhirnya mencapai kesetimbangan seperti yang umumnya terjadi dalam suatu proses adsorpsi, sebagai perbandingan pada adsorpsi ion Pb^{2+} 50 ppm oleh suatu material *porous microsphere* berbasis pektin-karbon aktif mencapai kesetimbangan setelah 24 jam (Wang et al., 2021). Hasil ini menunjukkan bahwa Fe^{3+} mengisi situs aktif yang ada pada pektin dan seiring dengan berjalannya waktu kontak, situs aktif tersebut terisi secara bertahap yang menyebabkan penurunan laju adsorpsi hingga akhirnya mencapai kondisi jenuh dan setimbang. Dalam penelitian ini diperoleh waktu kontak terbaik untuk adsorpsi ion Fe^{3+} pada pektin kulit pisang adalah 4 jam.

Pengaruh pH larutan terhadap efisiensi adsorpsi ion Fe^{3+} oleh pektin diperlihatkan pada Gambar 2. Efisiensi adsorpsi meningkat seiring menurunnya pH dari 10 hingga 2 dan efisiensi adsorpsi mencapai nilai maksimum (87%) pada pH 2, serta menurun pada pH yang lebih tinggi. Peningkatan efisiensi adsorpsi pada tingkat pH ini lebih didominasi oleh pengaruh kelarutan Fe^{3+} yang meningkat seiring dengan menurunnya pH. Hal ini selaras dengan hasil penelitian yang dilaporkan oleh Purnamasari et al. (2017) dimana adsorpsi ion Fe pada air sungai menggunakan zeolit cenderung meningkat pada pH yang rendah. Selain itu variasi pH juga berpengaruh terhadap aktivitas gugus fungsi pada situs pengikatan aktif pektin, dalam hal ini gugus karboksilat. Gugus ini memegang peranan krusial untuk menarik ion Fe^{3+} pada permukaan pektin, yang terjadi pada pH 2 dan 4. Hal ini dikarenakan konstanta disosiasi (pK_a) gugus karboksilat berada di kisaran 3,8-5,5 (Buffle, 1988). Berdasarkan data tersebut pembentukan optimal gugus fungsi karboksilat pektin kulit pisang diperkirakan sekitar pH 4,0.



Gambar 1. Efisiensi adsorpsi Fe^{3+} pada pektin sebagai fungsi waktu kontak



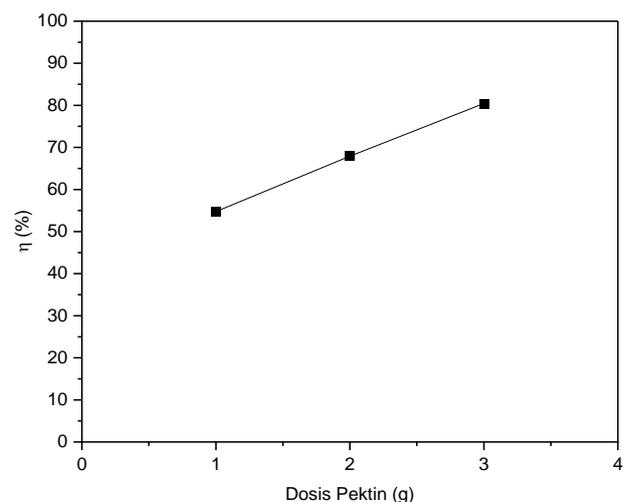
Gambar 2. Efisiensi adsorpsi Fe^{3+} pada pektin sebagai fungsi pH larutan

3.2 Pengaruh Dosis Pektin

Evaluasi penghilangan ion Fe^{3+} di dalam air oleh ekstrak pektin dari kulit pisang juga telah dilakukan pada berbagai dosis pektin yang berbeda, yaitu 1, 2 dan 3 g. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, efisiensi adsorpsi meningkat secara signifikan dengan bertambahnya dosis pektin. Hal ini dapat dirasionalisasi bahwa dengan semakin banyak massa pektin yang ditambahkan ke dalam larutan, maka semakin banyak situs aktif yang tersedia untuk menyerap ion Fe^{3+} . Efisiensi adsorpsi maksimum dicapai pada dosis 3 g.

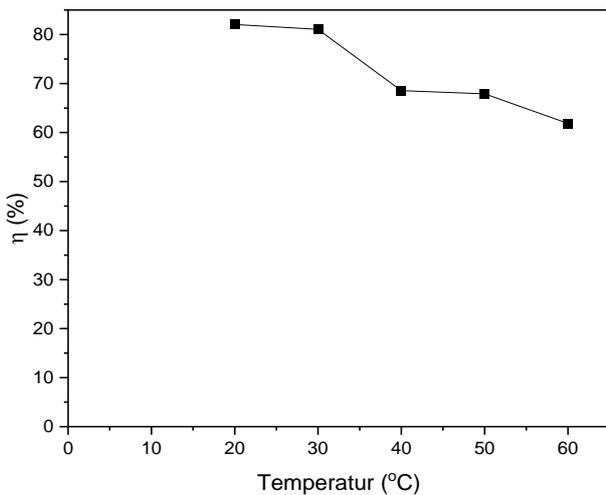
3.3 Pengaruh Temperatur Larutan

Temperatur memiliki pengaruh pada adsorpsi ion logam dalam batas tertentu. Peningkatan suhu menunjukkan penurunan efisiensi adsorpsi dan penyerapan maksimum terjadi pada temperatur 20 °C yakni sebesar 81% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Efisiensi adsorpsi Fe^{3+} pada pektin sebagai fungsi dosis pektin

Namun dalam sudut pandang ekonomi, proses adsorpsi lebih menguntungkan dilakukan di temperatur 30 °C, dimana dalam penelitian ini menghasilkan efisiensi adsorpsi senilai 80%. Secara umum proses adsorpsi tidak dioperasikan pada temperatur tinggi maupun rendah karena akan meningkatkan biaya operasional dalam menyediakan sumber panas dan unit refrigerasi. Reaksi adsorpsi logam berat dapat bersifat eksotermis, sehingga efisiensi adsorpsi meningkat dengan penurunan temperatur (Tambat et al., 2023). Pernyataan ini telah dibuktikan dari hasil analisis termodinamika pada proses adsorpsi diberbagai suhu yang menghasilkan entalpi bernilai negatif. Penurunan efisiensi adsorpsi dari rentang temperatur 20 hingga 60 °C juga dapat disebabkan oleh kerusakan situs aktif dalam pektin.



Gambar 4. Efisiensi adsorpsi Fe³⁺ pada pektin sebagai fungsi temperatur larutan

3.4 Model Isotherm Adsorpsi

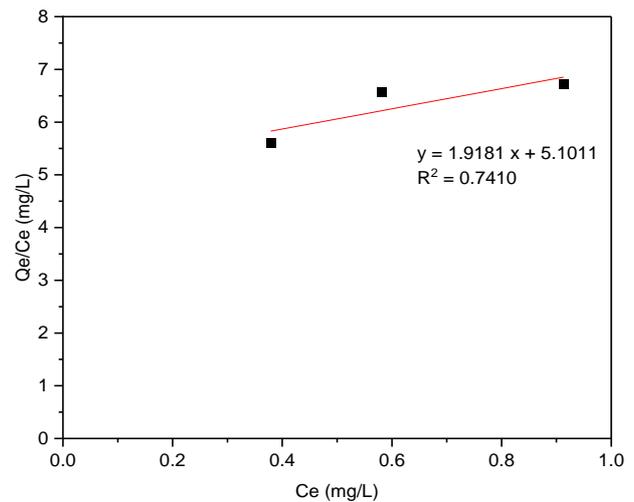
Adsorpsi Isotherm digunakan untuk menggambarkan bagaimana interaksi antara molekul atau ion adsorbat dengan situs aktif pada permukaan adsorben. Selain itu isotherm adsorpsi diterapkan untuk mengoptimalkan penggunaan adsorben (Torab-Mostaedi et al., 2013). Persamaan-persamaan isotherm yang diuji dalam penelitian ini antara lain Langmuir, Freundlich, Temkin dan Dubinin-Radushkevich (D-R).

Model isotherm Langmuir mewakili secara kuantitatif pembentukan adsorbat monolayer pada permukaan luar adsorben dan setelah itu tidak ada adsorpsi lebih lanjut yang terjadi. Asumsi yang digunakan pada model ini adalah situs aktif memiliki afinitas yang sama dan tidak bergantung pada situs aktif lainnya. Langmuir digunakan untuk menunjukkan distribusi kesetimbangan ion logam antara fase padat dan fase cair. Bentuk persamaan linier isotherm Langmuir ditulis dengan Persamaan 2 dan 3 sebagai berikut (Langmuir, 1916):

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{Q_m K_L} \quad (2)$$

$$Q_e = \frac{C_0 - C_e}{M} \times V \quad (3)$$

Dengan K_L adalah konstanta langmuir berkaitan dengan energi dan kapasitas adsorpsi (L/mg), Q_m adalah kapasitas maksimum logam yang terserap (mg/g), dan Q_e adalah jumlah logam yang diserap oleh pektin (mg logam teradsorpsi/g pektin). Pada plot linier model Langmuir antara adsorpsi spesifik (C_e/Q_e) dengan C_e yang disajikan Gambar 5, diperoleh Q_m sebesar 0,52 mg/g, K_L senilai 0,38 L/mg, dan koefisien determinasi (R²) sebesar 0,7410. Meskipun fenomena adsorpsi disukai (*favorable*) yang berarti bahwa adsorben sesuai untuk jenis adsorbat tersebut, namun nilai R² cukup rendah, hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi tidak sesuai dengan model isotherm Langmuir.

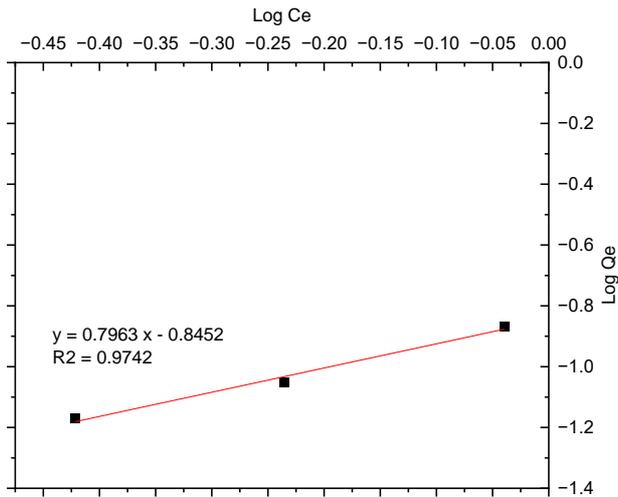


Gambar 5. Isotherm langmuir adsorpsi ion Fe³⁺ pada pektin kulit pisang

Model adsorpsi Freundlich digunakan untuk menjelaskan adsorpsi heterogen dan menggambarkan sifat adsorpsi yang terjadi adalah proses fisik, multilayer dan ikatannya tidak kuat. Bentuk persamaan empiris linier isotherm Freundlich dapat ditulis (Freundlich, 1906) sesuai Persamaan 4 berikut:

$$\log Q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

Pada persamaan (4), n adalah faktor heterogenitas dan K_f adalah kapasitas adsorpsi adsorben (mg/g). Plot linier persamaan Freundlich antara Log Q_e dengan Log C_e diberikan pada Gambar 6. Dari persamaan linier tersebut didapat nilai K_f = 0,21 mg/g dan 1/n = 0,7963 dengan koefisien determinasi R² = 0,9871. Berdasarkan nilai 1/n (0 < 1/n < 1), maka adsorpsi isotherm ion Fe³⁺ pada pektin kulit pisang disukai (*favorable*) dan proses fisik. Nilai koefisien determinasi mendekati 1 artinya bahwa adsorpsi ion Fe³⁺ pada pektin kulit pisang sesuai dengan model isotherm Freundlich.



Gambar 6. Isoterm Freundlich adsorpsi ion Fe^{3+} pada pektin kulit pisang

Model Temkin menganggap bahwa proses adsorpsi terjadi secara multi-layer (Temkin dan Pyzhev, 1940). Dengan mengabaikan nilai konsentrasi yang sangat rendah maupun tinggi, model ini mengasumsikan bahwa panas adsorpsi (fungsi temperatur) untuk semua molekul lapisan berkurang secara linier dengan bertambahnya lapisan permukaan adsorben yang ditutupi oleh molekul-molekul adsorbat. Berikut adalah persamaan Model Temkin:

$$Q_e = \frac{RT}{b_T} \ln A_T + \left(\frac{RT}{b}\right) \ln C_e \quad (5)$$

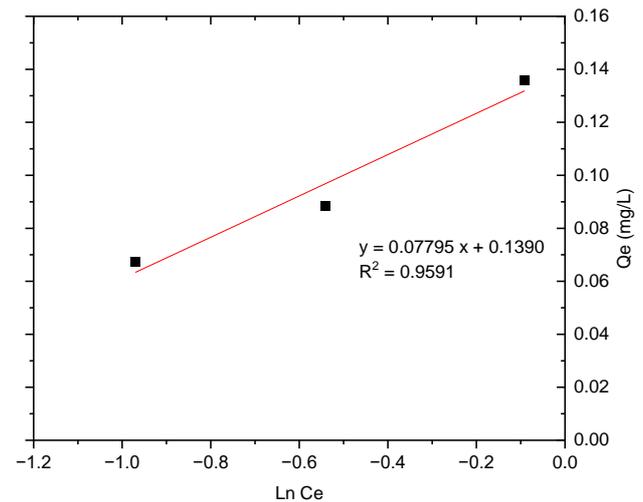
Dengan, A_T = konstanta kesetimbangan ikatan (L/g), b_T = konstanta Temkin, R = konstanta gas ideal (8,314 J/mol/K), T = temperatur (K). Dari plot Temkin antara $\ln C_e$ dan Q_e yang disajikan pada Gambar 7, diperoleh nilai konstanta kesetimbangan ikatan sebesar 1,78 L/g dan konstanta Temkin 32,34 kJ/mol, serta nilai $R^2 = 0,9591$ mengisyaratkan bahwa adsorpsi ion Fe^{3+} pada pektin kulit pisang merupakan proses fisik dan sesuai dengan model isoterm Temkin.

Model isoterm yang terakhir adalah Isoterm Dubinin-Radushkevich (D-R) yang digunakan untuk memperkirakan energi bebas adsorpsi dan jenis adsorpsi. Pada umumnya, model ini diaplikasikan untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi melalui distribusi energi Gaussian pada permukaan yang heterogen. Model isothermal D-R meramalkan bahwa proses adsorpsi mengikuti mekanisme pengisian pori dan dinyatakan oleh suatu persamaan semi-empiris. Model ini berasumsi bahwa adsorpsi bersifat multi-layer, fisik dengan gaya Van Der Waals (Ananta, 2015). Model persamaan adsorpsi isoterm D-R ditulis sebagai berikut:

$$Q_e = Q_s e^{-K_{ad}\epsilon^2} \quad (6)$$

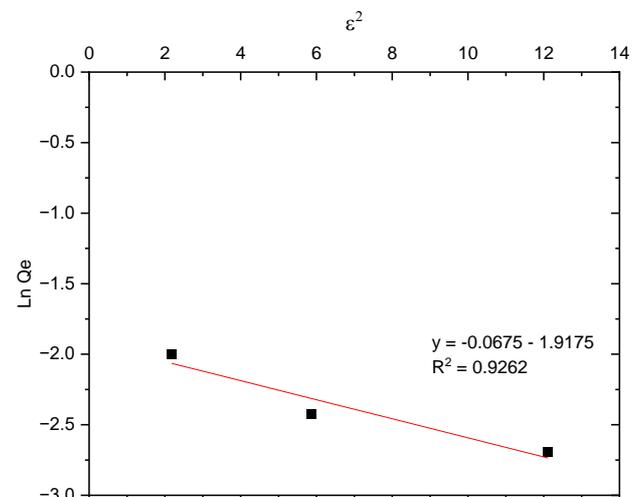
$$\ln Q_e = \ln Q_s - (-K_{ad}\epsilon^2) \quad (7)$$

Dengan Q_s adalah jumlah maksimum logam yang diserap (mg/g), K_{ad} adalah konstanta D-R (mol^2/kJ^2), ϵ adalah potensial adsorpsi berdasarkan teori potensial Polanyi (kJ/mol). Berdasarkan plot D-R (Gambar 8) didapat nilai K_{ad} , Q_s , dan koefisien determinasi berturut-turut 0,0675 mol^2/kJ^2 , 0,1470 mg/g dan 0,9262. Berdasarkan data ini diperoleh energi bebas rata-rata adsorpsi (E) sebesar 2,72 kJ/mol. Dikarenakan nilai $E < 8$ kJ/mol maka adsorpsi ion Fe^{3+} pada pektin kulit pisang didominasi proses fisik (Chabani et al., 2006).



Gambar 7. Isoterm Temkin adsorpsi ion Fe^{3+} pada pektin kulit pisang

Berdasarkan nilai koefisien determinasi dari keempat model adsorpsi isoterm yang diuji, maka proses adsorpsi ion Fe^{3+} pada pektin kulit pisang dapat dijelaskan dengan model isoterm Freundlich dan Temkin, namun diantara kedua metode tersebut Freundlich yang paling sesuai untuk menggambarkan mekanisme adsorpsi ion Fe^{3+} pada pektin yang digunakan karena memiliki nilai R^2 mendekati 1.



Gambar 8. Isoterm Dubinin-Radushkevich adsorpsi ion Fe^{3+} pada pektin kulit pisang

3.5 Termodinamika Adsorpsi Ion Fe³⁺

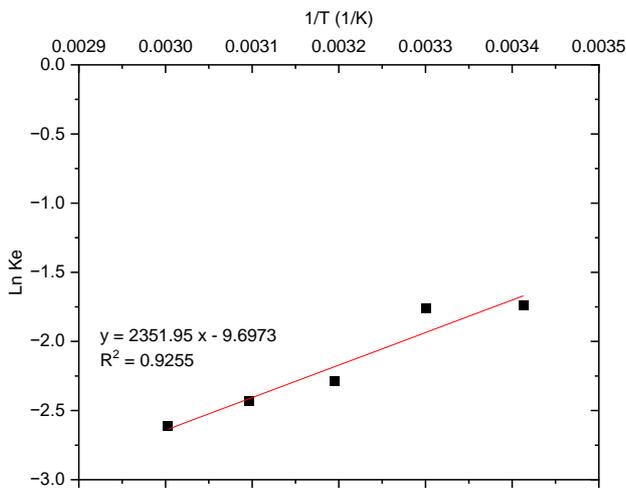
Termodinamika adsorpsi ion Fe³⁺ pada pektin kulit pisang didekati dengan menggunakan persamaan Van't Hoff berikut ini (Kaveeshwar et al., 2018):

$$K_{eq} = e^{-\Delta G/RT} \quad (8)$$

$$\Delta G = -RT \ln K_{eq} \quad (9)$$

$$\ln K_{eq} = -\frac{\Delta H^\circ}{R} \frac{1}{T} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (10)$$

K_{eq} adalah tetapan kesetimbangan yang berhubungan secara linear dengan koefisien distribusi (L/g), ΔG adalah energi bebas Gibbs (kJ/mol), ΔH adalah entalpi (kJ/mol), ΔS adalah entropi (kJ/mol.K).



Gambar 9. Plot termodinamika adsorpsi ion Fe³⁺ pada pektin kulit pisang

Dari plot ln K_{eq} sebagai fungsi 1/T (lihat Gambar 9) diperoleh Entalpi dan entropi adsorpsi masing-masing adalah -19,55 kJ/mol dan -0,08 kJ /mol.K yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi ion Fe³⁺ pada pektin kulit pisang bersifat eksotermis dan derajat kebebasan partikel adsorbat pada antarmuka padat-cair sangat rendah (Yadav et al., 2015).

Tabel 1. Tabel Parameter Termodinamika Adsorpsi Ion Fe³⁺ pada Kulit Pisang

T (K)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (kJ/mol.K)	ΔG° (kJ/mol)
293	-19.55	-0.0806	4.07
303	-19.55	-0.0806	4.88
313	-19.55	-0.0806	5.68
323	-19.55	-0.0806	6.49
333	-19.55	-0.0806	7.29

Berdasarkan pada hasil nilai entalpi dan entropi maka dapat dihitung besarnya energi bebas Gibbs pada setiap temperatur

percobaan. Tabel 1 menunjukkan parameter-parameter termodinamika adsorpsi ion Fe³⁺ pada pektin kulit pisang dan dapat dilihat ΔG bernilai positif, artinya proses adsorpsi pada rentang suhu tersebut berjalan secara tidak spontan.

4. Kesimpulan

Proses adsorpsi ion Fe³⁺ dalam larutan air pada sistem *batch* dipengaruhi oleh waktu kontak, dosis adsorben, pH larutan, dan temperatur. Data eksperimen pada proses adsorpsi menunjukkan korelasi paling sesuai dengan model isoterm Freundlich dan Temkin, serta adsorpsi yang terjadi adalah proses fisik. Kajian termodinamika menunjukkan bahwa proses adsorpsi tersebut bersifat eksotermis, dengan nilai perubahan entalpi dan perubahan entropi negatif. Berdasarkan penelitian ini, limbah kulit pisang terbukti dapat digunakan sebagai adsorben alami dengan efisiensi adsorpsi ion Fe³⁺ sebesar 87%.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta yang telah mendanai penelitian ini melalui dana hibah penelitian dasar 2021.

Daftar Pustaka

- Ahmad, M., Manzoor, K., & Ikram, S. (2017). Versatile nature of hetero-chitosan based derivatives as biodegradable adsorbent for heavy metal ions; a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 105, 190–203.
- Ananta, S., Saumen, B., Vijay, V. (2015). Adsorption isotherm, thermodynamic and kinetic study of arsenic (III) on iron oxide coated granular activated charcoal. *Res. J. Environment Sci*, 4(1), 64-77.
- Buffle, J. (1988). *Complexation reactions in aquatic systems: an analytical approach*. Chichester, Ellis Horwood Ltd.
- Chabani, M., Amrane, A., & Bensmaili, A. (2006). Kinetic modelling of the adsorption of nitrates by ion exchange resin. *Chemical Engineering Journal*, 125(2), 111–117.
- Freundlich, H. (1906). Über die adsorption in lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57, 385-470.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60–72.
- Khamsucharit, P., Laohaphatanalert, K., Gavinlertvatana, P., Sriroth, K., & Sangseethong, K. (2017). Characterization of pectin extracted from banana peels of different varieties. *Food Science and Biotechnology*, 27(3), 623–629.
- Kaveeshwar, A. R., Ponnusamy, S. K., Revellame, E. D., Gang, D. D., Zappi, M. E., & Subramaniam, R. (2018). Pecan shell based activated carbon for removal of

- iron(II) from fracking wastewater: Adsorption kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Process Safety and Environmental Protection*, 114, 107–122.
- Langmuir, I. (1916). The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. *J. Am. Chem. Soc.*, 38, 11, 2221–2295.
- Marshall, F.M., Holden, J., Ghose, C., Chisala B., Chisala, Kapungwe, E., Volk J. et al. (2007). Contaminated irrigation water and food safety for the urban and peri-urban poor: appropriate measures for monitoring and control from field research in India and Zambia, Inception Report DFID Enkar R8160, SPRU, University of Sussex.
- Mudhoo, A., Garg, V. K., & Wang, S. (2012). Removal of heavy metals by biosorption. *Environmental Chemistry Letters*, 10(2), 109–117.
- Purnamasari, I., Trisnaliani, L., & Fatria. (2017). Pengaruh derajat keasaman dan waktu adsorpsi terhadap penurunan kadar logam (Fe dan Mn) menggunakan adsorben zeolit dalam air sungai enim di desa darmo tanjung enim. *Kinetika, Politeknik Negeri Sriwijaya*, 8(3), 34-39.
- Ristiningsih, Y., Lestari, I., Nandari W.W. (2021). Pengaruh jenis asam dan temperatur ekstraksi terhadap yield dan karakteristik pektin dari kulit pisang. *Eksergi*, 18(2), 37-42.
- Tambat, V.S., Tseng, Y., Kumar, P., Chen, C.W., Singhanian, R.R., Chang, J.S., Dong, C.D. (2023). Effective and sustainable bioremediation of molybdenum pollutants from wastewaters by potential microalgae. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103091.
- Temkin, M.J., Pyzhev, V. (1940). Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalyst. *Acta Phys. Chim. USSR* 12, 327-356.
- Torab-Mostaedi, M., Asadollahzadeh, M., Hemmati, A., & Khosravi, A. (2013). Biosorption of lanthanum and cerium from aqueous solutions by grapefruit peel: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Research on Chemical Intermediates*, 41(2), 559–573.
- Wang, R., Liang, R., Dai, T., Chen, J., Shuai, X., & Liu, C. (2019). Pectin-based adsorbents for heavy metal ions: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 319–329.
- Wang, R. S., Li, Y., Shuai, X. X., Liang, R. H., Chen, J., & Liu, C. M. (2021). Pectin/activated carbon-based porous microsphere for pb²⁺ adsorption: Characterization and adsorption behaviour. *Polymers*, 13(15).
- Yadav, S., AK, D. (2015). Efficient Removal of Cr (VI) from Aqueous Solution onto Palm Trunk Charcoal: Kinetic and Equilibrium Studies. *Chemical Science Journal*, 6(114).
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F., & Guerrero, V. H. (2021). Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology and Innovation*, 22, 101504.