

PEMANFAATAN *FLY ASH* DAN KARBON BIJI SALAK SEBAGAI ADSORBEN UNTUK PENURUNAN COD LIMBAH CAIR *MALL* DINOYO CITY DENGAN PENDEKATAN *ISOTHERM* ADSORPSI

Aulia Natasya dan Mufid

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia
aulianatasya520@gmail.com; [mufidpolinema@gmail.com]

ABSTRAK

Peningkatan aktivitas masyarakat di kawasan pusat perbelanjaan seperti *Mall* Dinoyo City menghasilkan limbah cair domestik dengan kadar *Chemical oxygen demdan* (COD) tinggi, yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak ditangani dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas kombinasi *fly ash* dan karbon biji salak sebagai adsorben dalam menurunkan kadar COD dari limbah cair tersebut, serta menganalisis kesesuaian data dengan model *isotherm* adsorpsi Langmuir dan Freundlich. Proses adsorpsi dilakukan secara *batch* dengan variasi rasio massa *fly ash* dan karbon biji salak (1:3, 1:4, dan 1:5) serta waktu adsorpsi (30, 45, 60, 75, dan 90 menit). Hasil menunjukkan bahwa variabel terbaik terdapat pada rasio 1:5 dengan waktu adsorpsi 90 menit, yang menghasilkan penurunan COD sebesar 84,74%. Karakterisasi adsorben melalui *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan permukaan berpori dan tidak rata yang mendukung proses adsorpsi. Analisis *isotherm* menunjukkan bahwa data lebih sesuai dengan model Langmuir dengan nilai koefisien korelasi (R^2) sebesar 0,986. Hasil ini menunjukkan potensi besar kombinasi *fly ash* dan karbon biji salak sebagai adsorben murah dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair domestik.

Kata kunci: adsorpsi, COD, *fly ash*, *isotherm* adsorpsi, karbon biji salak

ABSTRACT

Domestic wastewater with high *Chemical Oxygen Demdan* (COD) levels, which has the potential to pollute the environment if not properly treated. This study aims to evaluate the effectiveness of a combination of *fly ash* dan salak seed carbon as adsorbents in reducing the COD levels of this wastewater, as well as to analyze the fit of the data to the Langmuir dan Freundlich adsorption isotherm models. The adsorption process was conducted in a batch manner with variations in the mass ratio of *fly ash* to salak seed carbon (1:3, 1:4, dan 1:5) dan adsorption time (30, 45, 60, 75, dan 90 minutes). The results indicate that the optimal conditions were achieved at a 1:5 ratio with a 90-minute adsorption time, resulting in an 84.74% reduction in COD. Characterization of the adsorbent using a *Scanning Electron Microscope* (SEM) revealed a porous dan uneven surface, which supports the adsorption process. Isotherm analysis indicated that the data best fit the Langmuir model with a correlation coefficient (R^2) of 0.986. These results demonstrate the significant potential of the *fly ash* dan salak seed carbon combination as a low-cost dan environmentally friendly adsorbent for domestic wastewater treatment.

Keywords: Adsorption, COD, *fly ash*, adsorption isotherm, salak seed carbon

1. PENDAHULUAN

Limbah cair domestik dari pusat aktivitas masyarakat seperti *mall*, hotel, atau apartemen mengdanung banyak senyawa organik yang berbahaya bagi lingkungan apabila dibuang langsung ke badan air. Salah satu parameter penting dalam menilai pencemaran air

Corresponding author: Mufid

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: mufidpolinema@gmail.com



oleh senyawa organik adalah *Chemical oxygen demand* (COD), yaitu jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik dalam air secara kimiawi. COD yang tinggi dapat menurunkan kadar oksigen terlarut di perairan, mempercepat eutrofikasi, serta mengganggu keseimbangan ekosistem [1].

Mall Dinoyo City merupakan pusat perbelanjaan yang menghasilkan limbah cair dengan kadar COD yang melampaui baku mutu menurut Permen LHK No. 68 Tahun 2016. Upaya penurunan COD menggunakan sistem IPAL yang tersedia dinilai belum maksimal, sehingga dibutuhkan alternatif pengolahan limbah cair yang lebih efektif dan ekonomis.

Salah satu metode yang banyak digunakan adalah adsorpsi, karena prosesnya sederhana, efisien, tidak menghasilkan produk samping berbahaya, dan dapat menggunakan bahan murah sebagai adsorben [2]. Beberapa penelitian sebelumnya telah memanfaatkan *fly ash* sebagai adsorben untuk menurunkan parameter pencemar seperti COD dan logam berat. *Fly ash* mampu menurunkan COD limbah hingga 76% melalui mekanisme penjerapan oleh permukaan silikat dan aluminatnya [3]. Selain itu, karbon aktif dari biji salak teraktivasi KOH memiliki struktur mikropori yang baik untuk menyerap senyawa organik dari limbah cair rumah tangga [4].

Selain itu, selama ini *fly ash* yang dianggap sebagai limbah B3 justru memiliki potensi sebagai bahan baku adsorben jika diolah dengan tepat. Pemanfaatan *fly ash* tidak hanya membantu mengurangi timbunan limbah industri, tetapi juga memberikan nilai tambah pada material yang sebelumnya tidak dimanfaatkan secara optimal [3]. Di sisi lain, biji salak merupakan limbah pertanian yang jumlahnya melimpah, terutama di daerah dengan produksi buah salak tinggi. Ketika biji salak dikarbonisasi dan diaktivasi, struktur mikropori dan luas permukaannya meningkat secara signifikan, menjadikannya bahan karbon aktif yang ekonomis dan ramah lingkungan [5].

Dengan mempertimbangkan karakteristik masing-masing bahan, pemanfaatan kombinasi *fly ash* dan karbon biji salak dalam proses adsorpsi menjadi pendekatan menarik untuk dieksplorasi lebih lanjut. Penggunaan dua jenis limbah padat ini sebagai adsorben yang diaktivasi dan dikombinasikan membuka kemungkinan peningkatan efisiensi penurunan COD, terutama bila dikaji pada variasi rasio massa dan waktu adsorpsi tertentu. Pendekatan *isotherm* adsorpsi seperti Langmuir dan Freundlich juga digunakan dalam penelitian ini untuk memahami lebih dalam mekanisme penyerapan yang terjadi antara permukaan adsorben dan senyawa COD dalam limbah cair.

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas kombinasi *fly ash* dan karbon biji salak terhadap penurunan COD dari limbah cair *Mall* Dinoyo City. Selain itu, penelitian ini bertujuan menentukan kondisi optimum adsorpsi serta mengetahui model *isotherm* yang paling sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan model eksperimen laboratorium kuantitatif. Tujuan utamanya adalah mengetahui pengaruh rasio massa adsorben dan waktu adsorpsi terhadap efisiensi penurunan COD. Data yang dikumpulkan merupakan data primer yang diperoleh melalui pengujian langsung terhadap limbah cair dari IPAL *Mall* Dinoyo City.

2.1. Persiapan Adsorben

Fly ash berukuran 100 mesh iaktivasi menggunakan larutan H_2SO_4 0,5 M selama 24 jam. Biji salak dikeringkan, kemudian dikarbonisasi pada suhu $400^\circ C$ selama 90 menit dan diaktivasi dengan KOH 25%. Karbon biji salak kemudian disaring hingga lolos ayakan 100 mesh dan dicampurkan dengan *fly ash* teraktivasi sesuai rasio massa yang ditentukan.

2.2. Parameter Eksperimen

Parameter eksperimen dalam penelitian ini terdiri dari dua parameter bebas, yaitu rasio massa adsorben dan waktu adsorpsi, serta satu parameter terikat, yaitu efisiensi penurunan COD. Rasio massa yang digunakan merupakan perbandingan antara massa *fly ash* dan karbon biji salak, dengan variasi 1:3, 1:4, dan 1:5. Sementara itu, waktu adsorpsi ditetapkan selama 60, 70, 80, dan 90 menit. Parameter terikat dalam penelitian ini adalah efisiensi penurunan COD, yang dihitung berdasarkan selisih antara konsentrasi COD awal dan konsentrasi COD setelah proses adsorpsi, menggunakan Persamaan (1):

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

Keterangan:

C_0 : konsentrasi COD awal (mg/L)

C_t : konsentrasi COD setelah proses adsorpsi (mg/L)

2.3. Prosedur Percobaan

Sebanyak 250 mL sampel limbah cair dimasukkan ke dalam gelas beaker yang telah berisi adsorben campuran *fly ash* dan karbon biji salak dengan rasio tertentu. Campuran diaduk menggunakan shaker dengan kecepatan 150 rpm selama waktu adsorpsi yang ditentukan. Setelah proses selesai, larutan disaring dan dianalisis kadar COD-nya.

2.4. Karakterisasi Adsorben

Adsorben diuji melalui beberapa parameter fisik dan kimia, yaitu kadar air, kadar abu, karbon terikat, daya serap iod, serta morfologi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk melihat tekstur dan porositas permukaan.

2.5. Analisis Isotherm Adsorpsi

Data hasil adsorpsi dianalisis menggunakan dua model *isotherm*, yaitu Langmuir dan Freundlich, untuk menentukan karakteristik mekanisme adsorpsi. Persamaan linear masing-masing model sebagai berikut [6]:

a. Isotherm Langmuir

Berikut merupakan rumus untuk perhitungan *isotherm* Langmuir yang ditulis pada Persamaan (2).

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m b C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (2)$$

Keterangan:

q_e : jumlah adsorbat pada kesetimbangan (mg/g)

q_m : kapasitas maksimum adsorpsi (mg/g)

b : konstanta adsorpsi (L/mg)

C_e : konsentrasi COD pada kesetimbangan (mg/L)

b. Isotherm Freundlich

Berikut merupakan rumus untuk perhitungan *isotherm* Langmuir yang ditulis pada Persamaan (3).

$$\log q_e = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

Keterangan:

q_e : jumlah adsorbat pada kesetimbangan (mg/g)

C_e : konsentrasi COD pada kesetimbangan (mg/L)

q_m : kapasitas maksimum adsorpsi (mg/g)

k : konstanta adsorpsi (mg/g)

Model terbaik ditentukan berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2) hasil regresi linier dari masing-masing persamaan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Efisiensi Penurunan COD pada Berbagai Rasio dan Waktu Kontak

Berikut meruokan data dari efisiensi penurunan % COD pada berbagai rasio dan waktu kontak yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Efisiensi Penurunan COD

Rasio Massa	Waktu Adsorpsi (menit)	COD (mg/L)	Efisiensi Penurunan (%)
Sebelum adsorpsi	0	460	-
1:4	60	100	78,26
	70	120	73,91
	80	80	82,60
	90	60	86,95
1:5	60	120	73,91
	70	100	78,26
	80	80	82,60
	90	60	86,95
1:6	60	100	78,26
	70	80	82,60
	80	140	69,56
	90	40	91,30

Berdasarkan data hasil pengujian kadar COD pada Tabel 1, ditunjukkan bahwa variasi rasio massa adsorben dan waktu adsorpsi berpengaruh signifikan terhadap efisiensi penurunan COD. Semakin besar rasio massa adsorben dan semakin lama waktu adsorpsi, efisiensi penurunan COD cenderung meningkat hingga mencapai titik optimum. COD awal limbah cair *Mall* Dinoyo City adalah sebesar 426 mg/L.

Efisiensi penurunan COD meningkat secara signifikan seiring bertambahnya waktu kontak pada seluruh rasio adsorben. Pada rasio massa 1:4, efisiensi meningkat dari 78,26% (60 menit) menjadi 86,95% (90 menit). Rasio massa 1:5 mengalami kenaikan dari 73,91% hingga 84,95%, sementara rasio massa 1:6 mencatat nilai tertinggi, yaitu 91,30% pada 90 menit. Peningkatan ini menunjukkan bahwa waktu kontak yang lebih lama memungkinkan proses adsorpsi berlangsung lebih optimal karena molekul COD memiliki cukup waktu untuk mencapai dan menempati situs aktif adsorben [7].

Rasio massa 1:6 memang menunjukkan efisiensi tertinggi, namun karakteristik adsorben setelah adsorpsi mengalami penurunan cukup signifikan, terutama pada kadar karbon terikat dan daya serap iod. Hal ini dapat disebabkan oleh saturasi pori atau kerusakan struktur karbon aktif akibat beban adsorbat yang tinggi (Mirdanha, 2016). Selain itu, hasil SEM menunjukkan adanya penurunan kerapatan pori dan permukaan aktif pada rasio ini.

Sementara itu, rasio massa 1:5 menunjukkan kinerja paling stabil baik dari sisi efisiensi penurunan COD maupun kestabilan karakter fisik adsorben. Karbon terikat tetap tinggi, daya serap iod memenuhi standar (>750 mg/g), dan struktur permukaan adsorben tetap mendukung proses adsorpsi [8]. Keunggulan ini juga diperkuat dengan kesesuaian

model adsorpsi terhadap model *isotherm* Freundlich, yang menunjukkan nilai R^2 tertinggi dan merepresentasikan karakter adsorpsi multilayer pada permukaan heterogen [9].

Dengan mempertimbangkan aspek efisiensi, struktur fisik, dan kecocokan terhadap model teoritis, maka rasio massa 1:5 dan waktu kontak 90 menit ditetapkan sebagai kondisi optimum dalam proses penurunan COD limbah cair domestik pada penelitian ini.

3.2. Karakteristik Adsorben

Karakteristik adsorben dilihat dari beberapa parameter seperti kadar air, kadar abu, kadar karbon terikat, dan daya serap iod yang disajikan pada Tabel 2.

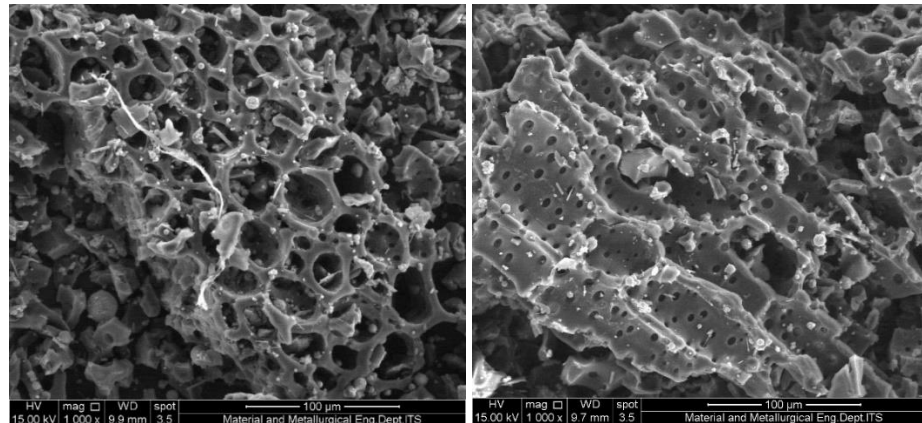
Tabel 2. Hasil analisis karakteristik adsorben

Rasio Massa	Waktu Adsorpsi (menit)	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Kadar Karbon Terikat (%)	Daya Serap Iod (mg/g)
1 : 4	Sebelum adsorpsi	3,09	22,00	42,50	1443,49
	60	2,98	16,00	36,50	1205,55
	70	6,96	15,50	40,50	1116,72
	80	2,48	17,50	41,50	1205,55
	90	7,96	17,50	40,50	1142,10
1 : 5	Sebelum adsorpsi	6,20	19,50	39,50	1154,79
	60	4,00	14,00	39,50	1142,10
	70	4,00	15,00	35,00	1129,41
	80	5,50	17,50	42,00	1078,65
	90	4,50	18,50	39,50	1104,03
1 : 6	Sebelum adsorpsi	3,28	23,50	47,50	1180,17
	60	7,00	15,00	39,00	1078,65
	70	7,50	16,00	38,50	1154,79
	80	2,50	18,50	32,00	1065,96
	90	3,00	27,00	28,50	1040,58

Dari hasil analisis karakteristik adsorben pada Tabel 2, rasio massa 1:4 sebelum adsorpsi memiliki kadar air paling rendah (2,48%) dan kadar karbon terikat tertinggi (41,50%) dibandingkan perlakuan lainnya. Namun, nilai daya serap iod pada adsorben rasio 1:4 justru menurun signifikan setelah proses adsorpsi, dari 1443,49 mg/g menjadi hanya 1142,16 mg/g pada waktu kontak 90 menit. Hal ini menunjukkan penurunan kapasitas adsorpsi setelah situs aktif terisi oleh molekul COD.

Sebaliknya, rasio massa 1:5 menunjukkan performa paling stabil. Kadar air dan abu relatif rendah, berkisar 4,00–5,50% dan 15,00–18,50%. Karbon terikat tertinggi berada pada nilai 42,00% (pada menit ke-80), dan daya serap iod sebelum adsorpsi adalah 1154,79 mg/g. Setelah adsorpsi, nilainya menurun secara bertahap hingga 1068,30 mg/g, namun penurunannya lebih kecil dibandingkan rasio 1:4 dan 1:6, mendandakan bahwa adsorben rasio 1:5 memiliki struktur pori yang lebih tahan terhadap saturasi.

Pada rasio massa 1:6, terjadi penurunan yang lebih drastis, terutama pada karbon terikat dan daya serap iod. Nilai karbon terikat hanya 28,50% pada menit ke-90, dan daya serap iod turun menjadi 1040,58 mg/g, yang terendah di antara ketiga rasio. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh pembentukan agregat pada massa adsorben yang lebih tinggi, yang menutupi sebagian besar pori aktif dan menghambat interaksi dengan polutan [10].



Gambar 1. Morfologi adsorben setelah diaktivasi

Pada Gambar 1 ditunjukkan mengenai gambaran morfologi permukaan adsorben sebelum digunakan. (hasil SEM pada rasio massa 1:5). Terlihat bahwa adsorben memiliki struktur permukaan yang tidak rata, penuh retakan mikro, dan terdapat banyak pori berukuran kecil hingga sedang. Permukaan tersebut memberikan area yang luas bagi adsorpsi molekul COD. Morfologi berpori seperti ini penting untuk mendukung adsorpsi fisik, khususnya pada adsorben karbon aktif hasil aktivasi kimia [11].

Selain itu, hasil aktivasi menggunakan KOH untuk arang biji salak dan H₂SO₄ untuk *fly ash* memberikan dampak signifikan pada pembentukan gugus fungsional polar. Gugus ini meningkatkan afinitas terhadap senyawa COD yang bersifat polar-hidrofilik. Keberadaan gugus seperti -OH, -COOH, atau -SO₃H memperkuat interaksi adsorbat dengan permukaan, baik melalui gaya van der Waals maupun ikatan hidrogen [12]. Aktivasi juga berperan dalam membuka pori mikro dan memperluas luas permukaan efektif adsorben.

Dengan mempertimbangkan stabilitas nilai karbon terikat, daya serap iod, dan karakter morfologi yang optimal, adsorben dengan rasio massa 1:5 terbukti paling unggul dalam menunjang proses penurunan COD secara efisien dan konsisten dalam rentang waktu kontak 60–90 menit.

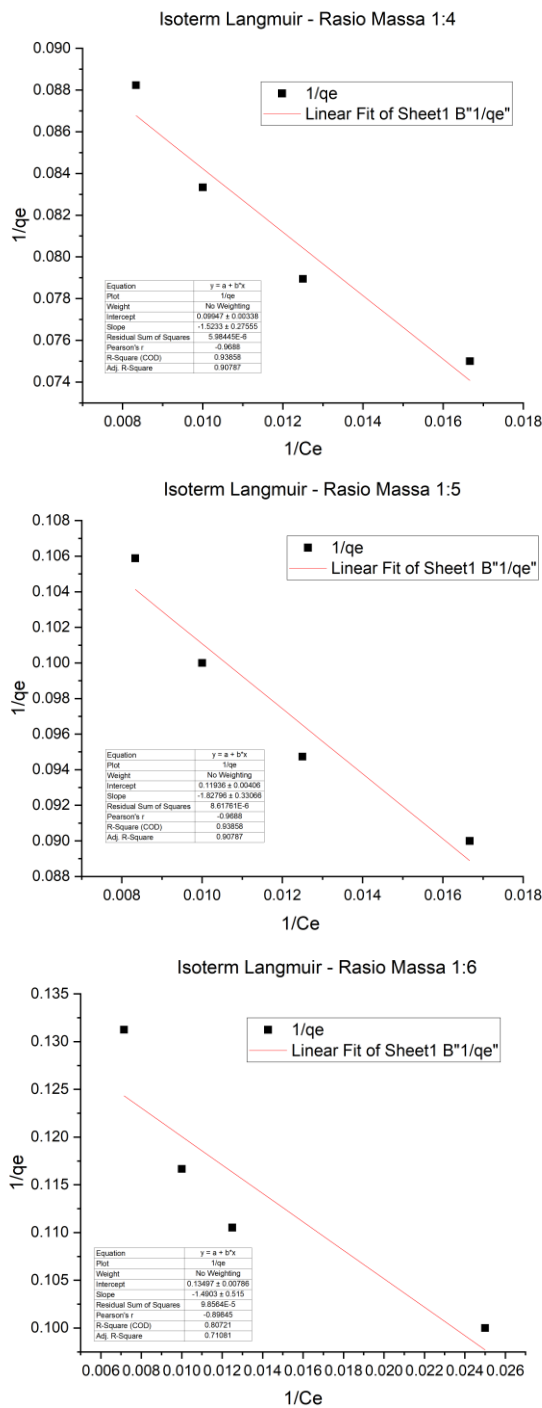
3.3. Analisis *Isotherm* Adsorpsi

Data hasil percobaan diolah dengan pendekatan *isotherm* Langmuir dan Freundlich yang hasil perhitungannya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan *isotherm* adsorpsi

Rasio Massa	<i>Isotherm</i> Langmuir			<i>Isotherm</i> Freundlich		
	q _m (mg/g)	K _L (L/mg)	R ²	1/n	K _f (L/mg)	R ²
1:4	10,053	-0,065	0,938	-0,232	34,733	0,984
1:5	8,378	-0,065	0,938	-0,232	28,944	0,984
1:6	7,409	-0,090	0,807	-0,207	21,889	0,942

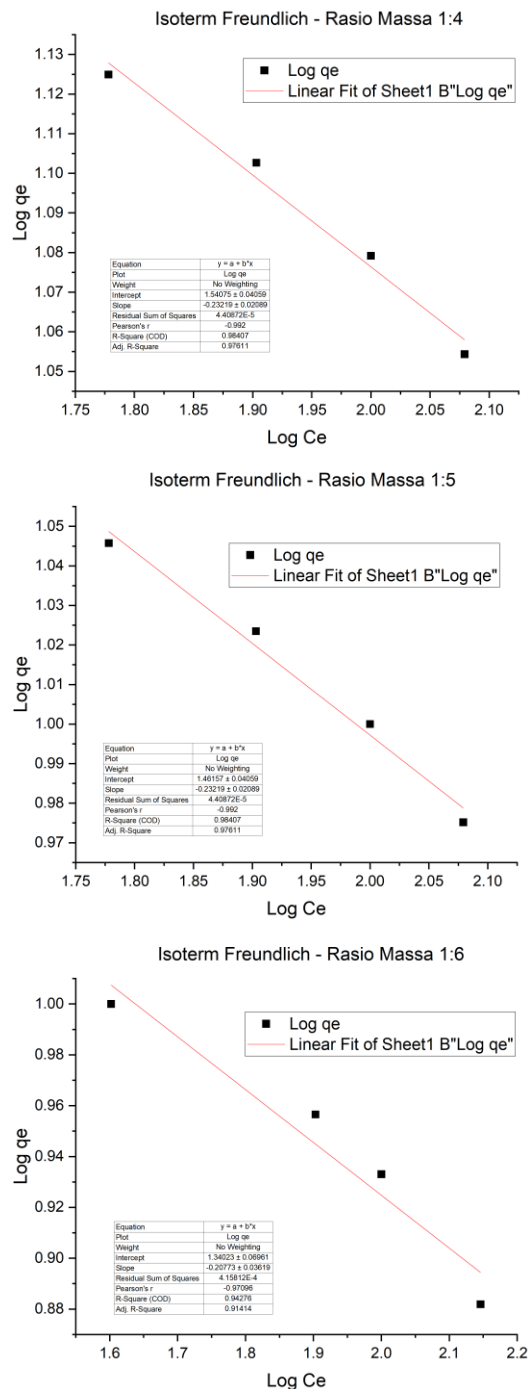
Analisis *isotherm* pada penelitian ini menggunakan dua pendekatan utama, yakni model Langmuir dan Freundlich, untuk mengevaluasi kinerja kombinasi adsorben *fly ash* dan karbon aktif biji salak dalam menurunkan kandungan COD dari limbah cair domestik Mall Dinoyo City. Data hasil perhitungan *isotherm* adsorpsi kemudian diolah dan disajikan dalam grafik pada Gambar 2 dan Gambar 3 yang dibuat menggunakan *software* OriginLab.



Gambar 2. Isotherm adsorpsi langmuir

Berdasarkan Gambar 2, model isoterm adsorpsi dengan model Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi berlangsung pada permukaan adsorben yang homogen dengan pembentukan satu lapisan molekul adsorbat (monolayer), tanpa interaksi antar molekul. Parameter utama yang diperoleh meliputi kapasitas adsorpsi maksimum (q_m) dan konstanta Langmuir (KL) [13]. Dalam penelitian ini, nilai q_m tertinggi diperoleh pada rasio massa 1:4 sebesar 10,053 mg/g, dan mengalami penurunan seiring peningkatan proporsi karbon aktif biji salak pada rasio 1:5 dan 1:6. Namun, nilai KL untuk seluruh rasio menunjukkan angka negatif, yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi tidak sepenuhnya sesuai dengan mekanisme Langmuir ideal. Nilai koefisien determinasi (R^2) pada model ini

berkisar 0,807–0,938, mendanakan kecocokan sedang hingga cukup baik, tetapi belum optimal.



Gambar 3. Isotherm adsorpsi freundlich

Sementara itu, pada Gambar 3, *isotherm* adsorpsi model Freundlich mengakomodasi kondisi permukaan adsorben yang heterogen dan memungkinkan pembentukan lapisan adsorpsi lebih dari satu (multilayer). Parameter utama dalam model ini adalah Kf (kapasitas adsorpsi relatif) dan 1/n (intensitas adsorpsi) [13]. Nilai Kf tertinggi tercatat pada rasio 1:4 sebesar 34,733 L/mg, diikuti oleh rasio 1:5 (28,944 L/mg), dan 1:6 (21,889 L/mg). Seluruh nilai 1/n yang negatif mengindikasikan bahwa energi adsorpsi menurun

seiring bertambahnya konsentrasi adsorbat, yang umum terjadi pada sistem dengan karakteristik permukaan kompleks [14].

Nilai koefisien determinasi (R^2) model Freundlich mencapai 0,984 untuk rasio 1:4 dan 1:5, serta 0,942 pada rasio 1:6. Hal ini menunjukkan bahwa model Freundlich lebih merepresentasikan data eksperimen dibandingkan model Langmuir. Kecenderungan ini konsisten dengan hasil karakterisasi adsorben yang menunjukkan distribusi ukuran pori dan gugus aktif yang tidak seragam akibat proses aktivasi kimia [15].

Struktur heterogen yang terbentuk dari kombinasi *fly ash* dan karbon aktif biji salak memungkinkan terbentuknya berbagai site adsorpsi dengan energi berbeda. Hal ini mendukung mekanisme adsorpsi multilapis seperti dijelaskan dalam model Freundlich. Hasil SEM juga memperlihatkan permukaan berpori dan tidak seragam, yang menjadi indikasi kuat bahwa sistem ini tidak sesuai dengan asumsi permukaan homogen seperti pada model Langmuir [9].

Selain itu, dinamika adsorpsi dan desorpsi yang terjadi selama waktu kontak tertentu yang tercermin dari fluktuasi penurunan konsentrasi COD menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi dalam penelitian ini bersifat kompleks. Hal ini diperkuat oleh penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa kombinasi dua jenis adsorben dengan karakteristik berbeda cenderung menunjukkan fenomena adsorpsi dinamis, yang hanya dapat dijelaskan secara akurat oleh model Freundlich [9].

Dengan demikian, model Freundlich merupakan representasi paling tepat untuk menggambarkan mekanisme adsorpsi COD oleh kombinasi *fly ash* dan karbon aktif biji salak, baik secara statistik (R^2) maupun secara substansial terhadap karakter permukaan adsorben dan dinamika adsorpsi yang terjadi.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kombinasi adsorben *fly ash* dan karbon aktif biji salak efektif menurunkan kadar COD limbah cair domestik. Variasi terbaik diperoleh pada rasio 1:5 dan waktu kontak 90 menit, dengan efisiensi penurunan COD mencapai 84,78% dan konsentrasi akhir 70 mg/L, sesuai baku mutu. Adsorben rasio 1:5 memiliki karakteristik fisik terbaik, ditandai dengan kadar air rendah, karbon terikat tinggi, dan daya serap iod di atas standar. Hasil SEM menunjukkan struktur permukaan berpori yang mendukung adsorpsi. Model *isotherm* Freundlich paling sesuai menggambarkan mekanisme adsorpsi, dengan nilai R^2 tertinggi (0,984).

Melihat potensi yang ditunjukkan, penggunaan adsorben ini masih dapat dikaji lebih dalam, terutama terkait efektivitasnya terhadap jenis polutan lain, kemungkinan untuk digunakan kembali, serta penerapannya pada skala yang lebih luas dan berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] M. Mualim, J. Jubaidi, dan K. Krisdiyanta, "Pengolahan Limbah Cair Domestik Dengan Menggunakan Metode Biofilter Anaerob – Aerob," *Mitra Raflesia (Journal of Health Science)*, vol. 15, no. 2, hal. 73, 2023.
- [2] V. F. Falah dan R. Apriani, "Pemanfaatan Fly Ash Sebagai Material Adsorben Untuk Menurunkan Kandungan Logam Pada Limbah Cair Industri Pulp dan Kertas," *Jurnal Tugas Akhir*, Institut Teknologi Sains Bandung, 2021.
- [3] L. B. Dima, "Pemanfaatan Limbah Padat Fly Ash Sebagai Adsorben Limbah Cair Pewarna Tenun Ikat," Program Studi Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana Kupang, 2021.
- [4] F. Prihardani, N. M. Sari, dan N. W. Triana, "Pembuatan Tablet Arang Aktif dari Biji

- Salak dengan Proses Karbonisasi,” *Seminar Nasional Teknik Kimia Soebardjo Brothohardjono XIX*, hal. 110–118, 2023.
- [5] R. A. S. Lestari, R. Firyanto, dan H. Sitompul, “Uji Daya Adsorpsi Adsorben Arang Biji Salak Untuk Menjerap Methylen Blue,” *Inovasi Teknik Kimia*, vol. 11, no. 2, hal. 99–103, 2024.
- [6] X. Chen, “Modeling of Experimental Adsorption Isotherm Data,” *Information (Switzerland)*, vol. 6, no. 1, hal. 14–22, 2015.
- [7] D. Lita, “Penyisihan Logam Cu (II) Dari Larutan Dengan Fly Ash Batu Bara,” *Neo Teknika: Jurnal Ilmiah Teknologi*, vol. 4, 2018.
- [8] D. A. Pujiasih, N. Nurhasanah, dan M. Nurhanisa, “Pengaruh Penambahan Karbon Aktif Biji Salak (*Salacca Edulis*) Pada Sistem Filtrasi Air Gambut,” *Prisma Fisika*, vol. 7, no. 3, hal. 275, 2020.
- [9] M. A. Afdany, “Studi Isotherm Adsorpsi Cu(II) Dalam Larutan Menggunakan Zeolit Teraktivasi,” *Jurnal Teknologi Kimia Mineral*, vol. Vol 3 No 1, 2024.
- [10] A. Mirdanha, “Efektivitas Limbah Media Tumbuh Jamur (*Baglog*) Dengan Enkapsulasi Alginate Gel Dalam Mengadsorpsi Ion Logam Kadmium,” Universitas Islam Indonesia, 2016.
- [11] R. Apriani, I. Diah Faryuni, dan D. Wahyuni, “Pengaruh Konsentrasi Aktivator Kalium Hidroksida (Koh) Terhadap Kualitas Karbon Aktif Kulit,” *Prisma Fisika*, vol. 1, no. 2, hal. 82–86, 2013.
- [12] A. Al-Gheethi, M. Mohd Salleh, dan E. Noman, “Cephalexin Adsorption by Acidic Pretreated Jackfruit Adsorbent: A Deep Learning Prediction Model Study,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, 2022.
- [13] N. S. S. Miri dan Narimo, “Review : Kajian Persamaan Isotherm Langmuir Dan Freundlich Pada Adsorpsi Logam Berat Fe (li) Dengan Zeolit Dan Karbon Aktif Dari Biomassa,” *Jurnal Kimia dan Rekayasa*, vol. 2, no. 2, hal. 58–71, 2022.
- [14] D. P. Putri, S. A. Wahida, dan Marlinda, “Pemanfaatan Kulit Pisang Kepok (*Musa Paradisiaca L.*) Sebagai Adsorben Untuk Menurunkan Kadar Cod (Chemical Oxygen Demdan) Pada Air Limbah Laundry,” *Jurnal Informasi, Sains dan Teknologi*, vol. 5, no. 02, hal. 71–77, 2022.
- [15] C. N. Sawyer, L. Perry, M. Carty, dan F. P. Gene, *Chemistry for Environmental Engineering dan Science*, 5th ed. New York: McGrawHill, 1994.