



Kapasitas Adsorpsi Zat Warna *Malachite Green* Dan *Violet Dye* Menggunakan *Metal Organic Frameworks* (Fe-BDC)

¹Areski Febriani, ²Septika Amalia Umaro, ³Euis Nursa'adah, ⁴Mochammad Lutfi Firdaus

Prodi S2 Pendidikan IPA, JPMIPA, UNIB, Jl. WR. Supratman, Bengkulu, Indonesia

Email: areskied98@gmail.com

Article History

Received: August 2022

Revised: October 2022

Published: December 2022

Abstract

The presence of dye liquid waste from industry that is discharged into public drainage channels will cause environmental pollution, especially water ecosystems. The impact caused when exposed to waste such as health problems, such as allergies, skin irritation, cancer, and mutations in humans. The most widely used waste treatment method is adsorption. This method was chosen because it has high efficiency, easy, and cheap. The success of the adsorption method depends on the type of adsorbent used. One of the adsorbents that has a large adsorption capacity is metal organic frameworks. This study aims to determine the adsorption capacity using a solvothermally synthesized Metal Organic Frameworks adsorbent using FeCl₃.6H₂O metal with terephthalic acid organic ligand. The dyes used as adsorbates are cationic malachite green (MG) and violet dye (VD) which are hazardous wastes from the textile industry in Bengkulu city. Determination of adsorption capacity is done by first determining the optimum conditions which include pH, contact time, adsorbent weight, and temperature. The optimum conditions for MG dye were at pH 5, at a mass of 2.5 mg, a contact time of 60 minutes, at a temperature of 30°C and a concentration of 50 ppm. While the VD dye was at a mass of 10 mg, a contact time of 40 minutes, pH 4, temperature 30°C and a concentration of 50 ppm. The adsorption capacity of MG and VD dyes were 625.00 mg/g and 384.61 mg/g.

Keywords: Adsorption, MOFs, Malachite Green, Violet Dye

Sejarah Artikel

Diterima: Agustus 2022

Direvisi: Oktober 2022

Dipublikasi: Desember 2022

Abstrak

Adanya limbah cair zat warna dari industri yang dibuang ke saluran *drainase* umum akan menyebabkan pencemaran lingkungan terutama ekosistem air. Dampak yang ditimbulkan apabila terpapar limbah diantaranya alergi, iritasi kulit, kanker, mutasi pada manusia serta gangguan kesehatan lainnya. Metode pengolahan limbah yang banyak digunakan yaitu adsorpsi. Metode ini dipilih karena memiliki efisiensi tinggi, mudah, dan murah. Keberhasilan metode adsorpsi bergantung pada jenis adsorben yang digunakan. *Metal Organic Frameworks* merupakan salah satu adsorben yang memiliki kapasitas adsorpsi yang baik. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kapasitas adsorpsi menggunakan adsorben *Metal Organic Frameworks* yang disintesis secara *solvothermal* menggunakan logam FeCl₃.6H₂O dengan ligan organik asam tereftalat. Adapun zat warna yang digunakan sebagai adsorbat yaitu zat warna kationik *malachite green* (MG) dan *violet dye* (VD) yang merupakan limbah berbahaya berasal dari industri tekstil di kota Bengkulu. Penentuan kapasitas adsorpsi dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan keadaan optimum yang meliputi berat adsorben, pH, waktu kontak serta suhu. Keadaan optimum untuk zat warna MG yaitu pada pH 5, pada massa 2,5 mg, waktu kontak 60 menit, pada suhu 30°C dan konsentrasi 50 ppm. Sedangkan zat warna VD yaitu pada massa 10 mg, waktu kontak 40 menit, pH 4, suhu 30°C dan konsentrasi 50 ppm. Kapasitas adsorpsi masing-masing zat warna MG dan VD yaitu 625,00 mg/g dan 384,61 mg/g.

Kata kunci: MOFs, Adsorpsi, Malachite Green, Violet Dye

PENDAHULUAN

Batik besurek adalah salah satu ciri khas Provinsi Bengkulu yang merupakan warisan budaya. Batik besurek diproduksi oleh banyak industri kecil menengah (IKM) yang ada di Kota Bengkulu. Adanya industri batik besurek ini mengakibatkan adanya limbah cair organik dalam jumlah yang tidak sedikit. Limbah cair yang berasal dari industri ini berbau menyengat dan berwarna pekat. Limbah industri batik ini dibuang ke saluran drainase umum dan menyatu dengan air limbah domestik menuju ke saluran utama perkotaan dan berakhir di laut. Apabila air limbah dibuang kelingkungan secara bebas, maka dapat mengakibatkan pencemaran ekosistem perairan.

Produksi industri tekstil seperti batik besurek ini umumnya menggunakan pewarna sintetis. Pembuangan air limbah ke lingkungan dapat menggunakan masalah karena memiliki ketahanan kimia, fotokimia dan biologi yang tinggi (Gustavo et al., 2011). Limbah yang berasal dari zat warna memiliki kelarutan yang tinggi, tidak dapat terdegradasi di alam dan mengandung berbagai komposisi dalam air. Limbah cair zat warna industri dapat menimbulkan berbagai gangguan kesehatan, seperti iritasi kulit, alergi, dan yang paling berbahaya yaitu kanker, serta mutasi pada manusia (Jalil, 2011). Pewarna dapat diklasifikasikan berdasarkan struktur kimia atau metode aplikasi (Giovanela, n.d.). Zat warna yang seringkali dipergunakan menjadi zat warna dasar pada industri tekstil yaitu zat warna trifenilmetana seperti *malachite green* (MG) dan *violet dye* (VD) (Kristianto, 2016).

Zat warna *Malachite green* dan *violet dye* (100 mg L^{-1}) bersifat toksik, setelah dilakukan pengujian pada tikus. *Malachite green* akan tereduksi menjadi *leukomalachite green* yang menetap di dalam tubuh dan bersifat karsinogenik (Ariani et al., 2018). Paparan *violet dye* secara berulang pada waktu yang lama akan mengakibatkan kerusakan pada organ kulit dan mata. Berbagai metode pengolahan limbah zat warna telah banyak dikembangkan antara lain dengan metode biodegradasi (Chen et al., 2010). Degradasi fotokatalitik (Wu et al., 2017); Degradasi katalitik (Fayazi & Azizian, 2016); dan adsorpsi.

Proses akumulasi adsorbat pada permukaan adsorben yang diakibatkan oleh gaya tarik antar molekul atau interaksi kimia, adsorpsi juga merupakan suatu akibat dari medan gaya pada permukaan padatan (adsorben) yang menarik molekul-molekul gas/uap atau cairan (Indah, 2018). Adsorpsi merupakan metode yang memiliki efisiensi tinggi, mudah, dan murah sehingga lazim digunakan sebagai metode dalam pengolahan limbah zat warna beracun (Zhu, 2015). Adsorpsi dengan biosorben banyak digunakan karena murah dan efektif. Dewasa ini pemanfaatan *Metal Organic Frameworks* (MOFs) dalam bidang sains sedang menarik perhatian para peneliti salah satunya yaitu sebagai adsorben.

MOFs memiliki karakteristik yang spesial, diantaranya dapat menghasilkan kapasitas adsorpsi yang baik dikarekanakan memiliki ukuran pori yang teratur, dengan struktur yang bervariasi serta luas permukaan yang besar. Karakter inilah yang membuat MOFs memiliki aplikasi yang banyak dan sangat menarik untuk dikembangkan. Aplikasi MOFs diantaranya penyimpanan gas, pemisahan, katalis, sensor serta adsorpsi (Sun et al., 2014). Luas permukaan yang besar serta memiliki pori yang baik mengakibatkan MOFs memiliki kemampuan atau kapasitas adsorpsi yg lebih baik bila dari pada, silika, zeolit dan karbon aktif (Sun et al., 2014).

Pada riset ini akan dilakukan sintesis *metal organic frameworks* seperti yang telah dilakukan oleh Sudik et al. (2005) yang akan digunakan sebagai adsorben zat warna *violet* (VD) dan *malachite green* (MG). Adapun *metal organic frameworks* yang akan dikembangkan ini tersusun dari logam $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan ligan organik asam tereftalat (H_2BDC) atau dikenal dengan sebutan MOF-235 yang dalam penelitian ini kita sebut dengan MOF Fe-BDC. Penelitian oleh Haque & Verpoort (2011) MOF Fe-BDC telah berhasil menjadi adsorben untuk zat warna anionik (*methyl orange* dan *methylene blue*) dengan kapasitas adsorpsi yang jauh lebih besar dibandingkan dengan karbon aktif.

Kapasitas adsorpsi zat warna oleh adsorben ditentukan oleh beberapa kondisi optimum antara lain yaitu waktu kontak, pH larutan, suhu serta berat adsorben (Sari et al., 2017). Penentuan pH adsorbat dilakukan agar dapat melihat pengaruh aktivitas gugus fungsi adsorben (Syauqiah et al., 2011). Jumlah MOFs yang dibutuhkan untuk mengadsorpsi zat warna secara optimal dapat diketahui dengan menentukan waktu kontak optimum (Puspita & Firdaus, 2017). Selanjutnya pengaruh gugus aktif adsorben dilihat dari pengaruh berat adsorben sedangkan pengaruh daya serap adsorben terhadap adsorbat dapat diketahui dari penentuan suhu optimum (Madina et, al 2017). Penentuan kapasitas adsorpsi mengasumsikan jumlah zat yang diserap dapat terakumulasi pada permukaan zat penyerap yang mengakibatkan proses penyerapan berlangsung pada keadaan optimal sehingga didapatkan adsorben yang memiliki kapasitas adsorpsi yang maksimum (Apriyanti & Candra, 2018). Pada penelitian ini akan dilakukan adsorpsi zat warna *violet* (VD) dan *malachite green* (MG). Hal ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas adsorpsi Fe-BDC terhadap zat warna tersebut. Beydaghdari (2022) menyatakan bahwa Fe-BDC telah berhasil mengadsorpsi limbah yang mengandung zat warna *Lemon Yellow* dan *Congo Red* dengan nilai kapasitas adsorpsi masing-masing yaitu 250mg/g dan 1.250mg/g. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kapasitas adsorpsi MOFs Fe-BDC dalam mengadsorpsi zat warna kationik dalam hal ini yaitu zat warna *violet* (VD) dan *malachite green* (MG). Zat warna ini berasal dari limbah industri tekstil yang ada di Kota Bengkulu.

METODE

Adsorben *Metal Organic Frameworks* yang digunakan dalam penelitian ini disintesis menurut penelitian oleh Haque & Verpoort (2011) dengan cara melarutkan 0,1025g asam tereftalat dengan 30 mL DMF, campuran diaduk selama 10 menit hingga terbentuk larutan jernih. Kemudian 0,1000 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ditambahkan ke dalam larutan dan terus diaduk selama 10 menit. Selanjutnya, 30 mL larutan reaksi dan 30 mL etanol dipindahkan ke dalam 100 mL autoklaf tahan karat berlapis teflon dan dipanaskan pada suhu 80°C selama 24 jam. Setelah pendinginan, kristal orange dikumpulkan dengan sentrifugasi dan dicuci dengan campuran DMF-etanol (1:5, v/v) kemudian disimpan pada suhu 150°C selama 15 jam untuk menghilangkan kelebihan pelarut.

Keadaan optimum adsorpsi MOF Fe-BDC terhadap zat warna kationik *malachite green* (MG) dan *violet dye* (VD) dilakukan menggunakan variasi pH, waktu kontak, berat adsorben dan suhu. Untuk mengetahui pH optimum digunakan variasi pH yaitu 2,3,4,5,6,7 dan 8. Selanjutnya dilakukan proses adsorpsi menggunakan 5 mL zat warna dan 5 mg adsorben selama 60 menit menggunakan shaker dengan kecepatan 350 rpm dan suhu kamar. Pengukuran adsorbansi dilakukan menggunakan *spektrofotometer visible*.

Pengaruh waktu kontak dilakukan dengan membuat variasi waktu kontak yaitu selama 20,30,40,60, dan 90 menit. Selanjutnya dilakukan proses adsorpsi menggunakan 5 mL zat warna pada pH optimum dan 5 mg adsorben menggunakan shaker dengan kecepatan 350 rpm dan suhu kamar. Pengukuran adsorbansi dilakukan menggunakan *spektrofotometer visible*.

Untuk mengetahui berat adsorben optimum dilakukan dengan cara menambahkan adsorben dengan variasi berat 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5 dan 15 mg kedalam 5 mL zat warna pada pH optimum. Proses adsorpsi dilakukan selama waktu kontak optimum menggunakan shaker dengan kecepatan 350 rpm dan suhu kamar. Pengukuran adsorbansi dilakukan menggunakan *spektrofotometer visible*.

Suhu optimum diketahui dengan cara pemanasan dengan variasi suhu yaitu 30°C, 40°C dan 50°C. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan 5 mL zat warna pada pH optimum dengan berat optimum adsorben, selama waktu kontak optimum Lalu ditambahkan Fe-BDC sebanyak berat optimum menggunakan shaker dengan kecepatan 350 rpm. Pengukuran adsorbansi dilakukan menggunakan *spektrofotometer visible*. Hasil berupa data yang

diperoleh dari penentuan suhu ini akan digunakan untuk penentuan termodinamika adsorpsi. Pada analisis termodinamika adsorpsi akan diketahui spontanitas dari suatu reaksi dengan penentuan perubahan energi bebas Gibbs (ΔG°), perubahan entalpi (ΔH°), dan perubahan entropi (ΔS°).

Isoterm adsorpsi dilakukan untuk melihat kapasitas adsorpsi. Penentuan isoterm adsorpsi dilakukan membuat variasi konsentrasi zat warna yaitu 25, 50, 75, 100, 125, 150, 250, 500 dan 1000 ppm pada pH optimum. kemudian ditambahkan MOFs pada berat optimum dan diaduk menggunakan shaker dengan kecepatan 350 rpm pada suhu kamar selama waktu kontak optimum. Pengukuran adsorbansi dilakukan menggunakan *spektrofotometer visible*.

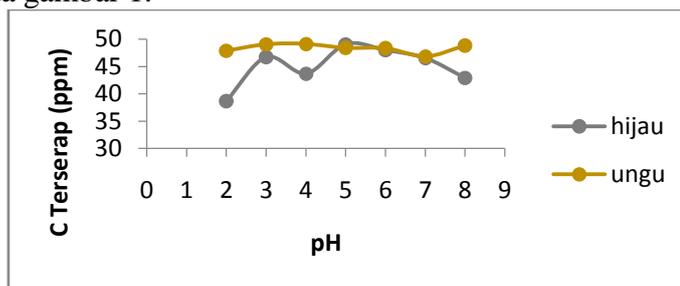
Kinetika adsorpsi menunjukkan tingkat kecepatan adsorpsi Fe-BDC terhadap zat warna. Penentuan model kinetika adsorpsi dilakukan dengan mengambil larutan standar zat warna dengan konsentrasi 50 ppm dan 100 ppm sebanyak 5 mL pada pH optimum. Lalu ditambahkan 5 mg Fe-BDC. Proses adsorpsi dilakukan dengan cara mengaduk campuran menggunakan shaker dengan kecepatan 350 rpm dengan variasi waktu yaitu 5, 10, 20, 30, 40, 60, 90, dan 120 menit pada suhu kamar. Pengukuran adsorbansi dilakukan menggunakan *spektrofotometer visible*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metal Organic Frameworks yang telah dilakukan sintesis kemudian dilakukan uji coba sebagai adsorben pada penentuan keadaan optimum adsorpsi zat warna kationik *violet dye* (VD) dan *malachite green* (MG).

Pengaruh pH

Penentuan pH optimum sangat penting dalam proses adsorpsi karena pH larutan akan berpengaruh besar terhadap aktivitas gugus fungsi pada adsorben pada proses adsorpsi. Kondisi pH dapat memberikan prediksi muatan pada permukaan Fe-BDC sebab pH menentukan tingkat ionisasi larutan. Berdasarkan data hasil perhitungan diperoleh hasil pH optimum zat warna *violet dye* dan *malachite green* menggunakan adsorben MOFs Fe-BDC yaitu pH 4 dan 5 dengan jumlah adsorbat yang teradsorpsi yaitu sebesar 49,11 ppm dan 49,06 ppm seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Kurva Hubungan Konsentrasi Terserap dengan pH

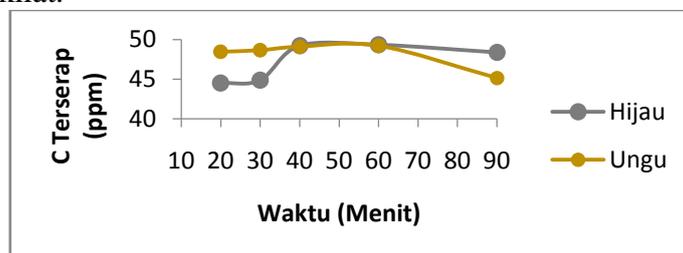
Pada gambar 1 terlihat bahwa pada kondisi asam dan basa konsentrasi adsorbat zat warna *violet dye* serta *malachite green* yang mampu diserap oleh adsorben tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu signifikan. Kedua zat warna menunjukkan tren efisiensi adsorpsi (jumlah % yang diserap) yang sama pada pH optimum yaitu MG (98,11%) dan VD (98,21%). Pada pH 7 kapasitas adsorpsi kedua zat warna tersebut masih tinggi yaitu MG (93,02%) dan VD (93,66%). Karena pada pH netral efisiensi adsorpsi masih tergolong tinggi hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi sebagian besar akan terjadi melalui gaya van der Waals dan tidak akan terpengaruh oleh interaksi elektrostatis (Beltrán-Suito et al., 2019).

Daya serap Fe-BDC akan semakin berkurang dengan bertambahnya pH, hal ini dikarenakan ada interaksi elektrostatis antara permukaan adsorben dengan permukaan zat warna. Saat pH asam, banyaknya ion H^+ pada larutan dapat bertambah hal ini menyebabkan ion OH terprotonasi oleh gugus aktif adsorben yaitu (-COOH) atau gugus karboksil serta fenol menjadi H_2O^+ . Menurut Sakkayawong dkk (2005) larutan zat warna yang tidak terlalu pekat dapat terlarut dan akan menyebabkan fenomena terdisosiasinya gugus sulfonat menjadi ion-ionnya. Gugus sulfonat terdisosiasi (SO_3^-) inilah yang akan berikatan dengan H_2O^+ dari adsorben akan berikatan dengan gugus sulfonat yang terdisosiasi (SO_3^-).

Pada pH basa proses adsorpsi masih bisa terjadi sebab dalam pH basa gugus hidroksil (OH^-) yang berasal adsorben berinteraksi lemah menggunakan gugus amina berasal zat warna. Kamal (2014) menyatakan pada pH basa terjadi kesetimbangan antara zat warna dengan ion hidroksil pada larutan yang menyebabkan zat warna bisa menangkap ion hidroksil yang ditambahkan, tetapi jika pH dinaikkan maka ion OH^- akan semakin banyak pada larutan dan zat warna tidak akan mampu menangkap ion OH^- tadi. Ion OH^- yang bebas pada larutan akan menyebabkan terjadinya kompetisi antara zat warna menggunakan ion OH^- untuk menempati bagian atas adsorben Fe-BDC, hal ini dapat menurunkan kapasitas adsorpsi adsorbat zat warna menggunakan adsorben Fe-BDC.

Pengaruh Waktu Kontak

Waktu yang diperlukan Fe- BDC untuk mengadsorpsi zat warna secara maksimum bisa diketahuil melalui penentuan waktu kontak optimum. Dari hasil riset sesuai pada gambar 2 bisa diketahui kalau proses adsorpsi larutan zat warna *violet dye* serta *malachite green* pada waktu kontak 10, 20, serta 30 menit terjadi peningkatan yang lumayan besar. Hal ini disebabkan pada kondisi awal proses adsorpsi pori- pori adsorben masih dalam kondisi belum terisi sehingga molekul adsorbat dapat menempel serta membuat sesuatu lapisan pada permukaan dengan kilat.



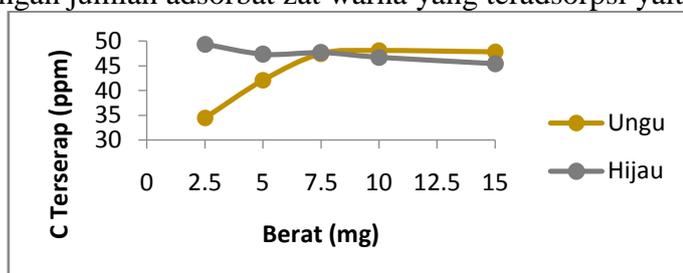
Gambar 2. Kurva Hubungan Konsentrasi Terserap dengan Waktu Kontak

Pada waktu kontak 40 menit Fe-BDC dapat mengadsorpsi adsorbat zat warna *violet dye* secara maksimum yaitu 49,11 ppm dan *malachite green* dengan waktu 60 menit dengan jumlah larutan adsorbat maksimum sebesar 49,34 ppm. Dari percobaan dapat diasumsikan bahwa semakin lama waktu adsorpsi maka permukaan adsorben akan penuh terisi oleh adsorbat. Hal ini mengakibatkan efisiensi adsorpsi berkurang tetapi dalam waktu yang bersamaan kenaikan laju pelepasan kembali molekul adsorbat zat warna sampai terbentuk suatu kesetimbangan (Tabak et al., 2010). Inilah yang menandakan bahwa proses adsorpsi telah mencapai waktu kontak optimal.

Proses adsorpsi larutan zat warna akan mengalami penurunan apabila sudah mencapai waktu kontak optimum. Peristiwa ini dikarenakan saat telah mencapai waktu kontak optimum maka akan terjadi proses desorpsi yang disebabkan oleh sisi aktif pada permukaan adsorben sudah tidak tersedia lagi karena pori-pori adsorben sudah terisi oleh molekul adsorbat zat warna. Hal ini akan mengakibatkan terbentuknya suatu lapisan baru pada permukaan adsorben (Aisyahlika, 2018).

Pengaruh Berat Adsorben

Pengaruh daya serap adsorben terhadap zat warna dilakukan dengan menentukan berat optimum adsorben. Hal ini dikarenakan gugus aktif adsorben dipengaruhi oleh berat adsorben itu sendiri. Berdasarkan data hasil perhitungan diketahui bahwa berat optimum adsorben Fe-BDC untuk mengadsorpsi adsorbat zat warna *violet dye* adalah 10 mg dengan jumlah adsorbat zat warna yang teradsorpsi yaitu 48,05 ppm dan untuk adsorbat zat warna *malachite green* adalah 2,5 mg dengan jumlah adsorbat zat warna yang teradsorpsi yaitu 49,34 ppm.



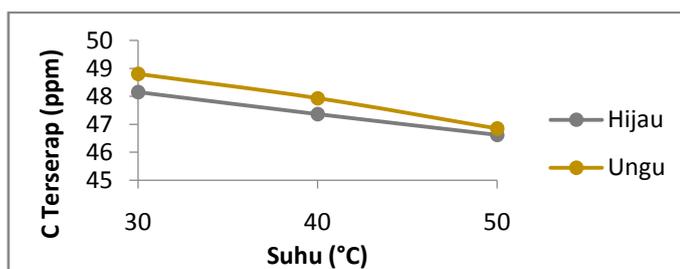
Gambar 3. Kurva Hubungan Konsentrasi Terserap dengan Berat Adsorben

Berdasarkan gambar 3 pada adsorbat zat warna *violet dye* dengan berat optimum adsorben 10 mg menunjukkan semakin banyak adsorben yang digunakan pada proses adsorpsi maka daya serap adsorben akan meningkat. Hal ini dikarenakan semakin berat adsorben maka jumlah partikel serta luas permukaan adsorben juga akan meningkat, sehingga mengakibatkan bertambahnya permukaan adsorben yang mengikat adsorbat zat warna. Saat titik kesetimbangan dicapai, permukaan adsorben telah tertutupi secara keseluruhan oleh zat warna yang terserap, adsorben juga mencapai titik jenuh sebagai akibatnya adsorben tidak mampu lagi menyerap zat warna (Lasmana, 2016). Hal ini akan mengakibatkan adsorben larut dengan air dan larutan zat warna akan berwarna sama dengan warna adsorben.

Berat adsorben optimum yang didapatkan pada proses adsorpsi zat warna *malachite green* cukup berbeda. Adsorbat zat warna *malachite green* memiliki berat adsorben optimum 2,5 mg yang menunjukkan daya serap adsorben akan menurun jika semakin banyak adsorben yang digunakan pada proses adsorpsi. Menurunnya daya serap terjadi karena terbentuknya lapisan-lapisan di atas adsorbat yang telah terikat pada permukaan adsorben, proses ini terjadi dengan sangat cepat. Hal ini dikenal dengan adsorpsi *multilayer* sehingga menyebabkan permukaan adsorben telah mencapai titik jenuh atau hampir jenuh terhadap adsorbat (Nurafriyanti et al., 2017).

Pengaruh Suhu

Kemampuan Fe-BDC untuk mengadsorpsi zat warna juga dipengaruhi oleh suhu. Peningkatan suhu saat tekanan tetap dapat menyebabkan pengurangan jumlah senyawa terserap. Hal tersebut dibuktikan dari data hasil perhitungan bahwa suhu optimum Fe-BDC dalam proses adsorpsi zat warna *violet dye* dan *malachite green* yaitu 30°C dengan jumlah molekul zat warna yang teradsorpsi yaitu 48,80 ppm untuk larutan zat warna *violet dye* dan 48,15 ppm untuk larutan zat warna *malachite green*.



Gambar 4. Hubungan Konsentrasi Terserap dengan Suhu

Gambar 4 mengasumsikan bahwa konsentrasi terserap tidak sebanding dengan suhu. Artinya saat terjadi peningkatan suhu pada proses adsorpsi cairan zat warna maka kemampuan adsorpsi akan menurun. Hal ini dapat mengurangi efisiensi adsorpsi yang disebabkan oleh kenaikan suhu yang akan meningkatkan energi kinetik rata-ratanya sehingga akan mempercepat pergerakan partikel-partikel yang terdapat pada larutan. Partikel yang bergerak sangat cepat ini akan mengakibatkan adsorbat yang telah diadsorpsi terlepas dari pori-pori adsorben. Peningkatan suhu menjadi 40°C dan 50°C akan membuat larutan zat warna terserap berkurang karena sudah melewati suhu optimum. Kenaikan suhu dapat mengakibatkan reaksi berjalan dengan cepat sehingga energi kinetik partikel juga akan meningkat yang mengakibatkan tumbukan efektif yang terjadi semakin banyak juga, sehingga perubahan dapat terjadi dengan cepat. Oleh karena itu suhu optimum akan mempercepat proses adsorpsi zat warna (Agustina, 2012).

Isoterm Adsorpsi

Adsorpsi ialah terjadinya akumulasi partikel adsorbat di permukaan adsorben. Isoterm adsorpsi ialah ikatan kesetimbangan yang terjadi antara konsentrasi adsorbat saat fase padat dengan konsentrasi saat fase cair untuk memperoleh data isoterm adsorpsi dilakukan dengan membuat variasi konsentrasi 25,50,75,100,125,150,250,500 dan 1000 ppm dan diatur sesuai kondisi optimum. Isoterm adsorpsi dapat menunjukkan mekanisme adsorpsi Fe-BDC terhadap larutan zat warna. Jenis isoterm dapat digunakan untuk menjelaskan interaksi antara adsorben dan adsorbat.

Jenis isoterm yang digunakan dalam riset ini ialah isoterm Langmuir serta isoterm Freundlich. Persamaan isoterm Langmuir diperoleh dari grafik antara C_e/q_e vs C_e sedangkan grafik $\log q_e$ vs $\log C_e$ diperoleh berdasarkan persamaan isoterm Freundlich. Dari persamaan garis linear yang didapat pada grafik maka dapat diperoleh parameter Langmuir dan Freundlich untuk setiap zat dapat dilihat pada tabel dibawah ini. Hasil nilai parameter Freundlich (K_F dan n) bisa diperoleh dari persamaan linear isoterm Freundlich sedangkan nilai parameter Langmuir (K_L dan Q_o) dapat ditentukan dari persamaan linear isoterm Langmuir.

Tabel 1. Isoterm Adsorpsi Violet Dye dan Malachite green oleh Adsorben Fe-MOFs

Model Isoterm	Parameter	Zat Warna	
		Violet Dye	Malachite green
Freundlich	K_F (L/mg)	49,7737	151,6701
	N	1,6815	2,6021
	R^2	0,8474	0,6259
Langmuir	K_L (L/mg)	0,1368	0,2857
	Q_o (mg/g)	384,6154	625,00
	R^2	0,9921	0,9943

Berdasarkan nilai R^2 pada tabel 1 jenis isoterm adsorpsi kedua adsorbat zat warna tersebut yaitu isoterm Langmuir. Berdasarkan persamaan isoterm Langmuir dapat disimpulkan bahwa adsorpsi terjadi secara kemisorpsi atau secara kimia. Kemisorpsi terjadi jika terdapat ikatan kimia antara permukaan adsorben dengan molekul adsorbat (Indah,

2019). Isoterm Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi monolayer *Malachite Green* dan *Violet* pada adsorben Fe-BDC yang homogen. Hasil ini sejalan dengan penelitian oleh Sartape et al. (2014) menggunakan adsorben arang aktif kayu apel untuk mengadsorpsi zat warna *malachite green*.

Berdasarkan tabel 1 nilai Q_0 MG dari persamaan Langmuir lebih besar dari nilai Q_0 VD. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan adsorben Fe-BDC dalam mengadsorpsi MG lebih baik dari pada kemampuan adsorben Fe-BDC dalam mengadsorpsi VD. berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai kapasitas adsorpsi pada lapisan tunggal cairan zat warna *Violet Dye* adalah 384,6 mg/g dan larutan zat warna *Malachite green* adalah 625,0 mg/g.

Tabel 2. Kapasitas Adsorpsi *Malachite green* dan *Violet Dye* Berbagai Jenis Adsorben

Adsorben	Adsorbat	q (mg/g)	Referensi
<i>Caulerpa Racemosa Var.</i>	<i>Malachite green</i>	25,67	(Bekc, 2009)
<i>Nanochitosan-STP</i>	<i>Malachite green</i>	317,72	(Salamat et al., 2019)
<i>Cylindracea (Marine Alga) Durian Seed</i>	<i>Malachite green</i>	476,19	(Ahmad & Alrozi, 2011)
<i>Polygonum Orientale Linn</i>	<i>Malachite green</i>	556,00	(Ahmad & Alrozi, 2011)
Fe-BDC	<i>Malachite green</i>	625,00	Penelitian ini
$SnFe_2O_4$	<i>Violet Dye</i>	158,73	(Rai et al., 2015)
<i>Nanoscale Zero-Valent Cellulose</i>	<i>Violet Dye</i>	200,00	(Jerold et al. 2017)
<i>Magnetic Chitosan Nano-composites (MCNCs)</i>	<i>Violet Dye</i>	304,9	(Zhou et al., 2014)
Fe-BDC	<i>Violet Dye</i>	333,33	(Massoudinejad et al., 2019)
Fe-BDC	<i>Violet Dye</i>	384,61	Penelitian ini

Kinetika Adsorpsi

Berdasarkan teori isoterm Freundlich dapat diketahui bahwa proses adsorpsi terjadi di permukaan yang heterogen karena interaksi pada molekul adsorbat MG dan VD tidak terbatas pada pembentukan lapisan tunggal. Nilai konstanta Freundlich (K_F) sebanding dengan nilai kapasitas adsorpsi. Semakin tinggi harga K_F maka semakin tinggi afinitas adsorben MG dan VD. Berdasarkan Tabel 4 nilai K_F MG lebih besar dari K_F VD, sehingga interaksi antara adsorbat MG lebih besar dari pada interaksi adsorbat VD (Ariani, et al. 2019).

Kinetika adsorpsi menyatakan laju kecepatan adsorben untuk mengadsorpsi suatu zat. Kinetika adsorpsi dapat diperoleh melalui perhitungan perubahan konsentrasi zat yang terserap. Pada penentuan kinetika adsorpsi ada dua jenis yang digunakan yaitu pseudo orde 1 dan pseudo orde 2.

Tabel 3 Kinetika Adsorpsi *Malachite Green* dan *Violet Dye* oleh Fe-BDC

Model Kinetika	Parameter	Zat Warna			
		<i>Malachite green</i>		<i>Violet Dye</i>	
		50 ppm	100 ppm	50 ppm	100 ppm
Pseudo Orde 1	k_1 (1/menit)	0,0005	0,0002	0,0005	0,0005
	q_e (mg/g)	4,0626	8,1527	6,1193	12,2800
	R^2	0,9758	0,9530	0,9614	0,9593
Pseudo Orde 2	k_2 (1/menit)	0,0225	0,0351	0,0126	0,0175
	q_e (mg/g)	0,3264	0,4430	0,5217	0,7237
	R^2	0,9939	0,9720	0,9913	0,9904

Dari nilai R^2 yang diperoleh pada pseudo orde 1 dan 2 dapat disimpulkan bahwa kinetika adsorpsi kedua larutan zat warna mengikuti model pseudo orde dua (2) . Kinetika ini mengansumsikan bahwa reaksi yang terjadi selama proses adsorpsi bergantung pada konsentrasi kedua reaktan yang terlibat sehingga dapat diartikan bahwa konsentrasi Fe-BDC

dan konsentrasi larutan zat warna *malachite green* dan *violet dye* yang digunakan mempengaruhi proses adsorpsi yang berlangsung.

Berdasarkan Tabel 3, jika konsentrasi cairan zat warna meningkat kapasitas adsorpsi akan meningkat pula, hal ini dikarenakan zat warna yang terserap semakin bertambah sedangkan nilai k yang merupakan konstanta laju menunjukkan kecepatan adsorpsi. Semakin tinggi nilai k maka reaksi akan berlangsung sangat cepat (Wahidatun et al., 2015). Larutan zat warna *malachite green* pada konsentrasi (50 dan 100) ppm memiliki nilai k_2 masing-masing yaitu 0,0175/menit dan 0,0351/menit sedangkan larutan zat warna *violet dye* pada konsentrasi (50 dan 100) ppm memiliki nilai k_2 berturut-turut 0,0126/menit dan 0,0175/menit sehingga dapat dinyatakan bahwa jika konsentrasi zat warna meningkat maka laju adsorpsi akan semakin cepat.

Termodinamika Adsorpsi

Termodinamika adsorpsi memberikan data tentang keadaan akhir suatu proses adsorpsi. Pada saat adsorpsi terjadi terdapat dua jenis termodinamika yaitu termodinamika yang dapat diukur secara eksklusif seperti temperatur dan termodinamika yang tidak bisa diukur secara langsung seperti energi aktivasi, perubahan energi bebas gibbs (ΔG°), perubahan entalpi (ΔH°), dan perubahan entropi (ΔS°).

Parameter termodinamika sangat dibutuhkan dalam memprediksi proses adsorpsi larutan zat warna oleh Fe-BDC. Parameter termodinamika menggambarkan hubungan antara konstanta kesetimbangan adsorpsi dengan suhu yang dapat menentukan ΔG° , ΔH° dan ΔS° . Namun sebelum menghitung parameter-parameter termodinamika adsorpsi terlebih dahulu dihitung konstanta distribusi (Kd) dengan cara perbandingan antara kapasitas adsorpsi pada saat setimbang (qe) dengan konsentrasi saat setimbang (Ce).

Berdasarkan data Tabel 4, perubahan energi bebas gibbs (ΔG°) untuk kedua larutan zat warna bernilai negatif sehingga dapat dikatakan reaksi berjalan secara spontan. Nilai perubahan entalpi (ΔH°), dan perubahan entropi (ΔS°) berturut-turut adalah -18,1661 kJ/mol dan 0,3030 kJ/mol untuk larutan zat warna *Malachite green*. Nilai entalpi yang negatif ini menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung pada reaksi eksoterm. Sedangkan untuk zat warna *Violet Dye* nilai perubahan entalpi (ΔH°), dan perubahan entropi (ΔS°) berturut-turut adalah bernilai 0,0301 kJ/mol dan 0,0765 kJ/mol. Nilai entropi yang sangat rendah juga menunjukkan bahwa gangguan terhadap sistem kecil.

Tabel 4 Termodinamika Adsorpsi Pada Adsorpsi Malachite green dan Violet Dye oleh Fe-BDC

Dye	Temperatur (K)	Parameter		
		ΔG° (kJ/mol)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (kJ/mol.K)
MG	303	-9,9502	-18,1661	0,3030
	313	-9,3175		
	323	-8,9098		
VD	303	-7,5864	0,0301	0,0765
	313	-6,3846		
	323	-5,3860		

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa kapasitas adsorpsi maksimum Fe-BDC terhadap *malachite green* (MG) adalah 625 mg/g, pada berat 2,5 mg, waktu kontak 60 menit, pH 5, pada suhu 30°C dan konsentrasi 50 ppm. Sedangkan kapasitas adsorpsi maksimum Fe-BDC terhadap zat warna *violet dye* (VD) adalah 385 mg/g, pada berat 10 mg, waktu kontak 40 menit, pH 4, suhu 30°C dan konsentrasi 50 ppm. Berdasarkan data tersebut, maka adsorben Fe-BDC dapat digunakan sebagai alternative untuk mengadsorpsi limbah yang mengandung zat warna sintesis kationik seperti *malachite green*

dan *violet dye*. Hasil penelitian ini juga kami kembangkan menjadi e-modul adsorpsi zat warna yang akan bermanfaat bagi para peserta didik dalam meningkatkan literasi sains.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada DRTPM Kemendikbudristek yang telah mendanai penelitian tesis magister (PTM) ini melalui grant nomor: 105/E5/PG.02.00.PT/2022.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M. A., & Alrozi, R. (2011). Removal of malachite green from aqueous solution using rambutan peel-based activated carbon : Equilibrium , kinetic and thermodynamic studies. *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 510–516. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.04.018>
- Ahmadi, A., Suyanti, I., Tikrahsari, S. A., & Aini, M. (2018). Pengaruh Waktu Adsorpsi Minyak Jelantah Sebagai Bahan Pembuatan Biodiesel Dengan Tanah Liat Terhadap Kualitas Biodiesel. *Hydrogen: Jurnal Kependidikan Kimia*, 6(2), 124-132.
- Aisyahlita, S. Z., Firdaus, M. L., & Elvia, R. (2018). Kapasitas adsorpsi arang aktif cangkang Bintaro (Cerbera odollam) terhadap zat warna sintesis Reactive RED-120 dan Reactive BLUE-198. *Alotrop*, 2(2).
- Apriyanti, H., & Candra, I. N. (2018). *Karakterisasi Isoterm Adsorpsi Dari Ion Logam Besi (Fe) Pada Tanah Di Kota Bengkulu*. 2(1), 14–19.
- Ariani, D., Aprilita, N. H., & Kuncaka, A. Adsorption of Malachite Green and Methyl Violet 2B with Phthalate-Functionalized Sugarcane Bagasse. *BIMIPA*, 25(1), 66-79.
- Bekc, Z. (2009). *Removal of malachite green by using an invasive marine alga Caulerpa racemosa var cylindracea*. 161, 1454–1460. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.125>
- Beltrán-Suito, R., Pinedo-Flores, A., Bravo-Hualpa, F., Ramos-Muñoz, J., & Sun-Kou, M. del R. (2019). Adsorption of N,N-dimethylamine from aqueous solutions by a metal organic framework, MOF–235. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(6), 901–908. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1489275>
- Chen, C., Chang, C., & Liu, S. (2010). Partial degradation mechanisms of malachite green and methyl violet B by *Shewanella decolorationis* NTOU1 under anaerobic conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.030>
- Culp, S. J., Mellick, P. W., Trotter, R. W., Greenlees, K. J., Kodell, R. L., & Beland, F. A. (2006). *Carcinogenicity of malachite green chloride and leucomalachite green in B6C3F1 mice and F344 rats*. 44, 1204–1212. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.01.016>
- Fayazi, M., & Azizian, S. (2016). Catalytic degradation of methyl violet without light irradiation using nanostructured CuS. *Journal of Molecular Liquids*. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.10.058>
- Giovanella, M. (n.d.). *Removal of methyl violet 2B dye from aqueous solution using a magnetic composite as an adsorbent Related papers*.
- Gustavo, L., Reis, T., Robaina, N. F., Pacheco, W. F., & Cassella, R. J. (2011). *Separation of Malachite Green and Methyl Green cationic dyes from aqueous medium by adsorption on Amberlite XAD-2 and XAD-4 resins using sodium dodecylsulfate as carrier*. 171, 532–540. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.04.024>
- Hameed, B. H. (2008). *Equilibrium and kinetic studies of methyl violet sorption by agricultural waste*. 154, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.010>
- Haque, E., & Verpoort, F. (1803). *Adsorptive removal of methyl orange and methylene blue from aqueous solution with a metal-organic framework mate ...*3(1). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.035>

- Indah, D. R., & Safnowandi, S. (2018). Pemanfaatan Karbon Baggase Teraktivasi Untuk Menurunkan Kadar Logam Tembaga Pada Limbah Kerajinan Perak Di Lombok Tengah. *Hydrogen: Jurnal Kependidikan Kimia*, 6(1), 65-74.
- Indah, D. R., & Safnowandi, S. (2020). Karakterisasi Karbon Baggase Teraktivasi dan Aplikasinya untuk Adsorpsi Logam Tembaga. *Hydrogen: Jurnal Kependidikan Kimia*, 7(2), 46-54.
- Jalil, A. A., Triwahyono, S., Yaakob, M. R., Azmi, Z. Z. A., Sapawe, N., Kamarudin, N. H. N.,
- Jerold, M., Vasantharaj, K., Joseph, D., & Sivasubramanian, V. (2017). Fabrication of hybrid biosorbent nanoscale zero-valent iron-Sargassum swartzii biocomposite for the removal of crystal violet from aqueous solution. *International Journal of Phytoremediation*, 19(3), 214–224.
- Jurnal, J., Lingkungan, T., Prihatini, N. S., & Syauqiah, I. (2017). *Pengaruh Variasi Ph Dan Berat Adsorben Dalam Pengurangan Konsentrasi Cr Total Pada Limbah Artifisial*. 3(1), 56–65.
- Kristianto, Dwi, 2016, Pembuatan Manik Kompleks Polielektrolit Kitosan Pektin sebagai Adsorben Zat Warna Malahite Green dan Metil Violet 2B, Tesis, Jurusan Kimia, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Massoudinejad, M., Rasoulzadeh, H., & Ghaderpoori, M. (2019). Magnetic chitosan nanocomposite : Fabrication , properties , and optimization for adsorptive removal of crystal violet from aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*, 206(November 2018), 844–853. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.048>
- Nurafriyanti, N., Prihatini, N. S., & Syauqiah, I. (2017). Pengaruh variasi pH dan berat adsorben dalam pengurangan konsentrasi Cr total pada limbah artifisial menggunakan adsorben ampas daun teh. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 3(1).
- Puspita, M., & Firdaus, M. L. (2017). *Pemanfaatan Arang Aktif Sabut Kelapa Sawit Sebagai Adsorben Zat Warna Sintetis Reactive Red-120 Dan Direct Green -26*. 1(1), 75–79.
- Rai, P., Gautam, R. K., Banerjee, S., Rawat, V., & Chattoapadhyaya, M. C. (2015). Journal of Environmental Chemical Engineering Synthesis and characterization of a novel SnFe 2 O 4 @ activated carbon magnetic nanocomposite and its effectiveness in the removal of crystal violet from aqueous solution. *Biochemical Pharmacology*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.08.017>
- Salamat, S., Hadavifar, M., & Rezaei, H. (2019). ur na. *Biochemical Pharmacology*, 103328. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103328>
- Sari, R. A., Firdaus, M. L., & Elvia, R. (2017). Penentuan Kesetimbangan, Termodinamika dan Kinetika Adsorpsi Arang Aktif Tempurung Kelapa Sawit pada Zat Warna Reactive Red dan Direct Blue. *Alotrop*, 1(1).
- Sartape, A. S., Mandhare, A. M., Jadhav, V. V, Raut, P. D., Anuse, M. A., & Kolekar, S. S. (2014). Removal of malachite green from aqueous solution with adsorption technique using Limonia acidissima (wood apple) shell as low cost adsorbent. *Arabian Journal Of Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.12.019>
- Sudik, A. C., Côté, A. P., & Yaghi, O. M. (2005). Metal-organic frameworks based on trigonal prismatic building blocks and the new “acs” topology. *Inorganic Chemistry*, 44(9), 2998–3000. <https://doi.org/10.1021/ic050064g>
- Sun, B., Kayal, S., & Chakraborty, A. (2014). Study of HKUST (Copper benzene-1 , 3 , 5-tricarboxylate , Cu-BTC MOF) -1 metal organic frameworks for CH 4 adsorption : An experimental Investigation with GCMC (grand canonical Monte-carlo) simulation. *Energy*, 76, 419–427. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.033>
- Syauqiah, I., Amalia, M., & Kartini, H. A. (2011). *Info Teknik, Volume 12 No. 1, Juli 2011*. 12(1), 11–20.

- Tabak, A., Afsin, B., & Emirik, M. (2010). *Adsorption of Reactive Red 120 from aqueous solutions by cetylpyridinium-bentonite* Ahmet Tabak , a * Nimet Baltas , a Beytullah Afsin , b Mustafa Emirik , a. May 2019. <https://doi.org/10.1002/jctb.2416>
- Wahidatun, K. W., Krisdiyanto, D., & Nugraha, I. (2015). *Kesetimbangan , Kinetika , dan Termodinamika ... (Khoirul Wahyu Wahidatu , dkk .)*. 9(1), 1–11.
- Wu, W., Luo, Z., Wang, J., & Liu, J. (2017). PT NU Abstract. *Inorganic Chemistry Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2017.03.025>
- Zhou, Y., Zhang, M., Wang, X., Huang, Q., Min, Y., Ma, T., & Niu, J. (2014). *Removal of Crystal Violet by a Novel Cellulose-Based Adsorbent: Comparison with Native Cellulose*.