

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



ANALISIS PERILAKU ISOTERM, TERMODINAMIKA, DAN KINETIKA ADSORPSI STRONTIUM MENGGUNAKAN TiO₂ – ZEOLIT LAMPUNG

M. Fiqri Sholahudin¹, Henny Purwaningsih¹, Erlina Noerpitasari², Boybul², Yanlinastuti²

¹Departemen Kimia, Fakultas MIPA, Institut Pertanian Bogor

Gedung Kimia Lantai 3, Jalan Tanjung Kampus IPB, Dramaga, Bogor, Jawa Barat, 16680

²Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN
K.S.T. B.J. Habibie, Gedung 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, 15314

e-mail: fiqrisholahudin43@gmail.com

(Naskah diterima: 20–03–2023, Naskah direvisi: 20–10–2023, Naskah disetujui: 22–10–2023)

ABSTRAK

ANALISIS PERILAKU ISOTERM, TERMODINAMIKA, DAN KINETIKA ADSORPSI STRONTIUM MENGGUNAKAN TiO₂ – ZEOLIT LAMPUNG. Bahan bakar nuklir setelah digunakan di reaktor menghasilkan beberapa hasil fisi, dimana salah satunya adalah strontium (⁹⁰Sr). Isotop strontium dapat dimanfaatkan menjadi bahan baku pembuatan baterai, tetapi strontium tersebut masih tercampur dengan hasil fisi atau isotop lainnya sehingga diperlukan proses pemisahan. Salah satu metode pemisahan strontium adalah dengan adsorpsi. Dalam penelitian ini, campuran TiO₂-zeolit Lampung dievaluasi kinerjanya sebagai adsorben sehingga dapat digunakan untuk adsorpsi strontium. Zeolit Lampung awal diaktivasi menggunakan asam sulfat pekat untuk membersihkan pori-pori yang masih mengandung pengotor. Kemudian zeolit dicampurkan dengan TiO₂ menggunakan metode *stir casting*. Adsorben TiO₂-zeolit Lampung yang diperoleh kemudian dikarakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), *X-Ray Diffraction Spectrometer* (XRD), dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Setelah itu dilakukan uji adsorpsi dengan model isoterm, termodinamika, dan kinetika. Terbentuknya TiO₂-zeolit yang dicirikan menggunakan spektroskopi FTIR ditunjukkan dengan adanya puncak serapan Ti-O-Si pada zeolit Lampung setelah ditambahkan TiO₂. Hasil analisis menggunakan XRD memperlihatkan zeolit Lampung berjenis klinoptilolit dan mordenit, serta TiO₂ yang digunakan memiliki fase anatase. Hasil analisis menggunakan SEM mengindikasikan TiO₂ tersebar pada permukaan zeolit Lampung. Model isoterm adsorpsi untuk adsorben TiO₂-zeolit memenuhi model isoterm Langmuir. Kajian termodinamika menunjukkan proses adsorpsi bersifat endoterm dan tidak spontan, dan kinetika adsorpsi strontium mengikuti orde kedua semu.

Kata kunci: Isoterm, adsorpsi, strontium, TiO₂, zeolit.

ABSTRACT

ANALYSIS OF ISOTHERM, THERMODYNAMICS, AND ADSORPTION KINETICS BEHAVIOUR OF STRONTIUM USING TiO₂ – ZEOLITE LAMPUNG. After being used in the reactor, nuclear fuel produces several fission products, one of which is strontium (⁹⁰Sr). Strontium isotopes can be used as raw material for making batteries, but the strontium is still mixed with fission products or other isotopes so a separation process is needed. One method of separating strontium is by adsorption. In this research, the Lampung TiO₂-zeolite mixture was evaluated for its performance as an adsorbent so that it can be used for strontium adsorption. Lampung Zeolite was initially activated using concentrated sulfuric acid to clean pores that still contained impurities. Then the zeolite is mixed with TiO₂ using the stir casting method. The Lampung TiO₂-zeolite adsorbent obtained was then characterized using Fourier Transform Infrared (FTIR), X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD), and Scanning Electron Microscope (SEM). After that, adsorption tests were carried out using isotherm, thermodynamic and kinetic models. The formation of TiO₂-zeolite which was characterized using FTIR spectroscopy was shown by the presence of a Ti-O-Si absorption peak in the Lampung zeolite after TiO₂ was added. The results of analysis using XRD show that the Lampung zeolite is clinoptilolite and mordenite, and the TiO₂ used has an anatase phase. The results of analysis using SEM indicate that TiO₂ is distributed on the surface of the Lampung zeolite. The adsorption isotherm model for the TiO₂-zeolite adsorbent fulfills the Langmuir isotherm model. Thermodynamic studies show that the adsorption process is endothermic and not spontaneous, and the kinetics of strontium adsorption follows pseudo second order.

Keywords: Isotherm, adsorption, strontium, TiO₂, zeolite.

Analisis Perilaku Isoterm, Termodinamika,
dan Kinetika Adsorpsi Strontium Menggunakan TiO₂– Zeolit Lampung
(M. Fiqri Sholahudin, Henny Purwaningsih, Erlina Noerpitasari, Boybul, Yanlinastuti)

PENDAHULUAN

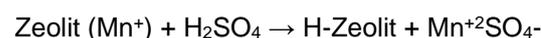
Strontium-90 (⁹⁰Sr) salah satu isotop produk fisi yang berasal dari bahan bakar nuklir bekas dan memiliki waktu paruh cukup lama, yaitu 28,80 tahun. Isotop ⁹⁰Sr juga merupakan isotop radioaktif berbahaya yang memancarkan radiasi β[1]. Menurut Dion *et al.* (2020), *fission yield* isotop ⁹⁰Sr dalam produk hasil fisi bahan bakar ²³⁵U, yaitu sekitar 5,8%[2], sehingga kandungan ⁹⁰Sr dalam bahan bakar bekas cukup banyak. Hal ini menyebabkan Isotop ⁹⁰Sr sangat ekonomis untuk dipisahkan dan dapat dimanfaatkan untuk keperluan lain, seperti bahan pembuatan baterai[3]. Pemisahan isotop ⁹⁰Sr dapat mengurangi limbah radioaktif radiasi tinggi (LiRaRT) yang tersimpan di ruang penyimpanan sementara limbah radioaktif (R.013) sebelum dikirim ke Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif (IPLR). Metode pemisahan isotop strontium yang mudah dilakukan salah satunya adalah metode adsorpsi[1]. Metode adsorpsi memiliki cara aplikasi yang mudah dan tidak menggunakan banyak persiapan. Metode adsorpsi ion strontium lebih banyak digunakan pada pengolahan limbah radioaktif cair.

Salah satu adsorben yang digunakan untuk memisahkan strontium dengan selektif adalah resin penukar ion strontium (Eichrom Sr resin)[4]. Tetapi resin tersebut memiliki harga yang mahal dan menghasilkan limbah yang merusak lingkungan. Alternatif adsorben yang murah, ramah lingkungan, serta memiliki kinerja yang baik adalah menggunakan adsorben alami seperti zeolit.

Zeolit memiliki struktur berpori-pori dan kemampuan penukar ion, sehingga zeolit banyak dimanfaatkan sebagai katalis dan sebagai adsorben. Salah satu jenis zeolit yang memiliki kemampuan adsorpsi yang baik adalah zeolit Lampung. Zeolit Lampung memiliki pori-pori dan luas permukaan yang lebih besar, sehingga memiliki kemampuan adsorpsi yang baik[5]. Meskipun memiliki kemampuan adsorpsi yang baik, masih terdapat beberapa kelemahan pada zeolit alam, seperti terdapat pengotor yang menutupi pori-pori dan sisi aktif zeolit yang masih sedikit.

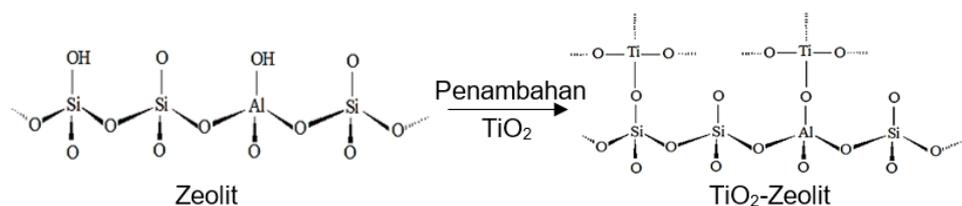
Kelemahan zeolit alam dapat diatasi dengan melakukan aktivasi pada zeolit. Aktivasi dapat membersihkan pengotor pada pori-pori zeolit, sehingga dapat menambah pori-pori dan sisi aktif zeolit untuk adsorpsi.

Selain aktivasi, kapasitas dan selektivitas adsorpsi zeolit juga dapat ditingkatkan dengan menggabungkan zeolit dengan material lainnya[6]. Basuki *et al.* (2021) dalam penelitiannya, menambahkan zeolit mordenit dengan TiO₂ untuk menambah kapasitas adsorpsi zeolit[7].



Titanium dioksida (TiO₂) merupakan material yang juga memiliki pori-pori dan kemampuan adsorpsi, sehingga banyak digunakan sebagai fotokatalis atau adsorben limbah industri[8]. TiO₂ banyak digunakan sebagai adsorben untuk limbah logam berat, tetapi TiO₂ mempunyai daya serap yang rendah, sehingga diperlukan cukup banyak TiO₂ jika digunakan sebagai adsorben. Oleh karena itu, untuk mendapatkan adsorben yang murah, ramah lingkungan, dan memiliki kinerja baik, penelitian ini menggabungkan material zeolit Lampung dengan TiO₂ untuk meningkatkan kinerja material sebagai adsorben.

TiO₂ akan menggantikan hidrogen pada zeolit dan berikatan dengan Si-O atau Al-O seperti pada Gambar 1[9]. Kemampuan adsorpsi pada zeolit bergantung pada rasio Si/Al. Saat proses adsorpsi, zeolit mengalami pertukaran ion antara gugus hidroksi yang bermuatan negatif pada zeolit dengan ion target yang bermuatan positif. Reaksi yang terlihat pada Gambar 1, TiO₂ yang ditambahkan pada zeolit akan menggantikan gugus hidroksi pada zeolit dan meningkatkan sisi negatif pada zeolit, sehingga sisi aktif pada zeolit juga meningkat dan dapat lebih banyak mengadsorpsi ion positif seperti strontium. Hasil adsorpsi juga dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti komposisi kimia dari zeolit yang digunakan, jumlah adsorben dan adsorbat, temperatur selama proses adsorpsi, dan lama waktu proses adsorpsi[9]. Komposisi zeolit yang berpengaruh pada proses adsorpsi adalah rasio kandungan Si/Al, dengan rasio Si/Al yang semakin besar, maka kemampuan adsorpsi dari zeolit juga semakin tinggi. Parameter tersebut dapat dikaji dan disesuaikan untuk proses adsorpsi, sehingga mendapatkan hasil yang optimal. Parameter dalam adsorpsi dapat diketahui dengan mempelajari sifat isoterm, termodinamika, dan kinetika adsorpsi.

Gambar 1. Reaksi pencampuran TiO₂ dengan Zeolit[9]

Isoterm adsorpsi merupakan fungsi yang menjelaskan jumlah adsorbat yang dapat menempel pada permukaan adsorben. Isoterm adsorpsi juga dapat menjelaskan mekanisme proses adsorpsi tersebut[9]. Parameter termodinamika adsorpsi dapat menjelaskan informasi mengenai energi internal, seperti perubahan entalpi, entropi, dan energi bebas Gibbs[10]. Parameter kinetika adsorpsi dapat memberikan informasi laju adsorpsi dan waktu kontak untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi[11]. Berdasarkan analisis parameter tersebut dapat diketahui kemampuan adsorben untuk proses adsorpsi. Penelitian ini bertujuan membuat adsorben dari zeolit Lampung yang dimodifikasi dengan TiO₂ serta menguji kinerja adsorben berdasarkan sifat isoterm, termodinamika, dan kinetika adsorpsinya.

METODOLOGI

Pembuatan adsorben dilakukan dengan mencampurkan zeolit Lampung yang telah diaktivasi dengan TiO₂, setelah itu dipanaskan pada temperatur tinggi. Penentuan isoterm, termodinamika, dan kinetika adsorpsi strontium menggunakan TiO₂-zeolit tidak langsung menggunakan ⁹⁰Sr, tetapi dilakukan secara simulasi dengan menggunakan Larutan standar strontium nitrat.

a. Aktivasi zeolit Lampung

Zeolit Lampung diaktivasi menggunakan asam sulfat (H₂SO₄) 2 M dengan perbandingan zeolit dan asam sulfat 1:4. Campuran zeolit dengan H₂SO₄ diaduk selama 3 jam pada temperatur ruang. Setelah itu, zeolit dicuci menggunakan akuades sampai pH netral. Campuran zeolit dengan H₂SO₄ kemudian dikeringkan dalam oven pada temperatur 120 °C selama 2 jam. Zeolit yang telah teraktivasi kemudian dikarakterisasi menggunakan FTIR, XRD, dan SEM.

b. Pembuatan adsorben TiO₂-zeolit

Zeolit teraktivasi ditumbuk dan disaring dengan saringan berukuran 100 mesh. Zeolit yang melewati saringan diambil sebanyak 20 g, kemudian ditambahkan etanol sebanyak 50 mL, dan diaduk pada temperatur ruang. Selanjutnya sebanyak 2 g TiO₂ ditambahkan dalam campuran dan diaduk lagi selama 3 jam pada temperatur ruang. Campuran kemudian disaring menggunakan kertas saring whatman 41. Selanjutnya campuran dikeringkan menggunakan oven selama 2 jam pada temperatur 120 °C. Setelah kering, campuran dimasukkan ke dalam tanur selama 5 jam pada temperatur 500 °C. Adsorben yang telah terbentuk dilakukan karakterisasi menggunakan FTIR, XRD, dan SEM.

c. Uji isoterm adsorpsi TiO₂-zeolit terhadap strontium

Uji isoterm adsorpsi dilakukan menggunakan metode *batch*. larutan standar strontium disiapkan dengan variasi konsentrasi 50, 100, 200, dan 250 ppm. sebanyak 10 mL larutan standar berbagai konsentrasi dimasukkan ke dalam tabung reaksi dan ditambahkan adsorben pada masing-masing tabung sebanyak 0,1 g. Selanjutnya campuran dikocok pada temperatur ruang (24 °C) selama 60 menit. Kemudian larutan dipisahkan dari adsorben menggunakan centrifuge dengan kecepatan 1000 rpm selama 10 menit. Konsentrasi larutan akhir diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis dengan pengompleks arsenazo III pada serapan λ maksimalnya. Nilai kapasitas adsorpsi (Q_e) dihitung menggunakan persamaan 1.

$$Q_e = \frac{C_i - C_e}{m} \times V_{\text{larutan}} \quad (1)$$

C_i = Konsentrasi awal (mg/L)

C_e = Konsentrasi akhir (mg/L)

m = Massa adsorben (g)

V = Volume larutan (L)

Analisis Perilaku Isoterm, Termodinamika,
dan Kinetika Adsorpsi Strontium Menggunakan TiO₂- Zeolit Lampung
(M. Fiqri Sholahudin, Henny Purwaningsih, Erlina Noerpitasari, Boybul, Yanlinastuti)

Hasil pengukuran konsentrasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis diplotkan menjadi persamaan linear isoterm Langmuir dan Isoterm Freundlich. Nilai r^2 pada kurva linear yang mendekati satu menentukan jenis isotermnya.

Persamaan linear isoterm Langmuir mengikuti persamaan 2.

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_{max}k_1} + \frac{C_e}{Q_{max}} \quad (2)$$

C_e = Kapasitas adsorpsi (mg/L)
 Q_e = Kapasitas adsorpsi (mg/g)
 Q_{maks} = Kapasitas maks. adsorben (mg/g)
 K_1 = Kontanta Langmuir

Persamaan linear isoterm Freundlich mengikuti persamaan 3.

$$\log Q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log k_f \quad (3)$$

n = konstanta Freundlich
 K_f = kapasitas maksimum adsorben

d. Uji termodinamika adsorpsi TiO₂-zeolit terhadap strontium

Uji termodinamika adsorpsi memiliki metode yang sama dengan uji isoterm. Perbedaan uji termodinamika adsorpsi terdapat pada konsentrasi strontium yang dibuat tetap dan variasi temperatur yang digunakan. Uji termodinamika adsorpsi digunakan standar strontium 100 ppm dan diadsorpsi pada variasi temperatur 40, 50, dan 60 °C. Konsentrasi akhir strontium diukur dengan cara yang sama seperti pada prosedur sebelumnya. Hasil pengukuran dibuat kurva persamaan Van Hoff (persamaan 4) untuk menghitung parameter-parameter termodinamika. Hasil perhitungan entropi dan entalpi selanjutnya digunakan untuk menghitung energi bebas Gibbs (ΔG) mengikuti persamaan 5.

$$\ln \frac{Q_e}{C_e} = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{R} \frac{1}{T} \quad (4)$$

$$\Delta G = \Delta H - T(\Delta S) \quad (5)$$

ΔS° = Entropi
 ΔH° = Entalpi
 ΔG = Energi bebas Gibbs
 R = Tetapan gas ideal (8,314 J/mol K)
 T = Temperatur (K)

e. Uji kinetika adsorpsi TiO₂-zeolit terhadap strontium

Uji kinetika adsorpsi memiliki metode yang sama dengan prosedur uji isoterm dan termodinamika adsorpsi, tetapi pada uji kinetika adsorpsi digunakan konsentrasi strontium 100 ppm dan variasi waktu kontak selama 20, 40, 60, dan 80 menit. Konsentrasi akhir strontium diukur dengan cara yang sama seperti prosedur sebelumnya. Hasil konsentrasi dikonversi dan dimasukkan ke dalam persamaan laju adsorpsi orde 1 semu dan orde 2 semu.

Persamaan linear orde 1 semu mengikuti persamaan 6.

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (6)$$

Persamaan linear orde 2 semu mengikuti persamaan 7.

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t \quad (7)$$

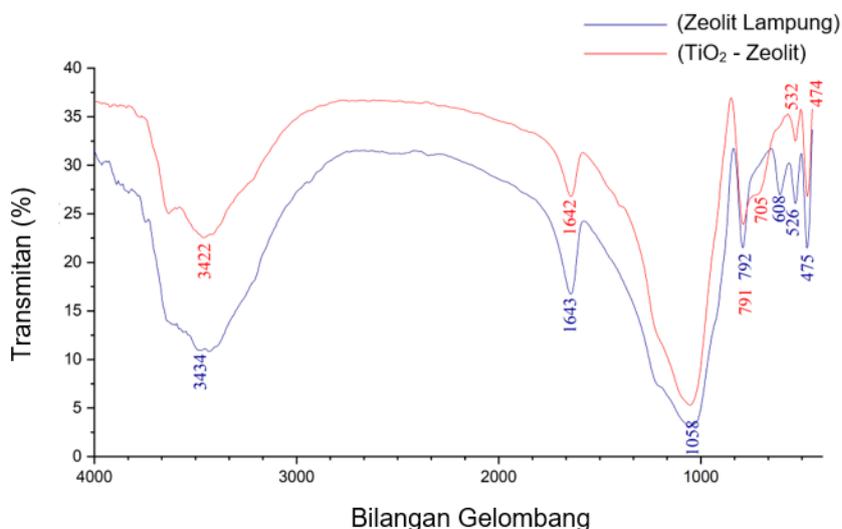
Q_e = Kapasitas adsorpsi saat setimbang
 Q_t = Kapasitas adsorpsi saat waktu (t)
 t = waktu (menit)
 k_1 = Konstanta laju orde 1 semu
 k_2 = Konstanta laju orde 2 semu

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Karakterisasi adsorben TiO₂-zeolit Lampung

Hasil karakterisasi zeolit Lampung dan adsorben TiO₂-zeolit menggunakan FTIR ditunjukkan pada Gambar 2. Karakterisasi yang pertama dilakukan dengan menggunakan spektroskopi FTIR untuk melihat terbentuknya ikatan TiO₂ dengan zeolit. Spektrum FTIR zeolit dan TiO₂-zeolit dapat dilihat pada Gambar 2.

Gambar 2 menunjukkan jika zeolit Lampung dan TiO₂ zeolit memiliki gugus fungsi yang mirip. Terdapat puncak serapan gugus O-H, Si-O, dan Al-O yang merupakan puncak serapan zeolit. Perbedaan mulai terlihat dari bilangan gelombang 790 – 500 cm⁻¹. Zeolit Lampung memiliki puncak serapan pada bilangan gelombang 608 cm⁻¹, sedangkan TiO₂-zeolit memiliki puncak serapan pada bilangan gelombang 705 cm⁻¹. Puncak serapan TiO₂-zeolit juga mengalami pergeseran pada bilangan gelombang 532 cm⁻¹. Perbedaan puncak serapan zeolit dan TiO₂-zeolit tercantum juga pada Tabel 1.

Gambar 2. Spektrum FTIR zeolit lampung (biru) dan TiO₂-zeolit (merah)Tabel 1. Puncak serapan FTIR zeolit lampung dan TiO₂-zeolit.

Zeolit Lampung (cm ⁻¹)	TiO ₂ -Zeolit (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi
3434	3422	O-H
1634	1642	O-H
1058	1053	Si-O-Si
792	791	Si-O
608	705	Si-O
526	532	Ti-O-Si
475	474	Al-O

TiO₂-zeolit memiliki puncak serapan yang melebar pada bilangan gelombang 705 cm⁻¹ karena adanya ikatan Ti-O-Si [12]. Puncak serapan lain TiO₂-zeolit juga mengalami pergeseran pada bilangan gelombang 532 cm⁻¹, di mana serapan puncak tersebut mengalami pergeseran mendekati puncak serapan TiO₂, yaitu 536 cm⁻¹ [13]. Spektrum FTIR menunjukkan TiO₂ telah berikatan dengan zeolit Lampung yang ditandai dengan munculnya puncak serapan dari ikatan Ti-O-Si dan Ti-O-Al, serta terdapat pergeseran puncak serapan setelah penambahan TiO₂.

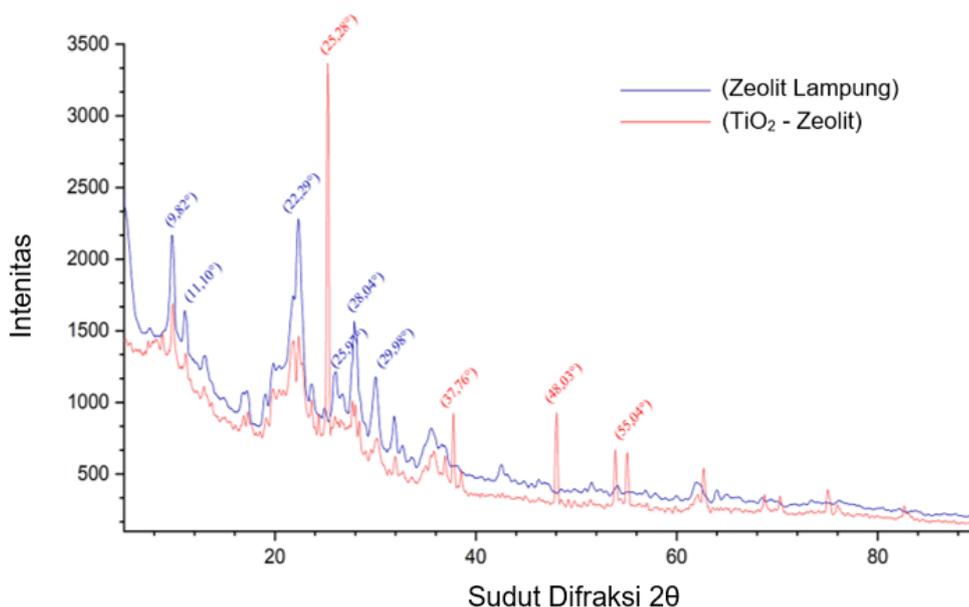
Karakterisasi juga dilakukan menggunakan XRD untuk mengetahui tipe zeolit dan fase TiO₂ yang digunakan, serta mengetahui keberadaan TiO₂ pada zeolit berdasarkan puncak difraktogram yang muncul. Difraktogram zeolit Lampung dan TiO₂-zeolit dapat dilihat pada Gambar 3.

Puncak difraktogram yang muncul pada zeolit Lampung identik dengan puncak difraksi pada zeolit dengan tipe klinoptilolit dan mordenit. Hal ini menunjukkan zeolit Lampung memiliki tipe campuran antara klinoptilolit dan mordenit. Pernyataan ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang mengatakan jika zeolit Lampung, tasikmalaya, dan bayah merupakan zeolit dengan tipe mordenit dan klinoptilolit [14].

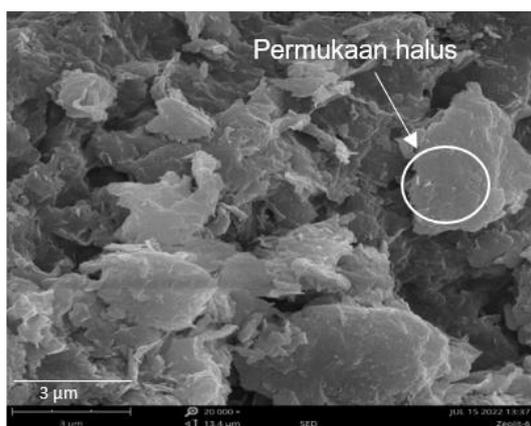
Puncak difraktogram TiO₂-zeolit pada Gambar 3, menunjukkan puncak TiO₂ yang dominan. Puncak yang muncul mengindikasikan TiO₂ yang digunakan memiliki fase anatase. Selain itu, puncak TiO₂ yang dominan muncul juga mengindikasikan jika TiO₂ telah tersebar merata pada permukaan zeolit [13].

Karakterisasi lainnya dilakukan menggunakan SEM untuk melihat morfologi permukaan zeolit dan TiO₂-zeolit. Gambar morfologi permukaan zeolit dan TiO₂-zeolit dapat dilihat pada Gambar 4. Zeolit Lampung sebelum penambahan TiO₂ memiliki bentuk permukaan yang halus, sedangkan pada zeolit yang sudah ditambahkan dengan TiO₂ memiliki permukaan yang lebih kasar karena terdapat butiran-butiran TiO₂ yang menempel pada zeolit. Hasil gambar SEM dapat menguatkan hasil difraktogram TiO₂-zeolit yang mengindikasikan jika TiO₂ tersebar pada permukaan zeolit. Berdasarkan hasil karakterisasi telah terbentuk adsorben TiO₂-zeolit Lampung.

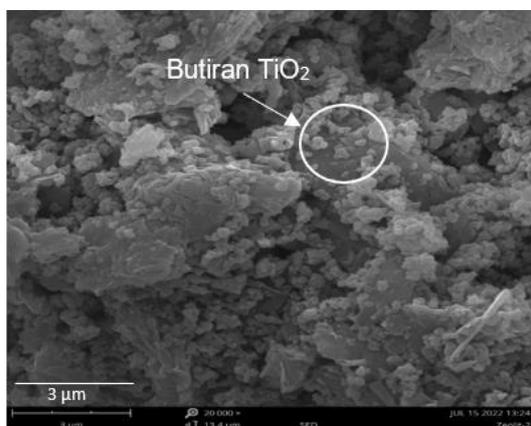
Analisis Perilaku Isoterm, Termodinamika, dan Kinetika Adsorpsi Strontium Menggunakan TiO₂- Zeolit Lampung
(M. Fiqri Sholahudin, Henny Purwaningsih, Erlina Noerpitasari, Boybul, Yanlinastuti)



Gambar 3. Difraktogram zeolit lampung (biru) dan TiO₂-zeolit (merah)



(a)

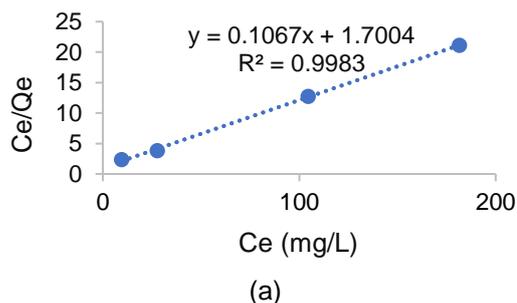


(b)

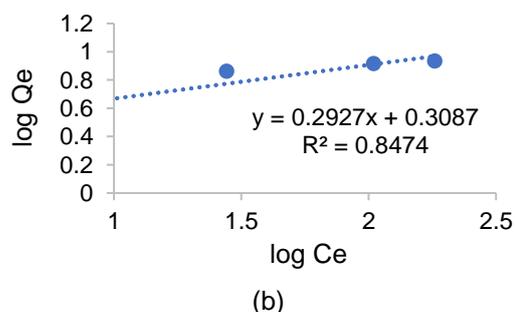
Gambar 4. Morfologi dari zeolit lampung (a) dan TiO₂-zeolit (b) pada perbesaran 20000x

b. Model isoterm adsorpsi strontium menggunakan TiO₂-zeolit

Model isoterm adsorpsi yang diujikan yaitu model isoterm Langmuir dan isoterm Freundlich. Model kurva isoterm adsorpsi yang akan dipilih adalah yang memiliki nilai R² paling mendekati 1 yang menunjukkan model isoterm yang paling sesuai. Kurva linear Isoterm Langmuir dan Freundlich ditunjukkan pada Gambar 5.



(a)



(b)

Gambar 5. Kurva model isoterm Langmuir (a) dan Freundlich (b)

Pada penelitian ini, model isoterm yang sesuai untuk adsorpsi strontium menggunakan TiO₂-zeolit mengikuti persamaan Isoterm Langmuir. Parameter-parameter isoterm adsorpsi ditunjukkan pada Tabel 2. Nilai Q_{max} pada Isoterm Langmuir menunjukkan kapasitas maksimum adsorben sebesar 9,372 mg/g. Nilai K₁ pada Isoterm Langmuir menunjukkan afinitas sisi aktif adsorben. Semakin tinggi nilai K₁, maka kemampuan adsorpsi suatu adsorben akan semakin tinggi karena afinitasnya semakin kuat [15].

Tabel 2. Nilai parameter isoterm adsorpsi strontium

Adsorben	Isoterm Langmuir			Isoterm Freundlich		
	Q _{max}	K ₁	R ²	K _f	n	R ²
TiO ₂ -Zeolit	9,372	0,063	0,998	2,035	3,417	0,847

Berdasarkan model isoterm adsorpsi langmuir dapat diketahui jika proses adsorpsi bersifat sorpsi kimia, homogen, dan adsorbat membentuk monolayer, sehingga dapat diasumsikan jika satu molekul aktif hanya mengikat satu molekul adsorbat [15]. Berdasarkan model isoterm langmuir jumlah kapasitas adsorben dapat ditingkatkan dengan menambahkan jumlah adsorben, sehingga sisi aktif adsorben semakin banyak dan dapat semakin banyak menyerap molekul adsorbat.

c. Model termodinamika adsorpsi strontium menggunakan TiO₂-zeolit

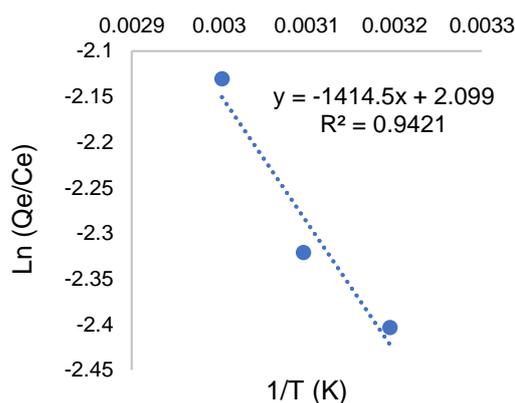
Model termodinamika adsorpsi mengikuti persamaan Van Hoff. Persamaan linear kurva termodinamika dapat memberikan informasi mengenai entropi (ΔS°) dan entalpi (ΔH°). Kurva model termodinamika ditunjukkan pada Gambar 6.

Nilai ΔS° dapat diketahui dari intersep dan nilai ΔH° dapat diketahui dari *slope* kurva termodinamika Gambar 6. Nilai energi Gibbs didapat dari perhitungan menggunakan persamaan 5 setelah mendapatkan nilai ΔS dan ΔH dari kurva. Nilai parameter termodinamika ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai parameter termodinamika adsorpsi strontium

Adsorben	ΔG (kJ.mol ⁻¹)			ΔS (kJ.mol ⁻¹)	ΔH (kJ.mol ⁻¹)
	313 K	323 K	333 K		
TiO ₂ -zeolit	6,297	6,123	5,948	0,0174	11,760

Nilai $\Delta G > 0$ menunjukkan proses adsorpsi berlangsung tidak spontan dan memerlukan temperatur yang lebih tinggi untuk proses adsorpsi berlangsung spontan. Hal ini ditunjukkan dengan semakin meningkatnya temperatur, nilai ΔG semakin berkurang. Nilai ΔH positif menunjukkan jika proses adsorpsi bersifat endotermis, tetapi nilai $\Delta H < 20$ kJ mol⁻¹ juga mengindikasikan jika proses mekanisme adsorpsi berlangsung secara sorpsi fisik [10]. Hal ini sedikit berbeda dari model isoterm Langmuir yang menunjukkan mekanisme sorpsi kimia. Nilai $\Delta S < 1$ menunjukkan persebaran adsorbat pada permukaan adsorben sangat teratur. Hal ini bersesuaian dengan model isoterm Langmuir di mana satu sisi aktif adsorben berikatan dengan satu molekul adsorbat, sehingga membentuk lapisan monolayer yang lebih teratur.



Gambar 6. Kurva model termodinamika adsorpsi.

d. Model kinetika adsorpsi strontium menggunakan TiO₂-zeolit

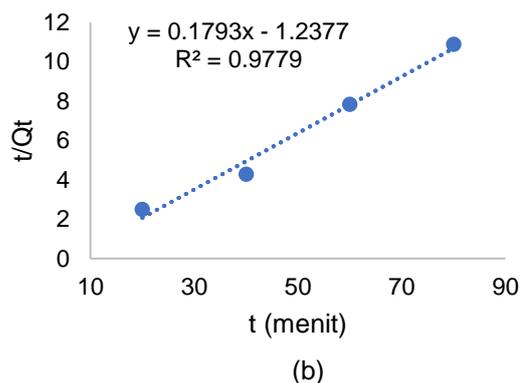
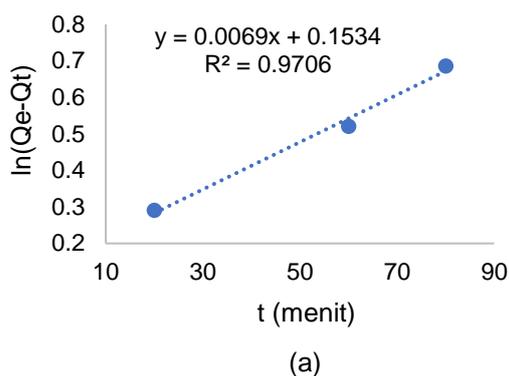
Model kinetika adsorpsi diujikan menggunakan persamaan kinetika orde satu semu dan orde dua semu (persamaan 6 dan 7). Model kinetika adsorpsi ditentukan berdasarkan nilai R² pada kurva yang paling mendekati satu. Kurva model kinetika dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan nilai R², kinetika adsorpsi mengikuti persamaan orde dua semu. Persamaan linear kurva tersebut digunakan untuk menghitung parameter kinetika adsorpsi yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Nilai Q_e adalah nilai kapasitas adsorpsi saat kesetimbangan. Q_e hitung orde dua semu lebih mendekati dengan Q_e percobaan, sehingga laju adsorpsi mengikuti orde dua semu. Nilai K menunjukkan konstanta laju

Analisis Perilaku Isoterm, Termodinamika, dan Kinetika Adsorpsi Strontium Menggunakan TiO₂- Zeolit Lampung (M. Fiqri Sholahudin, Henny Purwaningsih, Erlina Noerpitasari, Boybul, Yanlinastuti)

adsorpsi. Pada penelitian ini, nilai K yang didapat bernilai negatif, hal ini terjadi karena kapasitas adsorpsi semakin berkurang seiring dengan bertambahnya waktu kontak adsorben dan adsorbat. Rentang waktu kontak proses adsorpsi kemungkinan terlalu jauh, menyebabkan terlewatnya titik kesetimbangan dan turunnya kemampuan adsorpsi.

Laju adsorpsi yang mengikuti persamaan orde dua semu menjelaskan jika kemampuan adsorpsi berbanding lurus dengan jumlah sisi aktif dan luas permukaan adsorben. hal ini sesuai dengan model isoterm Langmuir yang juga menjelaskan kapasitas adsorpsi akan meningkat dengan meningkatnya sisi aktif adsorben.



Gambar 7. Kurva model isoterm kinetika orde satu semu (a) dan orde dua semu (b)

Tabel 4. Nilai parameter kinetika adsorpsi strontium

Adsorben	Q _e percobaan	Orde 1 semu			Orde 2 semu		
		Q _e hitung	k ₁	R ²	Q _e hitung	k ₂	R ²
TiO ₂ -zeolit	8,027	1,167	-0,0069	0,9706	5,577	-0,0259	0,9779

SIMPULAN

Adsorben TiO₂-zeolit Lampung telah berhasil dibentuk dari zeolit Lampung yang dimodifikasi dengan TiO₂. Karakterisasi menggunakan spektrofotometer FTIR menunjukkan adanya puncak serapan Ti-O-Si pada adsorben TiO₂-zeolit. Karakterisasi XRD menunjukkan zeolit Lampung merupakan zeolit tipe klinoptilolit dan mordenit. Karakterisasi SEM menunjukkan morfologi permukaan TiO₂-zeolit yang menjadi lebih kasar karena TiO₂ yang terdapat pada permukaan zeolit. Proses adsorpsi strontium mengikuti model isoterm adsorpsi Langmuir dan perhitungan termodinamika menunjukkan proses adsorpsi strontium terjadi secara sorpsi fisik, endotermis, dan berlangsung tidak spontan. Laju adsorpsi mengikuti persamaan orde dua semu. TiO₂-zeolit memiliki kinerja yang baik sebagai adsorben karena kapasitas adsorpsinya yang tinggi, tetapi memerlukan penambahan temperatur untuk mempercepat proses adsorpsinya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PRTDBBNLR yang telah memberikan ijin kepada penulis untuk melakukan penelitian ini, serta kepada seluruh staf IRM yang telah membantu pelaksanaan kegiatan penelitian ini.

PERNYATAAN KONTRIBUSI PENULIS

Kontributor utama dalam makalah ini adalah M. Fiqri Sholahudin, Henny Purwaningsih, dan Erlina Noerpitasari, sedangkan kontributor anggota adalah Yanlinastuti dan Boybul.

DAFTAR PUSTAKA

[1] N. Vajda and C. K. Kim, "Determination of radiostrontium isotopes: A review of analytical methodology," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 68, no. 12, pp. 2306–2326, 2010, doi: 10.1016/j.apradiso.2010.05.013.

[2] M. P. Dion, *et al*, "Analytical determination of radioactive strontium and cesium by thermal ionization

- mass spectrometry,” *Int. J. Mass Spectrom.*, vol. 449, p. 116273, 2020, doi: 10.1016/j.ijms.2019.116273.
- [3] M. H. Jahangiri and H. Tavakoli-Anbaran, “Optimization and minimization of dimensions of direct charging nuclear battery based on 90sr radioactive source for use in mems,” *Arab.J. Sci. Eng.*, vol. 46, no. 6, pp. 5921–5932, 2021, doi: 10.1007/s13369-020-05068-3.
- [4] A. M. Dianu and R. I. Dobrin, “Separation and quantification of 90sr from ion-exchange resin radioactive waste: methods and techniques of analysis,” *Radiochim. Acta*, vol. 108, no. 8, pp. 627–640, 2020, doi: 10.1515/ract-2019-3213.
- [5] A. B. Ginting, D. Anggraini, S. Indaryati, dan R. Kriswarini, “Karakterisasi komposisi kimia, luas permukaan pori dan sifat termal dari zeolit bayah, tasikmalaya, dan lampung,” *J. Teknol. Bahan Bakar Nukl.*, vol. 3, no. 1, hal. 38–48, 2007.
- [6] B. Samiey, C. H. Cheng, and J. Wu, “Organic-inorganic hybrid polymers as adsorbents for removal of heavy metal ions from solutions: A review,” *Materials (Basel)*, vol. 7, no. 2, pp. 673–726, 2014, doi: 10.3390/ma7020673.
- [7] K. T. Basuki, M. Fatuzzahroh, D. Ariyanti, and A. Saputra, “Adsorption of strontium from an aqueous solution by TiO₂-pillared zeolite,” vol. 12, no. 1, pp. 625–634, 2021, doi: 10.14716/ijtech.v12i3.4376.
- [8] E. Supriyanto, A. Holikin, dan S. Suwardiyanto, “The thermal annealing effect on crystal structure and morphology of titanium dioxide (TiO₂) powder,” *J. Ilmu Dasar*, vol. 15, no. 1, hal. 37, 2014, doi: 10.19184/jid.v15i1.638.
- [9] S. Nafi’ah, “Kinetika adsorpsi timbal dengan adsorben sabut siwalan terxanthasi rohmatun,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2017.
- [10] Y. A. B. Neolaka, Y. Lawa, J. N. Naat, Y. K. Nubatonis, dan A. A. Pau, “Studi termodinamika adsorpsi Pb(ii) menggunakan adsorben magnetik Go-Fe₃O₄ yang disintesis dari kayu kusambi (schleichera oleosa),” *J. Saintek Lahan Kering*, vol. 2, no. 2, hal. 49–51, 2019.
- [11] B. haryanto, W. K Sinaga, dan F. T Saragih, “kajian model interaksi pada adsorpsi logam berat kadmium (Cd²⁺) dengan menggunakan adsorben dari pasir hitam,” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 8, no. 2, hal. 79–84, 2019, doi: 10.32734/jtk.v8i2.2032.
- [12] A. Rahman, M. Nurjayadi, E. Kusriani, dan E. A. Prasetyanto, “Enhanced activity of TiO₂ / natural zeolite composite for degradation of methyl orange under visible light irradiation,” *Int. J. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 1159–1167, 2018, doi: 10.14716/ijtech.v9i6.2368.
- [13] Y. Utubira, K. Wijaya, T. Triyono, and E. Sugiharto, “Preparation and characterization of TiO₂-zeolite and its application to degrade textile wastewater by photocatalytic method,” *Indones. J. Chem.*, vol. 6, no. 3, pp. 231–237, 2010, doi: 10.22146/ijc.21724.
- [14] I. Setiawan *et al.*, “Geologi dan petrokimia endapan zeolit daerah bayah dan sukabumi,” *Ris. Geol. dan Pertamb.*, vol. 30, no. 1, p. 39, 2020, doi: 10.14203/risetgeotam2020.v30.1048.
- [15] A. D. Susanti, W. B. Sediawan, and S. K. Wirawan, “Model isoterm kesetimbangan adsorpsi oryzanol dalam minyak bekatul pada adsorben silika gel dengan fase gerak n-heksana : aseton,” pp. 1–5, 2015.