



## Penurunan Kadar *Chemical Oxygen Demand* dan Kekeruhan Pada Limbah *Laundry* Menggunakan Karbon Aktif Daun Eceng Gondok

Cucun Alep Riyanto<sup>a,\*</sup>, Nur Ayu Hidayati<sup>a</sup>, Yohanes Martono<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Kristen Satya Wacana, Jalan Diponegoro 52-60, Salatiga, Jawa Tengah, Indonesia

\*corresponding author: [cucun.riyanto@uksw.edu](mailto:cucun.riyanto@uksw.edu)

DOI: [10.20885/ijca.vol6.iss2.art8](https://doi.org/10.20885/ijca.vol6.iss2.art8)

### ARTIKEL INFO

Diterima : 09 Mei 2023  
Direvisi : 12 Agustus 2023  
Diterbitkan : 01 September 2023  
Kata kunci : *Chemical Oxygen Demand*, Daun eceng gondok, Karbon aktif, Kekeruhan, Limbah laundry

### ABSTRAK

Senyawa lignoselulosa yang terkandung dalam daun eceng gondok (DEG) (*Eichhornia crassipes*) dapat digunakan untuk bahan baku pembuatan karbon aktif dengan tarif yang murah dan terbarukan. Karbon aktif DEG dapat digunakan sebagai adsorben untuk menurunkan kadar COD dan kekeruhan pada limbah *laundry*. Tujuan penelitian ini yaitu menentukan pemodelan adsorpsi terbaik karbon aktif DEG terhadap kadar COD dan kekeruhan pada limbah *laundry* dalam kajian kinetika dan isoterm serta menentukan efektivitas penurunan kadar COD dan kekeruhannya. Proses pembuatan karbon aktif DEG dilakukan dengan proses karbonisasi pada suhu 400 °C selama 1 jam, selanjutnya diaktivasi menggunakan H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 30% pada rasio impregnasi 1:4 (b/b) selama 24 jam dan aktivasi fisika pada suhu 600 °C selama 1 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi karbon aktif DEG pada kadar COD dan kekeruhan limbah *laundry* mengikuti pemodelan isoterm Freundlich dan isoterm Elovich dengan nilai R<sup>2</sup> berurutan yaitu 0,9535 dan 0,9905. Pemodelan kinetika adsorpsi kadar COD dan kekeruhan pada limbah *laundry* mengikuti pemodelan kinetika Pseudo Orde Dua. Efektivitas penurunan karbon aktif DEG dalam adsorpsi kadar COD dan kekeruhan limbah *laundry* berturut-turut sebesar 80,76% dan 64,71%.

### ARTICLE INFO

Received : 09 May 2023  
Revised : 12 August 2023  
Published : 01 September 2023  
Keywords : *Chemical Oxygen Demand*, *Water hyacinth leaves*, *Activated carbon*, *Turbidity*, *Laundry waste*

### ABSTRACT

*Lignocellulose compounds contained in water hyacinth leaves (WHL) (Eichhornia crassipes) can be used as raw material for the manufacture of activated carbon at a low and renewable rate. The ACWHL can be used as adsorbent for reducing a COD value and turbidity levels on laundry waste. The purpose of this study is to determine the best adsorption modelling of ACWHL on COD values and turbidity levels in laundry waste in kinetics and isotherm studies and determine the effectiveness of reducing a COD value and turbidity levels. The process of making ACWHL is carried out by carbonization at 400 °C for 1 hour, then activated using 30% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> at an impregnation ratio of 1:4 (w/w) for 24 hours and physical activation at 600 °C for 1 hour. The results showed that the adsorption of ACWHL on COD value and turbidity levels of laundry waste followed Freundlich isotherm and Elovich isotherm modelling with R<sup>2</sup> values of 0.9535 and 0.9905,*



---

*respectively. The modelling for adsorption kinetics of COD values and turbidity levels in laundry waste follows the Pseudo Second Order kinetics modelling. The effectiveness of ACWHL reduction in adsorption of COD value and turbidity levels of laundry waste was 80.76% and 64.71%.*

---

## 1. PENDAHULUAN

Semakin banyak usaha *laundry* mengakibatkan pencemaran air semakin meningkat akibat limbah yang dihasilkan. Seorang partisipan pada penelitian Apriyani (2017) di daerah Keputih Sukolilo, Surabaya, beliau dapat mencuci 75-80 kg dan menghasilkan limbah air *laundry* sebesar 35-40 liter/ hari [1]. Air limbah detergen (*laundry*) mengandung bahan kimia antara lain fosfat, surfaktan, amonia, dan nitrogen, oksigen terlarut serta kadar padatan terlarut. Selain itu, limbah *laundry* dapat menimbulkan kekeruhan pada air yang disebabkan adanya kombinasi polifosfat dengan surfaktan dalam detergen yang menyebabkan kandungan fosfat dalam air tinggi sehingga terjadi eutrofikasi yang menimbulkan warna dalam air, bau tidak sedap, menurunkan kualitas air [2], serta kadar BOD dan COD yang sangat tinggi [3]. COD (*Chemical Oxygen Demand*) merupakan jumlah oksigen yang diperlukan agar senyawa organik yang ada di dalam air limbah dapat terurai melalui reaksi kimia [4]. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Daerah Provinsi Jawa Tengah Nomor 5 Tahun 2012, menetapkan bahwa baku mutu kadar maksimum COD 250 mg/L dan kekeruhan 6-9 NTU. Apabila kadar COD dan kekeruhan dalam limbah *laundry* melebihi baku mutu kadar maksimum maka perlu dilakukan perlakuan awal sebelum limbah *laundry* tersebut dibuang ke lingkungan.

Remediasi merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengatasi pencemaran air akibat kontaminasi yang berasal dari alam maupun aktivitas manusia [5]. Beberapa metode remediasi yaitu metode pengendapan, pertukaran ion, adsorpsi, dan filtrasi membran [6]. Adsorpsi merupakan salah satu cara yang efektif dan merupakan pendekatan yang mudah karena pengoperasiannya yang sederhana dan memiliki efektivitas energi [7]. Ada beberapa proses adsorpsi yang dapat dilakukan yaitu adsorpsi menggunakan silika, karbon aktif, dan zeolit [8]. Adsorpsi dengan karbon aktif merupakan salah satu metode yang paling sering digunakan dalam menghilangkan polutan dari media yang terkontaminasi. Hal ini dikarenakan efisiensinya terutama pada konsentrasi rendah dan metodenya yang sederhana [6]. Karbon aktif banyak digunakan sebagai adsorben karena karbon aktif memiliki luas permukaan (300-2000 m<sup>2</sup>/g) dan memiliki struktur pori yang besar sehingga memiliki efisiensi dalam penjerapan yang tinggi berkisar 25-100% [9].

Penggunaan karbon aktif sebagai adsorben banyak diaplikasikan sebagai metode yang efektif dan efisien guna menghilangkan berbagai polutan organik maupun anorganik dalam proses pemurnian air ataupun gas [10]. Salah satu bahan baku karbon aktif yang dapat digunakan sebagai alternatif pengganti karbon aktif komersial yaitu tanaman yang memiliki senyawa lignoselulosa yang tinggi, salah satunya yaitu tanaman eceng gondok [11]. Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) memiliki 3 kandungan utama yang terdiri dari selulosa 50%, hemiselulosa 30%, dan lignin 10% [12], [13]. Selulosa pada tanaman eceng gondok dapat dimanfaatkan sebagai salah satu bahan baku pembuatan karbon aktif dengan biaya yang murah dan terbarukan [14].

Pada penelitian [15] dilakukan kajian untuk mengetahui kemampuan penggunaan arang dari akar eceng gondok untuk menurunkan kadar kekeruhan, COD, dan BOD pada air sumur gali. Hasil penelitian tersebut mendapatkan hasil bahwa arang dari akar eceng gondok mampu menurunkan kadar kekeruhan 78,71%; COD 58,14%; dan BOD 64,71%. Penelitian Setyobudiarso (2014) yang bertujuan untuk menentukan pengaruh bahan penyaring pasir silika, zeolit, dan arang aktif terhadap hasil olahan air limbah dan mengetahui pengaruh tekanan dan waktu pemakaian reaktor penyaring [16]. Hasil yang didapat pada metode filtrasi ini dapat menurunkan kekeruhan hingga batas maksimum air bersih, COD 908 mg/L, TSS 215 mg/L. Pada penelitian Putri (2022) yang memanfaatkan karbon aktif kulit pisang kepok sebagai adsorben untuk menurunkan kadar COD pada air limbah *laundry* sehingga didapatkan hasil bahwa karbon aktif kulit pisang kepok dapat menurunkan kapasitas COD yang teradsorpsi sebesar 78,78% pada waktu 60 menit dengan massa karbon 0,5 gram [17]. Berdasarkan penelitian sejenis yang dilakukan, belum ada yang melakukan kajian terkait potensi daun eceng gondok (DEG) sebagai karbon aktif untuk menurunkan kadar COD dan kekeruhan pada limbah *laundry*. Sehingga, pada penelitian ini akan dilakukan pengkajian

kinetika dan isoterm adsorpsi COD dan kekeruhan menggunakan karbon aktif DEG serta pengaplikasian pada air limbah *laundry* di Salatiga supaya limbah tersebut dapat dimanfaatkan kembali maupun lebih layak dibuang ke ekosistem perairan.

## 2. METODE

### 2.1. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah neraca dengan ketelitian 0,01 g (Ohaus TAJ601), neraca analitis dengan ketelitian 0,1 mg (Ohaus PA214), pH meter (Hanna), *furnace* (Vulcan A-550), *grinder* (Philips), ayakan (CBN, 60 mesh), *turbidity meter* SGZ-200BS, *oven*, *shaker*, labu ukur, refluks, buret. Instrumen karakterisasi sampel yang digunakan adalah Spektrofotometer Inframerah (FT-IR, Shimadzu Prestige 21, Universitas Gadjah Mada) dan Brunauer Emmett Teller (BET, Quantachrome NOVA Instruments, Universitas Negeri Semarang).

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah daun eceng gondok (DEG) yang diperoleh dari Rawa Pening, Kabupaten Semarang. Limbah *laundry* diperoleh dari salah satu usaha *laundry* di Salatiga. Bahan kimia yang digunakan meliputi akuades yang diperoleh dari Laboratorium Kimia Universitas Kristen Satya Wacana. Bahan kimia lainnya seperti  $H_3PO_4$ , NaOH, indikator ferroin,  $K_2Cr_2O_7$ ,  $H_2SO_4$  pekat,  $Ag_2SO_4$ ,  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  yang masing-masing berderajat PA (*Pro-Analysis*) diperoleh dari E-Merck Germany.

### 2.2. Prosedur Kerja

#### 2.2.1. Preparasi Sampel

Daun eceng gondok (DEG) yang diperoleh dibersihkan dan dicuci menggunakan akuades, kemudian dikeringkan dibawah sinar matahari  $\pm 2$  hari. Selanjutnya DEG dipotong kecil-kecil dan dikeringkan di dalam oven selama 24 jam ( $T=110$  °C). Setelah dikeringkan DEG dihaluskan menggunakan *grinder* dan diayak menggunakan ayakan (60 *mesh*) [18].

#### 2.2.2. Karbonisasi dan Aktivasi Sampel

Proses karbonisasi dilakukan dengan cara memasukkan sampel ke dalam *furnace* pada suhu 400 °C selama 1 jam. Selanjutnya sampel yang sudah menjadi karbon diimpregnasi menggunakan larutan  $H_3PO_4$  30% dengan rasio 1:4 (b/b) selama 24 jam. Sampel disaring dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110 °C selama 24 jam, lalu diaktivasi dengan *furnace* selama 1 jam pada suhu 600 °C. Karbon aktif dinetralkan menggunakan NaOH 1M dan dibilas menggunakan akuades hingga pH 7. Hasil aktivasi dioven selama 24 jam ( $T=110$  °C) [18].

#### 2.2.3. Pengujian Kadar COD pada Limbah *Laundry*

Sampel limbah *laundry* sejumlah 5 mL ditambahkan 4 mL larutan baku kalium dikromat ( $K_2Cr_2O_7$ ) 0,1 N dan 7 mL larutan pereaksi asam sulfat ( $H_2SO_4$  dan  $Ag_2SO_4$ ) dimasukkan ke dalam tabung kolf lalu direfluks selama 2 jam. Sampel didinginkan hingga suhu ruang dan ditambahkan 1-2 tetes indikator ferroin lalu dititrasi menggunakan larutan FAS 0,05M kemudian dicatat volume pentitrasi yang dibutuhkan [19].

#### 2.2.4. Pengujian Kadar Kekeruhan pada Limbah *Laundry*

Dilakukan kalibrasi alat turbidimeter terlebih dahulu supaya tingkat ketelitiannya tinggi dalam pengukuran turbiditas pada sampel uji. Sampel sejumlah 20 mL diletakkan dalam kuvet lalu dimasukkan dalam alat turbidimeter dan diukur kekeruhannya [20].

#### 2.2.5. Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif yang dimodifikasi Pada Limbah

Tujuan dari pemodelan kinetika adalah ukuran serapan adsorpsi terhadap waktu pada tekanan atau konsentrasi konstan dan digunakan untuk mengukur difusi adsorbat dalam pori-pori [21]. Kajian kinetika adsorpsi dilakukan dengan menambahkan 10 mg karbon aktif ke dalam 25 mL limbah *laundry* dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan variasi waktu adsorpsi 5, 10, 30, 60, 90, 120, 150, 180 menit [22], [23]. Pengelompokan data pada pemodelan kinetika antara lain:

##### Kinetika Orde 1

$$\ln C_t = -k_1 t + \ln C_0 \quad (1)$$

Nilai  $k_1$  yaitu tetapan laju reaksi orde 1 (m/s),  $C_t$  yaitu konsentrasi adsorbat pada waktu  $t$  dan  $C_o$  yaitu konsentrasi mula-mula, nilai  $K_1$  didapatkan dari gradien plot  $\ln C_o/C_t$  vs  $t$  [23].

#### Kinetika Orde 2

$$\frac{1}{C_t} = k_2 t + \frac{1}{C_o} \quad (2)$$

Nilai  $k_2$  yaitu tetapan laju reaksi orde 2 (m/s),  $C_t$  merupakan konsentrasi adsorbat pada waktu  $t$  dan  $C_o$  yaitu konsentrasi mula-mula. Nilai  $k_2$  didapatkan dari gradien plot  $1/C_t$  vs  $t$  [23].

#### Kinetika Pseudo Orde 1

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - k_3 t \quad (3)$$

Nilai  $k_3$  yaitu tetapan laju reaksi pseudo orde 1 ( $\text{min}^{-1}$ ), plot yang digunakan pada persamaan ini yaitu  $\log (q_e - q_t)$  vs  $t$  [24].

#### Kinetika Pseudo Orde 2

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \left( \frac{1}{k_4 q_e^2} \right) \quad (4)$$

Nilai  $k_4$  yaitu tetapan laju reaksi pseudo orde 2 ( $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $q_t$  yaitu nilai kapasitas adsorpsi pada waktu  $t$ , dan  $q_e$  yaitu kapasitas adsorpsi dalam kesetimbangan. Plot yang digunakan pada persamaan ini yaitu  $t/q_t$  vs  $t$  [25].

### 2.1.6. Isoterm Adsorpsi Karbon Aktif DEG Pada Limbah Laundry

Isoterm adsorpsi menunjukkan banyaknya zat yang teradsorpsi pada adsorbat pada suhu konstant. Kajian isoterm adsorpsi dilakukan dengan cara melakukan variasi massa adsorben. Karbon aktif dimasukkan ke dalam 25 mL limbah laundry dengan variasi massa adsorben 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 mg kemudian larutan diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Hasil pengelompokan data pemodelan isoterm adsorpsi COD dan kekeruhan menggunakan karbon aktif DEG diambil 4 pemodelan yaitu Langmuir, Freundlich, Elovich, dan Harkin-Jura [26], [27].

#### Isoterm Langmuir

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{K_L q_m} \quad (5)$$

Parameter  $q_e$  yaitu kapasitas adsorpsi dalam kesetimbangan,  $C_e$  yaitu konsentrasi saat kesetimbangan,  $q_m$  adalah kapasitas adsorpsi maksimum, dan  $K_L$  adalah konstanta isoterm Langmuir. Plot pemodelan isoterm Langmuir yaitu  $C_e/q_e$  vs  $C_e$ .

#### Isoterm Freundlich

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (6)$$

Parameter  $K_F$  merupakan kapasitas adsorpsi ( $\text{L}/\text{mg}$ ),  $1/n$  merupakan intensitas adsorpsi serta menunjukkan distribusi relatif dari energi dan heterogenitas dari permukaan adsorbat. Plot pemodelan ini yaitu  $\log q_e$  vs  $\log C_e$ .

#### Isoterm Elovich

$$\ln \frac{q_e}{C_e} = \ln K_E q_m - \frac{q_e}{q_m} \quad (7)$$

Parameter  $K_E$  merupakan konstanta dari isoterm Elovich dan  $q_m$  merupakan kapasitas adsorpsi maksimum. Plot dari persamaan ini yaitu  $\ln q_e/C_e$  vs  $q_e$ .

#### Isoterm Harkin-Jura

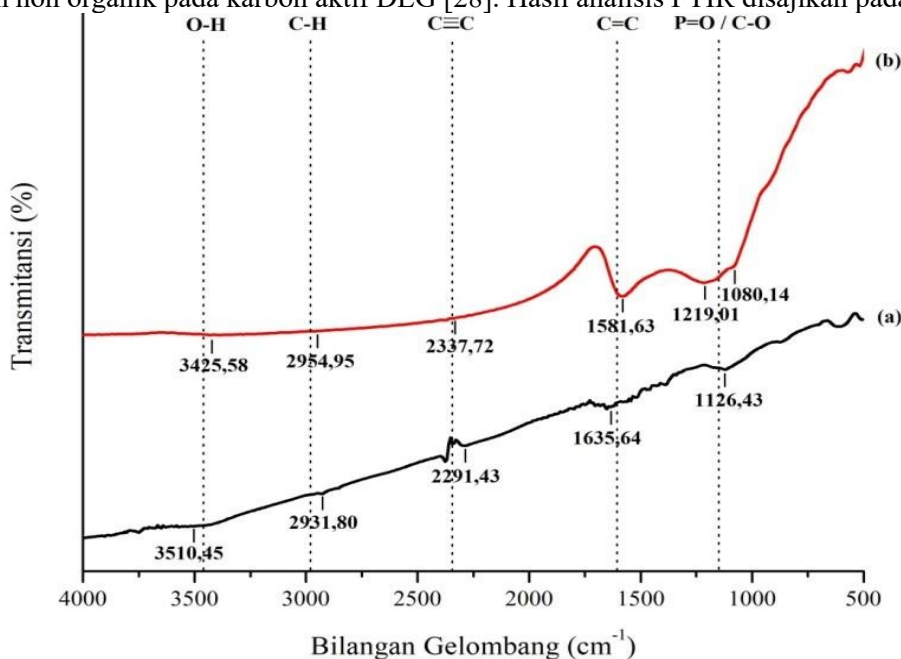
$$\frac{1}{q_e^2} = \frac{B}{A} - \left( \frac{1}{A} \right) \log C_e \quad (8)$$

Parameter  $B$  dan  $A$  merupakan konstanta dari isoterm Harkin-Jura,  $q_e$  yaitu kapasitas adsorpsi dalam kesetimbangan. Plot dari persamaan ini yaitu  $1/q_e^2$  vs  $\log C_e$ .

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Karakterisasi Gugus Fungsi Karbon Aktif DEG (FTIR)

Pada penelitian ini dilakukan analisis gugus fungsional pada karbon aktif DEG menggunakan spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR) yang bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi organik dan non organik pada karbon aktif DEG [28]. Hasil analisis FTIR disajikan pada Gambar 1.



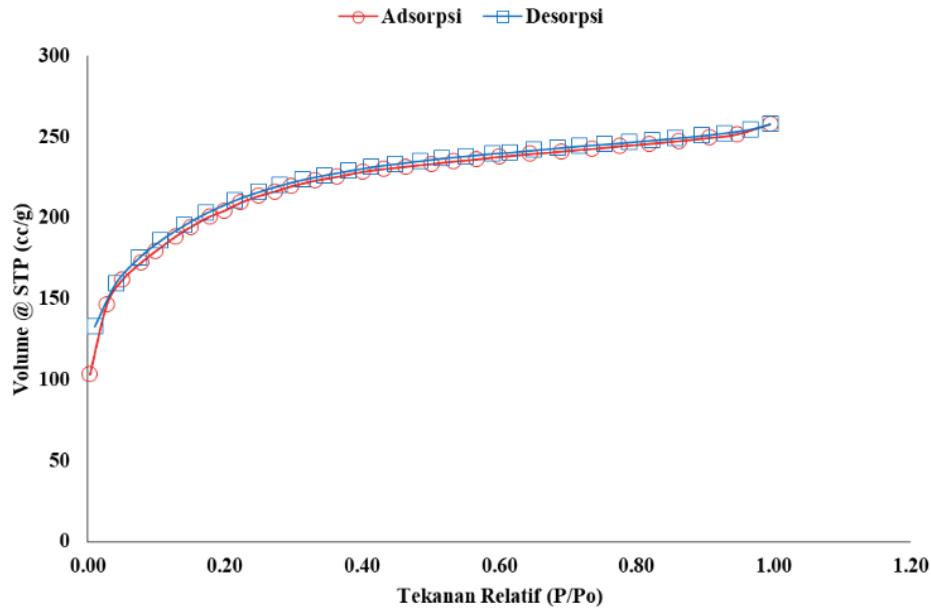
Gambar 1. Spektra uji FTIR a) karbon aktif standar dan b) karbon aktif DEG.

Berdasarkan Gambar 1, karbon aktif DEG (Gambar 1(b)) memiliki beberapa puncak serapan yang terdeteksi yaitu pada bilangan gelombang 3425,58 cm<sup>-1</sup> menunjukkan vibrasi peregangan O-H dari gugus hidroksil [29] pada molekul selulosa, lignin, dan hemiselulosa [30]. Pada bilangan gelombang 2954,95 cm<sup>-1</sup> menunjukkan serapan dari ikatan jenuh alifatik C-H *stretching*, pada bilangan gelombang 2337,72 cm<sup>-1</sup> menunjukkan vibrasi C≡C pada grup alkuna dan metilen [31]. Pada bilangan gelombang 1581,63 cm<sup>-1</sup> menunjukkan adanya pita serapan dari regangan C=C aromatik [11]. Munculnya puncak pada bilangan gelombang 1219,01 cm<sup>-1</sup> merupakan vibrasi peregangan P=O yang berikatan dengan hidrogen dari fosfat atau polifosfat. Di sisi lain, munculnya serapan pada area ini dikarenakan vibrasi peregangan O-C dalam ikatan P-O-C dan P=OOH. Serapan ini muncul karena penggunaan aktivator H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> dalam pembuatan karbon aktif [32].

### 3.2. Analisis Pori Karbon Aktif DEG (Brunauer Emmett Teller - BET)

Karbon aktif DEG dianalisis menggunakan BET untuk menentukan ukuran pori hal ini dikarenakan permukaan karbon mempunyai karakter yang unik, yaitu struktur penjerapannya yang menentukan daya jerapannya [33]. Berdasarkan Gambar 2, diperoleh data bahwa karbon aktif DEG memiliki luas permukaan pori sebesar 726,489 m<sup>2</sup>/g dan diameter pori 10,992 Å. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karbon aktif DEG tergolong mikropori yang biasanya diperoleh dari adsorben karbon aktif dan zeolit [34]. Hal ini berdasarkan klasifikasi IUPAC yang menjelaskan apabila ukuran diameter pori < 20 Å termasuk mikropori [35].

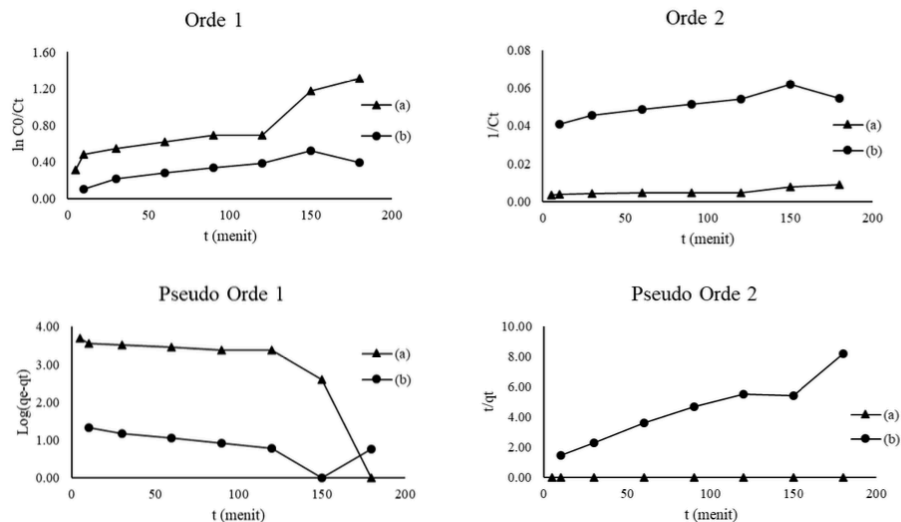




Gambar 2. Kurva Isoterm Adsorpsi-Desorpsi N<sub>2</sub> Pada Karbon Aktif DEG

### 3.3. Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif DEG

Kajian kinetika adsorpsi adalah ukuran serapan adsorpsi terhadap waktu pada tekanan atau konsentrasi konstan dan digunakan untuk mengukur difusi adsorbat dalam pori-pori [21]. Hasil pengelompokan data kinetika adsorpsi COD dan kekeruhan pada limbah *laundry* pada karbon aktif DEG disajikan pada Gambar 3 dan Tabel 1.



Gambar 3. Pemodelan kinetika adsorpsi (a) COD dan (b) kekeruhan pada limbah *laundry* menggunakan karbon aktif DEG

Pemodelan kinetika adsorpsi COD dan kekeruhan pada limbah *laundry* menggunakan karbon aktif DEG lebih cenderung mengikuti pemodelan kinetika Pseudo Orde 2 dibandingkan dengan pemodelan lainnya, dimana nilai  $R^2$  yaitu 0,9181 untuk COD dan 0,9411 untuk kekeruhan. Dilihat dari data Tabel 1, selain nilai  $R^2$ , terdapat parameter lain yaitu  $q_e$  (jumlah adsorbat yang terjerap) dan  $k$  (konstanta laju orde dua semu) dimana nilai  $q_e$  pada adsorpsi COD ( $10000 \text{ mg.g}^{-1}$ ) lebih besar dibandingkan kekeruhan ( $28,8184 \text{ mg.g}^{-1}$ ), dan nilai  $k$  COD  $0,0000034 \text{ g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  lebih kecil

dibandingkan dengan nilai  $k$  kekeruhan yaitu  $0,0009 \text{ g.mg}^{-1}\text{min}^{-1}$ . Hal ini disebabkan karena perbedaan waktu kontak optimum.

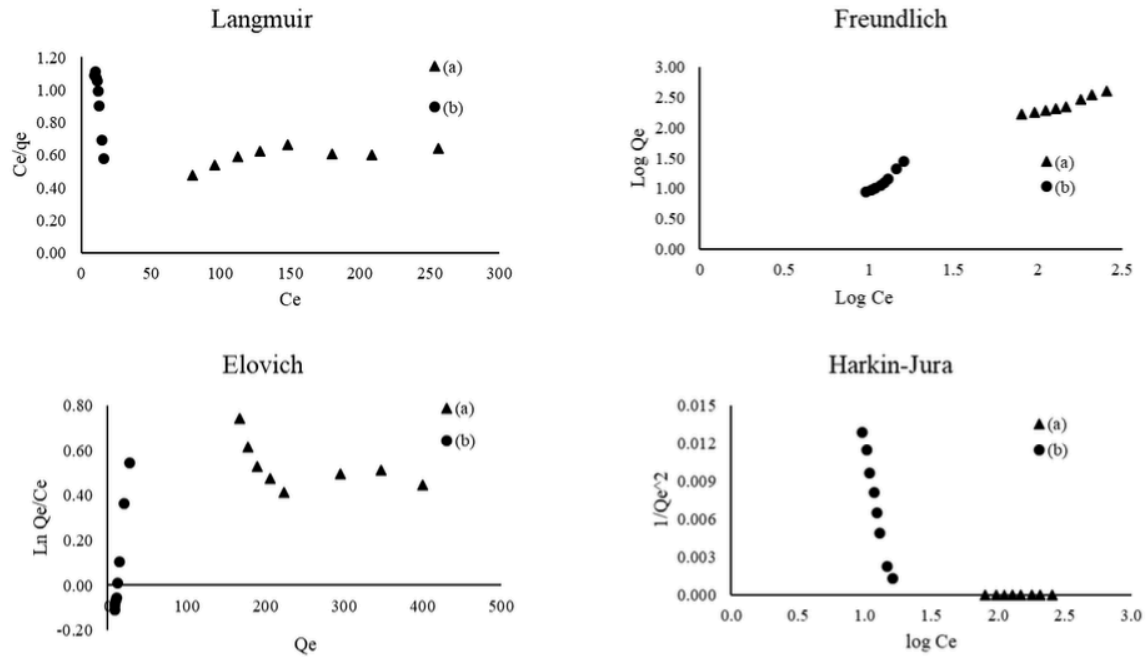
TABEL I. Parameter pemodelan kinetika adsorpsi COD dan kekeruhan pada limbah *laundry* menggunakan karbon aktif DEG

Pemodelan	Parameter	Parameter Sampel Uji	
		COD	Kekeruhan
Orde 1	Persamaan	$y = 0,0049x + 0,335$	$y = 0,0019x + 0,1408$
	$R^2$	0,881	0,797
	$k_1 \text{ (m/s)}$	0,0049	0,0019
Orde 2	Persamaan	$y = 0,00003x + 0,00303$	$y = 0,0001x + 0,0421$
	$R^2$	0,8336	0,7787
	$k_2 \text{ (m/s)}$	0,00003	0,0001
Pseudo Orde 1	Persamaan	$y = -0,0144x + 4,1063$	$y = -0,0053x + 1,3424$
	$R^2$	0,5858	0,5945
	$k_3 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	-0,0232	-0,0085
Pseudo Orde 2	Persamaan	$y = 0,0001x + 0,0029$	$y = 0,0347x + 1,283$
	$R^2$	<b>0,9181</b>	<b>0,9411</b>
	$k_4 \text{ (g.mg}^{-1}\text{min}^{-1}\text{)}$	0,0000034	0,0009
	$q_e \text{ (mg.g}^{-1}\text{)}$	10000	28,8184

Pemodelan kinetika Pseudo Orde 2 didasarkan pada asumsi bahwa jenis adsorpsi yang terjadi cenderung ke arah adsorpsi secara kimia (*chemisorption*) dari adsorbat pada adsorben. Hasil pemodelan kinetika adsorpsi pada penelitian ini sesuai dengan penelitian Anugrahwati (2020) yang melakukan penelitian tentang kajian adsorpsi komposit karbon magnetik dari kulit salak dan besi oksida untuk menurunkan kadar COD pada limbah *laundry* dimana proses yang terjadi mengikuti pemodelan kinetika pseudo orde dua dengan nilai  $R^2$  0,9468 [36]. Pada penelitian Wulandari (2021) yang bertujuan untuk mengetahui efektivitas karbon aktif daun eceng gondok dalam penurunan kadar surfaktan dan fosfat pada limbah deterjen didapatkan hasil efektivitas penurunan surfaktan 52,99% dan fosfat 78,35% [37]. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karbon aktif DEG dapat menurunkan senyawa organik dalam limbah *laundry*, apabila senyawa organik dalam limbah *laundry* berkurang maka kadar COD dan kekeruhan mengalami penurunan.

### 3.4. Isoterm Adsorpsi karbon aktif DEG

Hasil pemodelan isoterm adsorpsi COD menggunakan karbon aktif DEG mengikuti pemodelan Freundlich, dilihat dari nilai koefisien  $R^2 = 0,9535$  serta parameter-parameter pendukung yang bernilai positif yang disajikan pada Tabel 2, dimana  $K_F$  merupakan konstanta Freundlich,  $n$  merupakan nilai linearitas antara larutan adsorbat dan proses adsorpsi. Apabila nilai  $n=1$  adsorpsi linier,  $n < 1$  interaksi adsorpsi secara kimia dan jika  $n > 1$  interaksi adsorpsi secara fisik, proses adsorpsi yang menguntungkan dinyatakan ketika  $0 < 1/n < 1$ , dan proses adsorpsi kooperatif terjadi ketika  $1/n > 1$  [38]. Pada data Tabel 2 didapat nilai  $n$  yaitu 1,2492 sedangkan nilai  $1/n$  yaitu 0,8. Hal ini menunjukkan penyerapan karbon aktif DEG terhadap COD menguntungkan, dimana nilai  $1/n$  merupakan parameter heterogenitas. Semakin kecil nilai  $1/n$  maka semakin besar heterogenitas yang diharapkan [39]. Pemodelan isoterm adsorpsi Freundlich menjelaskan bahwa pori-pori yang terbentuk pada adsorben bersifat heterogen sehingga ion-ion yang teradsorpsi membentuk lapisan *multilayer* pada lapisan permukaan adsorben sehingga ikatannya tidak kuat [40].



Gambar 4. Pemodelan adsorpsi (a) COD dan (b) kekeruhan menggunakan karbon aktif DEG

TABEL II. Parameter pemodelan isoterm adsorpsi kadar COD dan kekeruhan menggunakan karbon aktif DEG.

Parameter Sampel Uji			
Pemodelan	Parameter	COD	Kekeruhan
Langmuir	Persamaan	$y = 0,0006x + 0,4951$	$y = -0,0884x + 2,0255$
	$R^2$	0,4255	0,939
	$q_m$	1666,6667	11,3122
	K	3366,3233	5,5849
Freundlich	Persamaan	$y = 0,8005x + 0,658$	$y = 2,3027x - 1,3748$
	$R^2$	<b>0,9535</b>	0,958
	$K_F$	4,5499	0,0422
	N	1,2492	0,4343
Elovich	Persamaan	$y = -0,0007x + 0,6913$	$y = 0,0359x - 0,427$
	$R^2$	0,2826	<b>0,9905</b>
	$q_m$	1428,57	27,8552
	$K_e$	$7,9142 \times 10^{-3}$	0,9848
Harkin-Jura	Persamaan	$y = -0,0552x + 0,067$	$y = -0,00006x + 0,00016$
	$R^2$	0,8914	0,9827
	A	18,1159	16666,6667
	B	1,2138	3,3333

Pada persamaan 171rganic171 Freundlich jenis ikatan yang terbentuk tidak sama dan energi serta situs aktif pada permukaan adsorben beragam sehingga kemampuan adsorpsi molekul terlarut berbeda pada tiap molekulnya, dimana tidak semua permukaan adsorben mempunyai daya adsorpsi yang sama [41]. Hal ini didukung pada penelitian sebelumnya [42] yang melakukan penelitian tentang penyisihan COD dari air limbah laundry dengan memanfaatkan sabut kelapa sebagai adsorben, dimana proses yang terjadi merupakan pemodelan Freundlich dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,9901. Pemodelan 171rganic171 adsorpsi kekeruhan menggunakan karbon aktif DEG cenderung mengikuti pemodelan Elovich dibandingkan dengan pemodelan yang lain, hal ini dapat dilihat dari nilai koefisiensi  $R^2 = 0,9905$ . Hal ini juga didukung dengan parameter lain yaitu  $q_m$  dan  $K_e$ , dimana  $q_m$  merupakan kapasitas maksimum adsorpsi dengan nilai 27,8552 mg/g dan  $K_e$  merupakan nilai konstanta 171rganic171 Elovich dengan nilai 0,9848 L/mg. Pemodelan Elovich merupakan



persamaan yang didasarkan pada prinsip 172rganic yang mengasumsikan bahwa situs adsorpsi meningkat secara eksponensial dengan adsorpsi, sehingga menunjukkan adsorpsi *multilayer* [27].

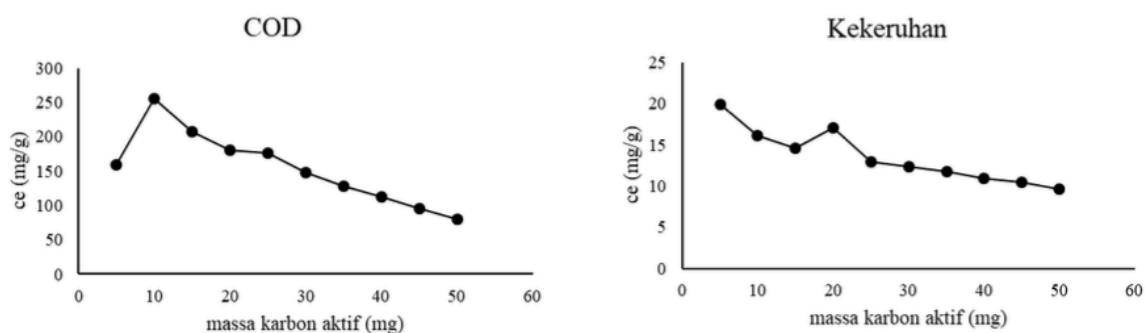
### 3.5. Efektivitas Penurunan Kadar COD dan Kekeuhan

Limbah yang digunakan merupakan salah satu limbah *laundry* dari daerah Salatiga yang memiliki kadar COD tinggi yaitu 416 mg/L dan tingkat kekeuhan 27,2 NTU. Hasil tersebut memiliki nilai yang melebihi baku mutu dari Pemerintah Daerah Provinsi Jawa Tengah Nomor 5 Tahun 2012, dimana kadar maksimum COD 250 mg/L dan kekeuhan 6-9 NTU, sehingga perlu dilakukan *treatment* menggunakan karbon aktif DEG. Hasil adsorpsi COD menggunakan karbon aktif DEG yaitu pada waktu kontak 180 menit dengan massa karbon aktif sebesar 50 mg mampu menurunkan konsentrasi kadar COD akhir menjadi 80 mg/L (80,76%).

Faktor yang mempengaruhi berkurangnya kadar COD dalam limbah *laundry* diperkirakan adanya interaksi yang terjadi antara gugus -OH pada permukaan karbon aktif yang berikatan dengan ion  $H^+$  pada fosfat sehingga terprotonasi menjadi  $-OH^{2+}$  [43]. Tinggi rendahnya kadar senyawa 172rganic dalam limbah *laundry* akan mempengaruhi besar kecilnya kadar COD. Selain itu, pada penelitian [44] menjelaskan bahwa kemampuan adsorpsi COD oleh karbon aktif DEG ini diperkirakan karena adanya gugus permukaan asam CO yang membuat karbon aktif DEG bersifat hidrofilik (elektronegatif) sehingga dapat menarik gugus molekul air dan menyebabkan interaksi 172rganic menarik antara karbon aktif dan molekul 172rganic.

TABEL III. Persentase penurunan kadar COD dan kekeuhan pada limbah *laundry*

Parameter	Kadar Awal	Kadar Akhir Setelah Perlakuan	% Efektivitas
COD	416 mg/L	80 mg/L	80,76
Kekeuhan	27,2 NTU	9,6 NTU	64,71



Gambar 5. Grafik penurunan kadar COD dan kekeuhan

Hasil adsorpsi kadar kekeuhan menggunakan karbon aktif DEG optimal pada waktu kontak 150 menit dengan massa karbon aktif sebesar 50 mg dapat menurunkan kadar kekeuhan hingga 9,6 NTU. Walaupun hasil ini belum memenuhi syarat dibawah baku mutu kadar kekeuhan yaitu 6-9 NTU namun karbon aktif DEG telah mampu menurunkan kadar kekeuhan limbah *laundry* sebesar 64,71%. Hasil perlakuan lain pada penelitian ini menunjukkan bahwa karbon aktif DEG dapat menurunkan kadar COD mencapai kadar 80 mg/L (80,76%) atau dibawah baku mutu kadar maksimum COD menurut Peraturan Daerah Jawa Tengah Tahun 2012 yaitu 250 mg/L. Fenomena menarik terjadi pada kondisi adsorpsi kadar COD (10 mg) dan kekeuhan (20 mg) menggunakan karbon aktif DEG. Kondisi ini dapat terjadi karena adanya kecenderungan adsorbat terjerap dan pada titik tertentu terlepas karena kondisi permukaan adsorben mencapai titik jenuh untuk menyerap, fenomena ini dikenal dengan perkolasi. Fenomena perkolasi ini dimungkinkan terjadi karena faktor geometri ruang dalam pori (distribusi ukuran) dan topologi permukaan adsorben serta parameter fisika selama proses adsorpsi [45]. Berdasarkan hasil yang diperoleh, karbon aktif DEG lebih efektif dalam penurunan kadar COD dan kekeuhan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, yaitu pada penelitian [15] yang dapat menurunkan kadar COD sebesar 58,14% dan kekeuhan 78,17% pada

sampel air sumur menggunakan arang aktif eceng gondok teraktivasi asam fosfat 9% pada waktu optimal 300 menit dengan massa arang aktif yaitu 5 g.

#### 4. KESIMPULAN

Pemodelan kinetika adsorpsi karbon aktif DEG untuk kadar COD dan kekeruhan yaitu mengikuti pemodelan Pseudo Orde Dua dengan nilai koefisien masing-masing  $R^2$  adalah 0,9181 dan 0,9411. Untuk pemodelan isoterm adsorpsi karbon aktif DEG pada kadar COD mengikuti persamaan isoterm Freundlich dengan nilai koefisien  $R^2$  adalah 0,9535 dan untuk pemodelan isoterm adsorpsi karbon aktif DEG pada kekeruhan mengikuti pemodelan isoterm Elovich dengan nilai koefisien  $R^2$  adalah 0,9905. Karbon aktif DEG dapat menurunkan kadar COD pada limbah *laundry* mencapai 80,76% dengan massa 50 mg pada waktu kontak 180 menit dan kadar kekeruhan pada limbah *laundry* sebesar 64,71% dengan massa 50 mg pada waktu kontak 150 menit.

#### Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Universitas Kristen Satya Wacana Salatiga atas dukungan dana untuk analisis karakterisasi material karbon aktif dan pembelian beberapa bahan kimia (*reagent grade pro-analysis*) melalui Skema Penelitian Wajib Dana Internal UKSW Tahun Anggaran 2022 (SKR No. 037/Pen./Rek./1/V/2022).

#### Daftar Pustaka

- [1] N. Apriyani, "Penurunan Kadar Surfaktan dan Sulfat dalam Limbah Laundry," *Media Ilm. Tek. Lingkungan.*, vol. 2, no. 1, pp. 37–44, 2017, doi: 10.33084/mitl.v2i1.132.
- [2] S. S. Santi, "Penurunan Konsentrasi Surfactan Pada Limbah Detergen dengan Proses Fotokatalitik Sinar UV," vol. 4, no. 1, pp. 260–264, 2009.
- [3] D. Gumelar and Y. Hendrawan, "Pengaruh Aktivator dan Waktu Kontak Terhadap Kinerja Arang Aktif Berbahan Eceng Gondok ( *Eichornia crassipes* ) Pada Penurunan COD Limbah Cair Laundry," *J. Keteknikan Pertan. Trop. dan Biosist.*, vol. 3, no. 1, pp. 15–23, 2015.
- [4] F. V. Wichelsa, Y. Hanani, and N. Astorina, "Penurunan Kadar Chemical Oxygen Demand (Cod) Pada Limbah Cair Laundry Orens Tembalang Dengan Berbagai Variasi Dosis Karbon Aktif Tempurung Kelapa," *J. Kesehat. Masy.*, vol. 6, no. 6, pp. 135–142, 2018.
- [5] J. Purwani, "Remediasi Tanah dengan Menggunakan Tanaman Akumulator Logam Berat Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides* L.)," *Balai Penelit. Tanah. Bogor*, pp. 287–298, 2010.
- [6] T. Bohli, "Comparative Study of Bivalent Cationic Metals Adsorption Pb(II), Cd(II), Ni(II) and Cu(II) on Olive Stones Chemically Activated Carbon," *J. Chem. Eng. Process Technol.*, vol. 04, no. 04, 2013, doi: 10.4172/2157-7048.1000158.
- [7] J. Wang *et al.*, "A Targeted 'Capture' and 'Removal' Scavenger Toward Multiple Pollutants for Water Remediation Based on Molecular Recognition," *Adv. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1002/adv.201500289.
- [8] S. Malekmohammadi, A. Mirbagheri, and M. Ehteshami, "Comparison of silica, activated carbon, and zeolite adsorbents in the removal of ammonium, iron, COD, turbidity and phosphate pollutants, and investigating the effect of discharge on the removal of pollutant s," *Int. J. Humanit. Cult. Stud.*, pp. 667–679, 2016.
- [9] M. O. Esterlita and N. Herlina, "Pengaruh Penambahan Aktivator ZnCl<sub>2</sub>, KOH, dan H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> dalam Pembuatan Karbon Aktif dari Pelepah Aren (*Arenga Pinnata*)," *J. Tek. Kim. USU*, vol. 4, no. 1, pp. 47–51, 2015.
- [10] J. Rivera-Utrilla, M. Sánchez-Polo, V. Gómez-Serrano, P. M. Álvarez, M. C. M. Alvim-Ferraz, and J. M. Dias, "Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview," *J. Hazard. Mater.*, vol. 187, no. 1–3, pp. 1–23, 2011, doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.033.
- [11] C. A. Riyanto, E. Prabalaras, and Y. Martono, "Karakterisasi Nanopartikel Karbon Aktif dari Daun Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*) Berdasarkan Variasi Suhu dan Waktu Aktivasi," *J. Kim. dan Kemasan*, vol. 42, no. 2, p. 85, 2020, doi: 10.24817/jkk.v42i2.5633.
- [12] A. M. Imammuddin, S. Suparman, W. Suprpto, and A. A. Sonief, "An Analysis Of Effect of Water Hyacinth Carbonization Temperature On Fabrication And Emi Shielding Radar," *Eastern-European J.*

- Enterp. Technol.*, vol. 1, pp. 6–14, 2021, doi: 10.15587/1729-4061.2021.224219.
- [13] R. Rachmawaty, M. Meriyani, and I. S. Priyanto, “Sintesis Selulosa Diastet dari Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) dan Potensinya Untuk Pembuatan Membran,” *Jur. Tek. Kim. Fak. Tek. Univ. Diponegoro*, vol. 2, no. 3, pp. 8–16, 2013.
- [14] Elwin, M. Lutfi, and Y. Hendrawan, “Analisis Pengaruh Waktu Pretreatment dan Konsentrasi NaOH terhadap Kandungan Selulosa, Lignin dan Hemiselulosa Eceng Gondok Pada Proses Pretreatment Pembuatan Bioetanol Analysis of Pretreatment Time and NaOH Concentration Effect on Cellulose, Lignin and,” *J. Keteknikan Pertan. Trop. dan Biosist.*, vol. 2, no. 2, pp. 110–116, 2014.
- [15] A. E. Valentina, S. S. Miswadi, and Latifah., “Pemanfaatan Arang Eceng Gondok dalam Menurunkan Kekeruhan, COD, BOD Pada Air Sumur,” *Edaj*, vol. 2, no. 3, 2013.
- [16] H. Setyobudiarso and E. Yuwono, “Rancangan Bangun Alat Penjernih Air Limbah Cair Laundry Dengan Menggunakan Media Penyaringan Kombinasi Pasir-Arang Aktif,” *J. Neutrino*, vol. 6, no. 2, pp. 84–90, 2014.
- [17] D. P. Putri, S. A. Wahida, and Marlinda, “Pemanfaatan Kulit Pisang Kepok (*Musa Paradisiaca L.*) Sebagai Adsorben Untuk Menurunkan Kadar COD (Chemical Oxygen Demand) Pada Air Limbah Laundry,” *J. ISAINTEK*. 2022, vol. 5, no. 2, pp. 71–77, 2022.
- [18] C. A. Riyanto and E. Prabalaras, “The Adsorption Kinetics and Isoterm of Activated Carbon from Water Hyacinth Leaves (*Eichhornia crassipes*) on Co(II),” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1307, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1307/1/012002.
- [19] SNI 6989.73, “Air dan air limbah – Bagian 73 : Cara uji Kebutuhan Oksigen Kimiawi ( Chemical Oxygen Demand / COD ) dengan refluks tertutup secara titrimetri Badan Standard isasi Nasional,” 2009.
- [20] M. J. Parera, W. Supit, and J. F. Rumampuk, “Analisis Perbedaan Pada Uji Kualitas Air Sumur Di Kelurahan Madidir Ure Kota Bitung Berdasarkan Parameter Fisika,” *J. e-Biomedik*, vol. 1, no. 1, pp. 466–472, 2013, doi: 10.35790/ebm.1.1.2013.4584.
- [21] D. Saha and H. A. Grappe, *Adsorption properties of activated carbon fibers*, no. i. Elsevier Ltd., 2017.
- [22] Y. Khery, N. Kurnia, and K. Kahpiyati, “Efektifitas Penurunan COD Limbah Tempe Tahu Oleh Karbon Aktif Tongkol Jagung,” *Hydrog. J. Kependidikan Kim.*, vol. 1, no. 1, p. 21, 2013, doi: 10.33394/hjkk.v1i1.575.
- [23] P. Kurniawati, B. Wiyantoko, A. Kurniawan, and T. E. Purbaningtiyas, “Kinetic study of Cr(VI) Adsorption on Hydrotalcite Mg/Al with Molar Ratio 2:1,” *Eksakta*, vol. 13, no. 1–2, pp. 11–21, 2016, doi: 10.20885/eksakta.vol13.iss1-2.art2.
- [24] G. Galamini, G. Ferretti, V. Medoro, N. Tescaro, and B. Faccini, “Isoterm, Kinetics, and Thermodynamics of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Adsorption in Raw Liquid Manure by Using Natural Chabazite Zeolite - Rich Tuf.,” 2020.
- [25] J. Wang and X. Guo, “Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 390, no. November 2019, p. 122156, 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122156.
- [26] W. P. Utomo *et al.*, “Penurunan Kadar Surfaktan Anionik dan Fosfat dalam Air Limbah Laundry di Kawasan Keputih, Surabaya menggunakan Karbon Aktif,” *Akta Kim. Indones.*, vol. 3, no. 1, p. 127, 2018, doi: 10.12962/j25493736.v3i1.3528.
- [27] N. Ayawei, A. N. Ebelegi, and D. Wankasi, “Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms,” *J. Chem.*, vol. 2017, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1155/2017/3039817.
- [28] S. S. Santi, H. Febriansyah, R. Chamida, and E. A. Saputro, “Functional Groups Characteristics in Polymerization Cellulose Silica,” *J. Tek. Kim.*, vol. 84, pp. 46–53, 2021.
- [29] R. Rahmawati and B. Utami, “Adsorpsi Ion Logam Cr ( Total ) Dengan Adsorben Tongkol Jagung ( *Zea Mays L.* ) Kombinasi Kulit Kacang Tanah ( *Arachis Hypogea L.* ) Menggunakan Metode Kolom,” vol. 21, no. January, pp. 346–350, 2018.
- [30] F. P. Perdani, C. A. Riyanto, and Y. Martono, “Karakterisasi Karbon Aktif Kulit Singkong (*Manihot esculenta Crantz*) Berdasarkan Variasi Konsentrasi H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> dan Lama Waktu Aktivasi,” *IJCA (Indonesian J. Chem. Anal.)*, vol. 4, no. 2, pp. 72–81, 2021, doi: 10.20885/ijca.vol4.iss2.art4.
- [31] T. Mahmood, R. Ali, A. Naeem, M. Hamayun, and M. Aslam, “Potential of Used *Camellia Sinensis* Leaves as Precursor for Activated Carbon Preparation by Chemical Activation with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>; Optimization

- Using Response Surface Methodology,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 109, pp. 548–563, 2017, doi: 10.1016/j.psep.2017.04.024.
- [32] C. A. Riyanto, B. M. Raharjianti, and N. R. Aminu, “Study Kinetika dan Isoterm Ion Fe(III) Dan Mn(II) Pada Karbon Aktif Batang Eceng Gondok,” no. III, pp. 44–55, 2020.
- [33] M. F. P. Sari, P. Loekitowati, and R. Mohadi, “Penggunaan Karbon Aktif Dari Ampas Tebu Sebagai Adsorben Zat Warna Procion Merah Limbah Cair Industri Songket,” *J. Nat. Resour. Environ. Manag.*, vol. 7, no. 1, pp. 37–40, 2017, doi: 10.19081/jpsl.2017.7.1.37.
- [34] L. Czepirski, M. A. Balys, and E. K. Czepirska, “Some Generalization of Langmuir Adsorption Isoterm,” *J. Geod. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 144–155, 2012, doi: 10.2478/v10156-011-0033-8.
- [35] S. Wulandary, “Sintesis Aerogel Selulosa dari Serat Batang Jagung dan Aplikasinya dalam Absorpsi Zat Warna Rhodamin B dan Metilen Biru,” 2019.
- [36] M. Anugrahwati, F. I. Fajarwati, and R. A. Safitri, “Adsorption Study of Magnetic Carbon Composite From Salacca Zalacca Peel and Iron Oxide To Reduce Chemical Oxygen Demand (Cod) Levels in Laundry Waste,” *Indones. J. Chem. Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 61–68, 2020, doi: 10.20885/ijcer.vol5.iss2.art3.
- [37] R. Wulandari, C. A. Riyanto, and Y. Martono, “Kinerja Karbon Aktif Daun Eceng Gondok (DEG) dalam Penurunan Kadar Surfaktan dan Fosfat dalam Limbah Detergen,” 2022.
- [38] R. Ragadhita, A. Bayu, and D. Nandiyanto, “How to Calculate Adsorption Isotherms of Particles Using Two-Parameter Monolayer Adsorption Models and Equations,” vol. 6, no. 1, pp. 205–234, 2021.
- [39] A. O. Dada, A. P. Olalekan, and A. M. Olatunya, “Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn 2+ Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk,” *IOSR J. Appl. Chem.*, vol. 3, no. 1, pp. 38–45, 2012, doi: 10.9790/5736-0313845.
- [40] R. D. Aprian, Fadarina, and I. Purnamasari, “Pemanfaatan Limbah Cucian Sebagai Sumber Fosfat Ramah Lingkungan Terhadap Pertumbuhan Tanaman,” *J. Kinet.*, vol. 12, no. 02, pp. 38–43, 2021.
- [41] Z. Sartika, M. Mariana, and M. D. Supardan, “Penurunan Kadar COD, BOD dan Nitrit Limbah Pabrik Tahu Menggunakan Karbon Aktif Ampas Bubuk Kopi,” *J. Serambi Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 557–564, 2019, doi: 10.32672/jse.v4i2.1334.
- [42] D. T. Putri, “Penyisihan Chemical Oxygen Demand (Cod) Dari Air Limbah Laundry Dengan Memanfaatkan Sabut Kelapa Sebagai Adsorben,” 2021.
- [43] G. N. R. Pargiman, A. Arnelli, and Y. Astuti, “Adsorption of HDTMA-Br surfactant with concentration variation by rice husk-based activated carbon produced by variation of carbonization temperature,” *J. Kim. Sains dan Apl.*, vol. 21, no. 4, pp. 171–174, 2018, doi: 10.14710/jksa.21.4.171-174.
- [44] M. M. Z. Alias, M. R. Ghazi, N. N. R. Yusoff, and M. H. Jamaludin, “Effect of activation agents on cod reduction using activated carbon from agricultural residue,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 1010 MSF, no. September, pp. 453–458, 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1010.453.
- [45] M. Parlari and Y. C. Yortsos, “Percolation theory of vapor adsorption—desorption processes in porous materials,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 124, no. 1, pp. 162–176, Jul. 1988, doi: 10.1016/0021-9797(88)90337-2.