

Studi Model Isoterm Adsorpsi Kristal Violet oleh Biosorben Kulit Ubi Kayu (*Manihot esculenta*)

Study of Adsorption Isotherm Model for Crystal Violet on Cassava Peel (Manihot esculenta) Biosorbent

Muhammad Dafin Ramadhan*, Iriany, Erni Misran, Muhammad Turmuzi
Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara
Jalan Almamater Kampus USU, Medan 20155, Indonesia

* Email: dafinxt@gmail.com

Abstrak

Kristal violet adalah zat warna yang memiliki banyak manfaat, namun limbahnya dapat berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Adsorpsi merupakan metode yang paling berguna untuk menyisihkan limbah kristal violet dibandingkan dengan metode-metode pemisahan yang lain karena efisiensi dan viabilitasnya. Salah satu adsorben yang berpotensi adalah biosorben kulit ubi kayu. Kulit ubi kayu layak dijadikan adsorben karena kandungan selulosa, hemiselulosa, dan ligninnya yang tinggi. Dalam melakukan adsorpsi, mendapatkan model isoterm yang paling tepat merupakan hal penting untuk memprediksi parameter adsorpsi dan sistem adsorben. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan model isoterm adsorpsi yang paling cocok untuk penyerapan kristal violet oleh biosorben kulit ubi kayu dengan keakuratan yang cukup tinggi serta mendapatkan model gabungan dari model isoterm adsorpsi yang paling cocok dengan persamaan neraca massa untuk memprediksi efisiensi penyisihan. Penelitian ini dilakukan menggunakan data sekunder dengan memanfaatkan MATLAB sebagai alat bantu untuk melakukan regresi non-linier dan iterasi Newton-Raphson. Pada penelitian ini diperoleh model Sips sebagai model yang paling cocok dengan $q_{ms} = 374,3$ mg/g dan heterogenitas sistem sebesar 0,5933. Untuk memprediksi massa adsorben : volume adsorbat minimum namun efisiensi penyisihan tetap $\geq 90\%$, diperoleh persamaan korelasi $\frac{m}{V} = -1.10^{-11}C_0^4 + 2.10^{-8}C_0^3 - 2.10^{-5}C_0^2 + 0,015C_0 + 1,2686$.

Kata kunci: kristal violet, kulit ubi kayu, isoterm adsorpsi, efisiensi penyisihan

Abstract

Crystal violet is a dye that has many uses, but its waste can be harmful to humans and the environment. Adsorption is the most useful method for removing crystal violet waste compared to other separation methods because of its efficiency and viability. Cassava peel is a material that has potential to be an adsorbent. Cassava peel is suitable as an adsorbent because of its high cellulose, hemicellulose, and lignin content. In carrying out adsorption, getting the most appropriate isotherm model is important for predicting the adsorption parameters and the adsorbent system. This study aims to obtain an adsorption isotherm model that is the most suitable for the adsorption of crystal violet by cassava peel biosorbent with high accuracy and to obtain a combined model of the adsorption isotherm model that is the most suitable with the mass balance equation to predict removal efficiency. This research was conducted using secondary data using MATLAB as a supporting tool to perform a non-linear regression and Newton-Raphson iteration. In this research, we conclude that Sips model is the most suitable model with $q_{ms} = 374,3$ mg/g and 0,5933 site heterogeneity. For predict adsorbent mass ratio: adsorbate volume minimum ratio but removal efficiency stay at $\geq 90\%$, we obtain a correlation factor: $\frac{m}{V} = -1.10^{-11}C_0^4 + 2.10^{-8}C_0^3 - 2.10^{-5}C_0^2 + 0,015C_0 + 1,2686$.

Keywords: crystal violet, cassava peel, adsorption isotherm, removal efficiency

Pendahuluan

Banyak industri, seperti industri zat warna, tekstil, farmasi, kertas, plastik, dan penyamakan menggunakan warna untuk produk-produknya. Dari industri-industri tersebut, industri tekstil merupakan pengguna zat warna terbesar. Warna tekstil mencapai

10.000 warna yang berbeda dengan estimasi produksi tahunannya sebesar 7×10^5 metrik ton yang tersedia secara komersial di seluruh dunia. Hasilnya, sejumlah besar pewarna sering dilepaskan sebagai limbah ke perairan [1]. Kristal violet adalah salah satu zat warna yang dikenal karsinogen dan mutagen. Zat warna ini

dapat mengiritasi kulit apabila terserap dalam jumlah tertentu. Dalam kasus yang lebih parah, kristal violet dapat menyebabkan komplikasi pernapasan, gagal ginjal, serta kebutaan [2].

Beberapa studi telah dilakukan untuk menyisahkan zat warna dengan metode-metode yang bervariasi, seperti adsorpsi, koagulasi, nano-filtrasi dan ozonolisis, filtrasi membran, dan proses oksidasi, dimana adsorpsi adalah metode yang paling berguna karena efisiensi dan viabilitasnya [3]. Berbagai jenis adsorben biomassa telah digunakan sebagai prekursor untuk mengadsorpsi zat warna [2,4-6].

Kulit ubi kayu sering dianggap remeh sehingga menjadi limbah, padahal banyak manfaat yang didapat darinya [7]. Kulit ubi kayu dapat dijadikan adsorben disebabkan kandungan selulosa, hemiselulosa, dan ligninnya yang tinggi [8]. Beberapa penelitian dalam memanfaatkan kulit ubi kayu sebagai adsorben dalam bentuk karbon aktif telah dilakukan [6,9], akan tetapi mengubahnya menjadi karbon aktif dinilai membutuhkan konsumsi energi yang tinggi sehingga kurang layak dalam perspektif ekonomi. Oleh karena itu, biosorben dapat dijadikan jawaban akan hal ini [10]. Dalam penerapan biosorben dari kulit ubi kayu untuk menyerap zat warna, sebuah penelitian telah dilakukan dengan adsorbat metilen biru [11].

Informasi terpenting untuk memahami proses adsorpsi adalah informasi kesetimbangan adsorpsi. Dalam hal ini, isoterm adsorpsi dapat mendeskripsikan performa kesetimbangan adsorben pada temperatur konstan [12]. Ada banyak model isoterm adsorpsi, contohnya adalah model Freundlich, Langmuir, Jovanovich, Redlich-Peterson, Sips, dan Toth [13]. Sebagian besar publikasi menggunakan metode regresi linier untuk mengestimasi parameter-parameter pada model isoterm adsorpsi. Metode ini simpel, akan tetapi model adsorpsi yang telah dilinierisasi dapat mengubah variabel yang tetap dan terikat, serta memperbanyak ralat [14]. Model isoterm adsorpsi dapat diselesaikan tanpa harus menggunakan metode linierisasi dengan *fitting* data menggunakan program MATLAB [15]. Model isoterm dapat digabungkan dengan neraca massa untuk memprediksi efisiensi penyisihan (*removal*) adsorbat. Model gabungan ini nantinya dapat diselesaikan dengan metode analisis numerik Newton-Raphson [16].

Teori

Adsorpsi adalah teknik pemisahan dimana komponen pada fasa fluida dijerap pada permukaan suatu padatan. Sejak awal 1950-an, teknik pemisahan ini populer dan penting dengan berkembangnya proses modern yang melibatkan pemisahan. Performa teknik ini bergantung pada konsentrasi kesetimbangan adsorben-adsorbat dan laju perpindahan massa [17]. Adsorpsi biasanya terjadi secara satu lapis

(*monolayer*), namun terkadang juga terjadi pada lapisan yang banyak [18].

Pada adsorpsi, adsorbat adalah substansi yang dijerap sedangkan adsorben adalah bahan yang berfungsi sebagai penjerap [19]. Adsorben pada umumnya adalah bahan yang sangat berpori [20]. Bahan adsorben diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yang pertama adalah *engineered adsorbent*, seperti karbon *nanotube* dan karbon aktif, dan kelompok yang kedua adalah *natural* atau *low-cost adsorbent* seperti bahan alami yang dimodifikasi, limbah industri, dan limbah agrikultur/biologi. Beberapa tahun belakangan ini, limbah agrikultur didapati merupakan adsorben yang memiliki efektivitas penyisihan yang tinggi pada zat warna dan ion logam dari larutan, khususnya limbah yang memiliki kandungan selulosa yang tinggi [21].

Data kesetimbangan adsorpsi dapat dimodelkan dengan isoterm, kemudian diteliti informasi adsorpsinya, seperti mekanisme adsorpsi, kapasitas adsorpsi maksimum, serta sifat dari adsorben dengan menggunakan isoterm. Sebagian besar publikasi menggunakan metode regresi linier untuk mengestimasi parameter-parameter pada model isoterm adsorpsi [14]. Studi menunjukkan bahwa merubah model isoterm ke dalam bentuk linier dapat mengakibatkan ralat pada struktur data eksperimen. Biasanya, regresi non-linier dapat meminimalisasi distribusi ralat antara isoterm prediksi dengan data eksperimen [12].

Model isoterm yang berbeda menunjukkan mekanisme adsorpsi yang berbeda. Pada umumnya, kita tidak mengetahui mekanisme seperti apa yang mungkin terjadi sehingga diperlukan model isoterm sebagai alat untuk meneliti mekanisme adsorpsi daripada memahami mekanismenya secara langsung. Kriteria dalam pemilihan model isoterm adsorpsi terbaik adalah harus ada kecocokan antara fungsi isoterm dengan data. Model isoterm terbaik ditentukan secara parameter statistik [12,14]. *Coefficient of determination* (R^2) adalah salah satu fungsi ralat yang digunakan untuk uji kesesuaian fungsi isoterm dengan data. Fungsi ralat ini dapat digunakan baik untuk model isoterm adsorpsi dalam bentuk linier maupun non-linier [12].

Metodologi Penelitian

Data sekunder diambil dari hasil penelitian dengan judul “Adsorpsi Zat Warna Kristal Violet Menggunakan Limbah Kulit Singkong (*Manihot esculenta*)” [22]. Data yang diambil adalah data massa adsorben (m), volume adsorbat (V), konsentrasi awal adsorbat (C_0) dan data efisiensi penyisihan (%). Penelitian ini dilakukan dengan alat bantu program MATLAB untuk melakukan *curve fitting* model isoterm adsorpsi secara non-linier dan untuk mempermudah penggunaan metode Newton-Raphson.

Data sekunder yang diperoleh digunakan untuk menghitung kapasitas adsorpsi setimbang (q_e) dan konsentrasi setimbang adsorbat (C_e). Data ini akan digunakan untuk *curve fitting* antara data dengan model-model isoterm adsorpsi, meliputi model Freundlich, Langmuir, Jovanovich, Redlich-Peterson, Sips, dan Toth pada program MATLAB. Model yang paling cocok akan digabungkan dengan neraca massa sehingga dapat digunakan untuk memprediksi efisiensi penyisihan dengan bantuan program MATLAB.

Hasil

Data Sekunder

Data sekunder digunakan untuk memperoleh data konsentrasi setimbang adsorbat (C_e) menggunakan Persamaan (1) dan kapasitas adsorpsi ketika setimbang (q_e) menggunakan Persamaan (2) [23].

$$\text{Removal (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} 100 \dots\dots\dots (1)$$

$$q_e = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) V \dots\dots\dots (2)$$

Dimana *Removal* (%) adalah efisiensi penyisihan, C_0 (mg/L) adalah konsentrasi awal adsorbat, C_e (mg/L) adalah konsentrasi setimbang adsorbat, q_e (mg/g) adalah kapasitas adsorpsi setimbang, m (g) adalah massa adsorben, dan V (L) adalah volume larutan. Data sekunder yang diambil ditunjukkan pada Tabel 1 [22].

Tabel 1. Data Sekunder

m (g)	V (L)	C_0 (mg/L)	Removal (%)
0,1	0,02	100	96,68
		200	95,93
		300	91,66
		400	88,25
		500	86,54
		600	86,04
		700	85,09
		800	81,51
		900	79,27
		1000	75,08

Isoterm Adsorpsi

Pada umumnya penentuan isoterm adsorpsi dilakukan dengan membandingkan model pada sistem *monolayer* [2,4–6,24]. Hal ini disebabkan pada sistem *monolayer* seluruh *site* yang ada ditempati, sedangkan pada sistem *multilayer* memungkinkan terbentuknya *site* yang kosong [25] sehingga banyaknya molekul yang terjerap sulit diprediksi. Selain itu, pada sistem

monolayer mengimplikasikan adsorpsi yang reversibel, sedangkan pada sistem *multilayer* histeresis mungkin terjadi [26].

Pada beberapa penelitian dengan biomassa sebagai prekursor dan zat warna sebagai adsorbatnya, diperoleh, Redlich-Peterson (R-P), Sips, dan Toth sebagai model terbaik [5], Freundlich dan Langmuir sebagai model terbaik [2], dan Jovanovich sebagai model terbaik [24], dimana semuanya adalah model dengan sistem *monolayer*. Oleh karena itu, pada pembahasan ini digunakan beberapa model isoterm adsorpsi *monolayer*, yaitu model Freundlich, Langmuir, Jovanovich, R-P, Sips, dan Toth. Sebagai pembandingan, pada penelitian ini juga dilakukan percobaan pada model Halsey yang merupakan model isoterm adsorpsi *multilayer*. R^2 yang diperoleh pada *fitting* model Halsey adalah -3,513 yang menunjukkan ketidaksesuaian dengan data. Model isoterm adsorpsi Freundlich, Langmuir, R-P, Sips, dan Toth ditunjukkan pada Persamaan 3-8 berikut [13-14].

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \dots\dots\dots (3)$$

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \dots\dots\dots (4)$$

$$q_e = q_m J (1 - e^{-K_J C_e}) \dots\dots\dots (5)$$

$$q_e = \frac{K_{RP} C_e}{1 + a_{RP} C_e^g} \dots\dots\dots (6)$$

$$q_e = \frac{q_{ms} K_S C_e^{n_s}}{1 + K_S C_e^{n_s}} \dots\dots\dots (7)$$

$$q_e = \frac{q_m T C_e}{(a_T + C_e^z)^{1/z}} \dots\dots\dots (8)$$

Hasil *curve fitting* persamaan di atas ditunjukkan pada Gambar 1.

Persamaan (3) merupakan model isoterm Freundlich. Pada persamaan ini, K_F ($L^{1/n} \text{mg/g} \cdot \text{mg}^{1/n}$) dan n adalah konstanta Freundlich. Model isoterm Freundlich mendefinisikan permukaan yang heterogen. Selain itu, model ini juga tidak mengharuskan panas terdistribusi secara seragam pada permukaan tersebut. Model isoterm Freundlich juga dapat menjelaskan apakah adsorpsi yang terjadi menguntungkan, tidak menguntungkan, atau ireversibel menggunakan $1/n$. Apabila $1/n$ antara 0 dan 1, adsorpsi yang terjadi menguntungkan. Apabila $1/n$ lebih besar dari 1, adsorpsi yang terjadi tidak menguntungkan. Sedangkan apabila $1/n$ sama dengan 1, maka adsorpsi yang terjadi adalah ireversibel. Apabila diperoleh adsorpsi yang ireversibel, diperlukan untuk mengurangi tekanan atau konsentrasi secara drastis ke nilai yang lebih rendah [12].

Model isoterm Langmuir yang ditunjukkan pada Persamaan (4) adalah model yang menggunakan asumsi bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan yang homogen dimana tiap molekul memiliki energi aktivasi penjerapan dan entalpi yang konstan. Pada model ini, K_L (L/mg) adalah rasio dari laju adsorpsi

dan desorpsi dan q_m (mg/g) adalah kapasitas adsorpsi maksimum Langmuir. Sama halnya dengan isoterm Freundlich, isoterm Langmuir dapat menjelaskan apakah adsorpsi yang terjadi linier, ireversibel, tidak menguntungkan, ataupun menguntungkan dengan *separation factor* (R_L) pada Persamaan (9) [12].

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \dots \dots \dots (9)$$

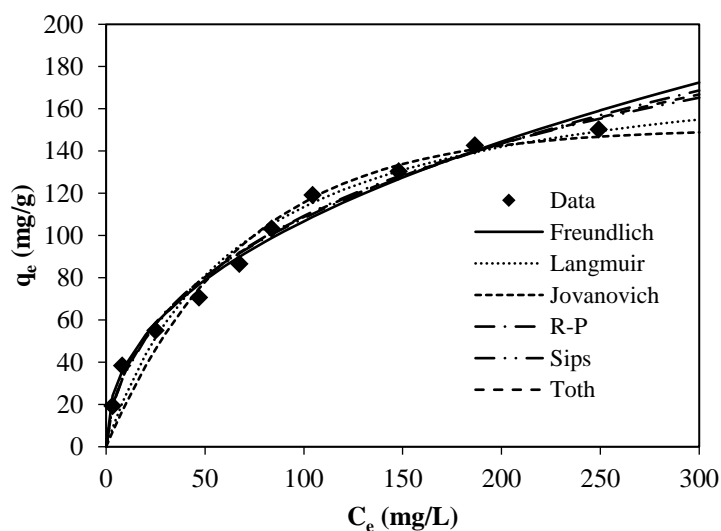
Apabila $R_L=1$, maka adsorpsi yang terjadi linier. Apabila $R_L=0$, maka adsorpsi yang terjadi adalah ireversibel. Apabila R_L lebih besar dari 1, maka adsorpsi yang terjadi tidak menguntungkan. Sedangkan apabila R_L antara 0 dan 1, maka adsorpsi yang terjadi menguntungkan [12].

Pada model Jovanovich yang ditunjukkan pada Persamaan (5), digunakan asumsi yang sama dengan model Langmuir, akan tetapi pada model ini ada kemungkinan terjadinya kontak mekanik antara molekul adsorben dan molekul adsorbat [13]. Berdasarkan *curve fitting* yang dilakukan, diperoleh nilai q_{mJ} (mg/g) sebesar 150,70, K_J (L/mg) sebesar 0,0146, serta R^2 sebesar 0,9562. Pada model ini, K_J (L/mg) adalah konstanta Jovanovich dan q_{mJ} (mg/g) adalah kapasitas adsorpsi maksimum Jovanovich.

Model R-P yang ditunjukkan pada Persamaan (6) merupakan model *hybrid* dari model Langmuir dan Freundlich yang dapat diterapkan baik pada sistem heterogen maupun homogen [14]. Pada model ini, K_{RP} (L/g), a_{RP} (L^g/mg^g), adalah konstanta Redlich-Peterson dan g adalah eksponen.

Model Sips juga merupakan model *hybrid* dari gabungan model Langmuir dan Freundlich. Model ini ditunjukkan pada Persamaan (7). Pada model ini, q_{ms} (mg/g) adalah kapasitas adsorpsi maksimum Sips, K_s (L^{n_s}/mg^{n_s}) dan n_s adalah konstanta Sips [14]. Model Sips merupakan model yang memiliki parameter yang menjelaskan heterogenitas sistem. Pada Model Sips parameter tersebut adalah n_s . Semakin nilai n_s mendekati 1 atau bahkan bernilai 1, maka ini mengindikasikan padatan yang memiliki *binding sites* homogen secara relatif [13].

Sama halnya dengan model Sips, model Toth yang ditunjukkan pada Persamaan (8) merupakan model yang memiliki parameter yang menjelaskan heterogenitas sistem, dimana q_{mT} (mg/g) adalah kapasitas adsorpsi maksimum Toth dan a_T adalah konstanta Toth, serta z adalah eksponen model Toth. Pada Model Toth parameter tersebut adalah z [13].



Gambar 1. Hasil Curve Fitting Model Isoterm Adsorpsi

Studi Model Isoterm Adsorpsi

Parameter-parameter model isoterm adsorpsi yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 2. Data adsorpsi menggunakan konsentrasi adsorbat dengan rentang yang luas secara umum dibahas menggunakan isoterm Langmuir dan Freundlich [27]. Pada Tabel 2 dapat dilihat, bahwa nilai R^2 pada model isoterm Freundlich, yaitu $R^2 = 0,9827$ lebih besar dari model dari model isoterm Langmuir dengan $R^2 = 0,9675$. Dari sini dapat disimpulkan, bahwa adsorpsi kristal violet oleh kulit ubi kayu terjadi pada permukaan yang

heterogen. Hal ini sejalan dengan pernyataan Kosasih dkk. (2010) bahwa biomassa adalah bahan yang bersifat heterogen. Model isoterm Freundlich juga dapat menjelaskan apakah adsorpsi yang terjadi menguntungkan, tidak menguntungkan, atau ireversibel menggunakan $1/n$. Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa nilai n pada model Freundlich adalah 2,292 sehingga $1/n$ -nya adalah 0,44. Ini menunjukkan bahwa adsorpsi yang terjadi menguntungkan.

Model Sips dan Toth merupakan model yang dapat mendefinisikan heterogenitas sistem.

Berdasarkan Tabel 2, model Sips yang memiliki $R^2 = 0,9870$ lebih cocok digunakan daripada model Toth yang memiliki $R^2 = 0,9860$. Sehingga, digunakan parameter n_s pada model Sips yang bernilai $n_s = 0,5933$.

Secara keseluruhan, model isoterm Sips memiliki nilai R^2 yang paling tinggi sehingga dapat disimpulkan bahwa model isoterm Sips adalah model yang paling cocok dalam mendefinisikan penjerapan kulit ubi kayu terhadap kristal violet. Hasil yang sama juga diperoleh pada adsorpsi *reactive red 238* oleh biosorben kulit pistasio [28] dan pada adsorpsi *congo red* oleh biosorben kulit kacang mete [5]. Hal ini sesuai dengan sebuah kesimpulan bahwa model Sips adalah model isoterm adsorpsi *monolayer* dengan 3 parameter yang paling *applicable* [13-14]. Dengan menggunakan model Sips, maka diperoleh kapasitas adsorpsi maksimum kulit ubi kayu terhadap kristal violet adalah 374,3 mg/g dengan heterogenitas sistem sebesar 0,5933 dan K_s (L^{n_s}/mg^{n_s}) sebesar 0,0268.

Tabel 2. Data Parameter Model Isoterm Adsorpsi

Model	Parameter	Nilai
Freundlich	K_F	14,3200
	n	2,2920
	R^2	0,9827
Langmuir	K_L	0,0150
	q_m	189,4000
	R^2	0,9675
Jovanovich	K_J	0,0146
	q_{mf}	150,7000
	R^2	0,9562
Redlich-Peterson (R-P)	K_R	14,1900
	A_{RP}	0,6629
	g	0,6310
	R^2	0,9849
Sips	K_s	0,0268
	n_s	0,5933
	q_{ms}	374,3000
	R^2	0,9870
Toth	a_T	1,9160
	q_{mT}	1358,0000
	z	0,2138
	R^2	0,9860

Berdasarkan makna fisik model, model-model isoterm adsorpsi terbagi menjadi 5 tipe, yaitu isoterm adsorpsi empiris, model adsorpsi berbasis teori potensial Polanyi, model adsorpsi kimia, model adsorpsi fisika, dan model isoterm pertukaran ion. Model Sips, Toth, R-P, dan Freundlich yang merupakan 3 model yang memiliki R^2 yang paling tinggi pada penelitian ini merupakan model isoterm adsorpsi empiris. Model isoterm adsorpsi empiris merupakan model yang tidak memiliki makna fisik sehingga tidak dapat dijelaskan seperti apa adsorpsi yang terjadi secara spesifik, apakah yang terjadi adsorpsi fisika, kimia, ataupun pertukaran ion. Dengan demikian, pendekatan untuk model Sips

cukup terbatas. Apabila ditinjau pada model yang cocok urutan kelima pada pembahasan ini, yaitu model Langmuir, maka adsorpsi yang terjadi merupakan jenis adsorpsi kimia [14]. Hal ini sesuai dengan kesimpulan yang diperoleh Irawati dkk. (2018) bahwa adsorpsi yang terjadi pada penjerapan kristal violet oleh biosorben kulit ubi merupakan adsorpsi kimia. Menurut Irawati dkk. (2018), hal ini disebabkan karena energi adsorpsi yang diperoleh adalah 22,38 kJ/mol. Suatu adsorpsi tergolong adsorpsi kimia apabila energi pada proses adsorpsi yang terjadi antara 20,9-418,4 kJ/mol. Hal ini didukung pula dengan gugus karboksil dari lignoselulosa pada permukaan kulit ubi kayu sebagai pemeran utama dalam proses adsorpsi melalui pembentukan ikatan kovalen.

Simulasi Model Isoterm Adsorpsi

Efisiensi penyisihan dapat diprediksi menggunakan Persamaan (10) yang diperoleh dari mengombinasi Persamaan 2 dan 8.

$$K_s C_e^{n_s+1} + \left(\frac{m}{V} q_{ms} - C_0\right) K_s C_e^{n_s} + C_e - C_0 = 0 \dots \dots (10)$$

C_e diperoleh dengan menggunakan Metode Newton-Raphson, kemudian digunakan Persamaan (1) untuk mendapatkan efisiensi penyisihan.

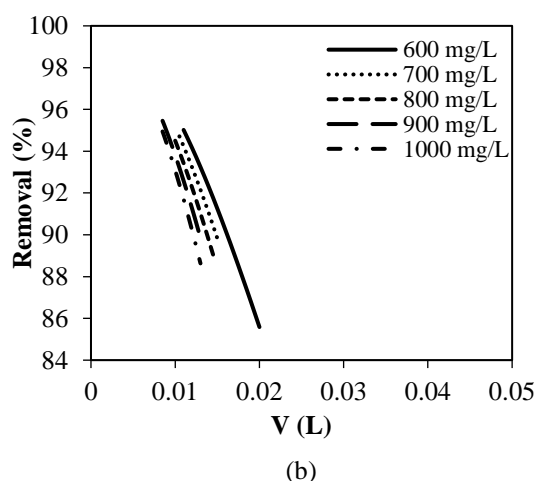
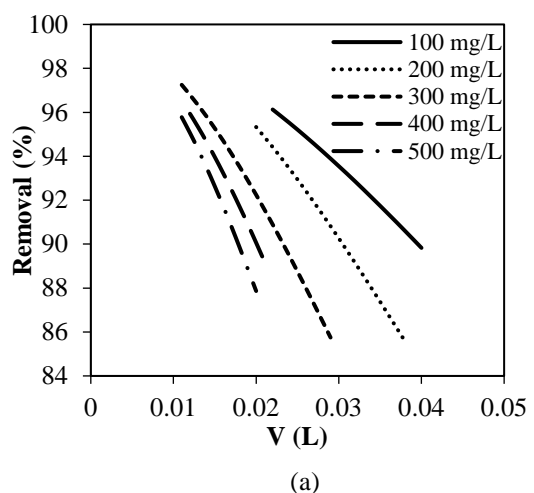
Persamaan (10) akan divalidasi dengan membandingkan antara efisiensi penyisihan prediksi dengan percobaan pada C_0 yang berbeda dengan nilai $m = 0,1$ g dan $V = 0,02$ L. Hasil dari perbandingan tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Validasi Efisiensi Penyisihan

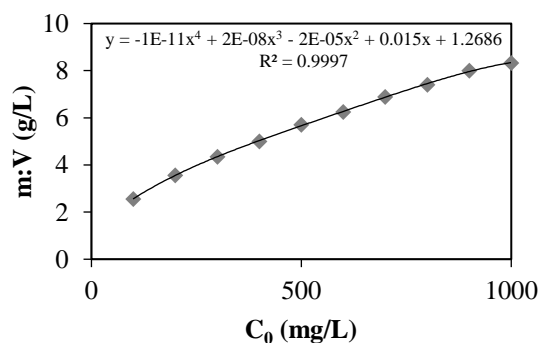
C_0 (mg/L)	Removal (%)		Ralat (%)
	Percobaan	Prediksi	
100	96,68	96,70	0,08
200	95,93	94,42	1,57
300	91,66	92,24	0,64
400	88,25	90,06	2,05
500	86,54	87,85	1,51
600	86,04	85,92	1,14
700	85,09	83,28	2,12
800	81,51	80,95	0,68
900	79,27	78,61	0,83
1000	75,08	76,28	1,60
Rerata			1,12

Dari hasil yang diperoleh, dapat dilihat bahwa Persamaan (10) dapat diaplikasikan untuk memprediksi efisiensi penyisihan karena tidak menunjukkan ralat yang signifikan. Persamaan (10) akan dimanfaatkan untuk memperkirakan rasio massa adsorben : volume adsorbat ($m:V$) minimum dengan nilai efisiensi penyisihan setidaknya 90%. Hubungan efisiensi penyisihan dengan V (L) ditunjukkan pada Gambar 2. Pada prediksi ini digunakan $m = 0,1$ gram.

Berdasarkan Gambar 2, volume maksimum tetapi masih diperoleh efisiensi penyisihan $\geq 90\%$ untuk $C_0 = 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900$, dan 1000 mg/L berturut-turut adalah $0,039, 0,028, 0,023, 0,020, 0,0175, 0,016, 0,0145, 0,0135, 0,0125$ dan $0,012$ L. Dengan data ini, dapat dibuat hubungan $m:V$ (g:L) minimum tetapi masih diperoleh efisiensi penyisihan $\geq 90\%$ dengan C_0 (mg/L).



Gambar 2. Removal (%) vs. V (L); (a) Pada $C_0=100, 200, 300, 400$, dan 500 mg/L; (b) Pada $C_0=600, 700, 800, 900, 1000$ mg/L



Gambar 3. Hubungan $m:V$ (g/L) dengan C_0 (mg/L)

Dari Gambar 3, dapat dibuat persamaan korelasi untuk rasio $m:V$ (g:L) minimum agar efisiensi penyisihan $\geq 90\%$ dengan C_0 (mg/L) dalam Persamaan (12).

$$\frac{m}{V} = -1.10^{-11}C_0^4 + 2.10^{-8}C_0^3 - 2.10^{-5}C_0^2 + 0,015C_0 + 1,2686 \quad (12)$$

dengan nilai C_0 : $100 \leq C_0 \leq 1000$ mg/L.

Kesimpulan

Model isoterm adsorpsi yang paling cocok pada adsorpsi kristal violet oleh biosorben kulit ubi kayu berdasarkan urutannya adalah Sips > Toth > Redlich-Peterson > Freundlich > Langmuir. Adsorpsi yang terjadi adalah *favorable* (menguntungkan), dimana nilai-nilai parameter model Sips yang diperoleh, yaitu kapasitas adsorpsi maksimum sebesar $374,3$ mg/g, heterogenitas sistem sebesar $0,5933$, dan K_S sebesar $0,0268$ L^{ns}/mg^{ns}. Hubungan korelasi rasio massa:volume (g:L) dengan konsentrasi awal adsorbat (C_0) yang diperoleh adalah $\frac{m}{V} = -1.10^{-11}C_0^4 + 2.10^{-8}C_0^3 - 2.10^{-5}C_0^2 + 0,015C_0 + 1,2686$.

Daftar Pustaka

- [1] L. Akinola and A. Umar, "Adsorption of crystal violet onto adsorbents derived from agricultural wastes: Kinetic and equilibrium studies," *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, vol. 19, no. 2, pp. 279–288, 2015.
- [2] G. K. Cheruiyot, W. C. Wanyonyi, J. J. Kiplimo, and E. N. Maina, "Adsorption of toxic crystal violet dye using coffee husks: Equilibrium, kinetics and thermodynamics study," *Sci. African*, vol. 5, pp. 1–11, 2019.
- [3] H. Patel and R. T. Vashi, "Adsorption of crystal violet dye onto tamarind seed powder," *E-Journal Chem.*, vol. 7, no. 3, pp. 975–984, 2010.
- [4] P. C. Bhomick, A. Supong, M. Baruah, C. Pongener, and D. Sinha, "Pine Cone biomass as an efficient precursor for the synthesis of activated biocarbon for adsorption of anionic dye from aqueous solution: Isotherm, kinetic, thermodynamic and regeneration studies," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 10, no. June, pp. 41–49, 2018.
- [5] P. S. Kumar, S. Ramalingam, C. Senthamarai, M. Niranjanaa, P. Vijayalakshmi, and S. Sivanesan, "Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell: Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions," *Desalination*, vol. 261, no. 1–2, pp. 52–60.
- [6] B. H. Beakou, K. El Hassani, M. A. Houssaini, M. Belbahloul, E. Oukani, and A. Anouar, "Novel activated carbon from *Manihot esculenta* Crantz for removal of methylene blue," *Sustain. Environ. Res.*, vol.

- 27, no. 5, pp. 215–222, 2017.
- [7] D. R. Santoso, “Pemanfaatan kulit singkong sebagai bahan baku arang aktif dengan variasi konsentrasi NaOH dan suhu,” Skripsi, Universitas Medan Area, 2016.
- [8] M. Dahiru, Z. U. Zango, and M. A. Haruna, “Cationic dyes removal using low-cost banana peel biosorbent,” *Am. J. Mater. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 32–38, 2018.
- [9] Ariyani, A. R. Putri, R. P. Eka, and R. Fathoni, “Pemanfaatan kulit singkong sebagai bahan baku arang aktif dengan variasi konsentrasi NaOH dan suhu,” *Konversi*, vol. 6, no. 1, p. 7, 2017.
- [10] A. N. Kosasih, J. Febrianto, J. Sunarso, Y. H. Ju, N. Indraswati, and S. Ismadji, “Sequestering of Cu(II) from aqueous solution using cassava peel (*Manihot esculenta*),” *J. Hazard. Mater.*, vol. 180, no. 1–3, pp. 366–374, 2010.
- [11] A. J. Rubio *et al.*, “Removal of methylene blue using cassava bark residue,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 65, pp. 751–756, 2018.
- [12] M. A. Al-Ghouti and D. A. Da’ana, “Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 393, no. February, pp. 1–22, 2020.
- [13] R. Saadi, Z. Saadi, R. Fazaeli, and N. E. Fard, “Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media,” *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 32, no. 5, pp. 787–799, 2015.
- [14] J. Wang and X. Guo, “Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method,” *Chemosphere*, vol. 258, p. 127279, 2020.
- [15] S. Aini and S. Supratikno, “Penerapan lima model kesetimbangan adsorpsi isoterm pada adsorpsi ion logam Chrom VI oleh zeolit,” *Eksergi*, vol. 15, no. 2, p. 48, 2018.
- [16] S. A. A. Harahap *et al.*, “Isothermal approach to predict the removal efficiency of β -carotene adsorption from CPO using activated carbon produced from tea waste,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 309, no. 1, 2018.
- [17] A. Mannarswamy, S. H. Munson-mcgee, R. Steiner, and P. K. Andersen, “Chemometrics and intelligent laboratory systems D-optimal experimental designs for Freundlich and Langmuir adsorption isotherms,” *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 97, no. 2, pp. 146–151, 2009.
- [18] C. J. Geankoplis, *Transport Processes and Separation Process Principle*, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 2003.
- [19] W. Al Arfi, “Kajian kemampuan adsorpsi logam berat kadmium (Cd^{+2}) dan tembaga (Cu^{+2}) serta kompetisi larutan biner dengan menggunakan adsorben dari batang jagung (*Zea mays.*),” Skripsi, Universitas Sumatera Utara, 2017.
- [20] W. L. McCabe, C. Smith, and P. Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering*, 7th ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 2005.
- [21] M. A. Al-Ghouti and M. M. Razavi, “Water reuse: Brackish water desalination using *Prosopis juliflora*,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 17, pp. 1–16, 2020.
- [22] H. Irawati, N. H. Aprilita, and E. Sugiharto, “Adsorpsi Zat warna kristal violet menggunakan limbah kulit singkong (*Manihot esculenta*),” *Berkala MIPA*, vol. 25, no. 1, pp. 17–31, 2018.
- [23] M. Mazarji, B. Aminzadeh, M. Baghdadi, and A. Bhatnagar, “Removal of nitrate from aqueous solution using modified granular activated carbon,” *J. Mol. Liq.*, vol. 233, pp. 139–148, 2017.
- [24] M. R. Samarghandi, M. Hadi, S. Moayed, and F. B. Askari, “Two-parameter isotherms of methyl orange sorption by pinecone derived activated carbon,” *Iran. J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 285–294, 2009.
- [25] J. M. Smith, H. C. V. Ness, M. M. Abbott, and M. T. Swihart, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, 8th ed. New Jersey: McGraw-Hill Education, Inc., 2018.
- [26] J. D. Seader, *Separation Process Principles*, 1st ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [27] O. Keskin, “Isotherm models for predicting the dye adsorption potential of coon tail (*Ceratophyllum demersum*) and water milfoil (*Myriophyllum spicatum*),” *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 321–336, 2006.
- [28] F. Deniz and R. A. Kepekci, “Dye biosorption onto pistachio by-product: A green environmental engineering approach,” *J. Mol. Liq.*, vol. 219, pp. 194–200, 2016.