



## PERFORMANCE EVALUATION AND ADSORPTION ISOTHERM OF ACTIVATED BOTTOM ASH FOR FREE FATTY ACID REMOVAL

Novellia Ardiansyah, Anggia Afza Utami, Amelia Amir\* dan Maria Ulfah  
Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta,  
Jalan Gajah Mada No. 19 Olo Nanggalo, Padang, 25143, Indonesia.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 26 Apr 2025,

Revised 16 Aug 2025,

Accepted 25 Aug 2025,

Available online 30 Aug 2025

#### Keywords:

- ✓ Activated Bottom Ash;
- ✓ Adsorption;
- ✓ Adsorbent Performance;
- ✓ Free Fatty Acid;
- ✓ Isotherm Model

#### \*corresponding author:

[amelia.amir@bunghatta.ac.id](mailto:amelia.amir@bunghatta.ac.id)

Phone: +6285264459592

[https://doi.org/10.31938/jsn.v](https://doi.org/10.31938/jsn.v15i3.843)

[15i3.843](https://doi.org/10.31938/jsn.v15i3.843)

### ABSTRACT

Boiler bottom ash is one of the by-products produced from the combustion of palm shells and fiber in the boiler furnace at high temperature. These were usually disposed of on the land around the palm mill, causing environmental problems. In this research, non-activated and activated bottom ash treated with phosphoric acid were used as an adsorbent for removing free fatty acids (FFA) from crude palm oil (CPO) recovery. This study had two parameters. The first parameter is an adsorbent activator concentration with the variation level of 0, 5, 10, and 15 %. The second parameter is contact time with four levels involved in this research. They were 1, 2, 3, and 4 hours. The bottom ash adsorbent with a 10% concentration of phosphoric acid and a 3-hour contact time had the highest efficiency and capacity in removing FFAs from CPO recovery. The lowering of water and impurity content in CPO recovery after the adsorption process was in the range of 0.05% to 0.22% and 0.01% to 0.04%, respectively. The isotherm model was evaluated using the Langmuir and the Freundlich. The Isotherm model was fitted to the Freundlich, and this indicated multilayer adsorption with  $R^2 = 0.9869$ .

### ABSTRAK

#### Evaluasi Kinerja dan Isotherm Adsorpsi dari Bottom Ash Teraktivasi untuk Penghilangan Asam Lemak Bebas

Bottom ash boiler merupakan salah satu produk samping dari pembakaran cangkang dan fiber kelapa sawit di dalam tungku boiler pada suhu tinggi. Bottom ash boiler ini biasanya lebih cenderung dibuang ke lahan sekitar pabrik dan menimbulkan permasalahan lingkungan. Pada penelitian ini, bottom ash tanpa aktivasi dan teraktivasi asam fosfat telah digunakan sebagai adsorben untuk penghilangan asam lemak bebas (ALB) dari CPO recovery. Dua parameter yang ditentukan pada penelitian ini yaitu parameter pertama yaitu dosis asam fosfat sebagai aktivator adsorben dengan variasi 0, 5, 10, dan 15%, parameter kedua adalah waktu kontak dengan empat level yaitu 1, 2, 3, dan 4 jam. Adsorben bottom ash yang diaktivasi dengan 10% konsentrasi asam fosfat dan 3 jam waktu kontak memiliki kapasitas dan efisiensi paling tinggi dalam penghilangan ALB dari CPO recovery. Penurunan kadar air dan pengotor setelah proses adsorpsi secara berurutan berada pada rentang 0,05- 0,22% dan 0,01-0,04%. Model isotherm dievaluasi menggunakan isotherm Langmuir dan Freundlich. Hasil evaluasi menunjukkan kesesuaian dengan Isotherm Freundlich yang mengindikasikan adsorpsi multilayer dengan nilai  $R^2 = 0.9869$ .

Kata kunci: Adsorpsi; Asam Lemak Bebas; Bottom Ash Teraktivasi; Kinerja Adsorben; Model Isotherm

### PENDAHULUAN

Indonesia saat ini dikenal sebagai negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia, dengan luas area perkebunan yang menempatkannya pada posisi nomor satu di Asia. Data terbaru menunjukkan bahwa pada tahun 2023, luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mengalami peningkatan signifikan dibandingkan tahun 2021. Peningkatan tersebut mencapai total area sebesar

19.304.000 hektar. Sebagian besar hasil dari perkebunan kelapa sawit di Indonesia diproses menjadi minyak sawit mentah, atau *Crude Palm Oil* (CPO) (Nirmala et al., 2024). Produksi CPO di Indonesia pada Juni 2024 mencapai 3.691 ton dengan total konsumsi untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri sebesar 1.943 ton dan kebutuhan ekspor sebanyak 3.385 ton yang mengalami kenaikan dari bulan sebelumnya sebesar 58,02% (GAPKI, 2024). Peningkatan



kebutuhan CPO per tahun disebabkan oleh banyaknya variasi produk turunan yang dapat dihasilkan seperti minyak goreng, coklat, kosmetik, dan biodiesel. Hal inilah yang menyebabkan CPO menjadi salah satu komoditi unggulan ekspor Indonesia setiap tahun (Syahwandi et al., 2019). Kebutuhan CPO di Indonesia yang tinggi menjadikan produsen CPO dituntut meningkatkan kapasitas produksi dan juga kualitasnya.

Kualitas CPO dapat dinilai dari kemurnian dan karakteristik fisikokimianya. Tingkat kemurnian berarti minyak tidak boleh terkontaminasi atau dicampur dengan minyak nabati lainnya. Sedangkan, karakteristik fisikokimianya ditentukan dengan beberapa parameter yaitu kandungan asam lemak bebas (ALB), kadar air, dan kadar kotoran dalam CPO (Lengke et al., 2024). Kadar ALB yang tinggi dari CPO dapat menurunkan kualitas dan nilai jualnya, karena angka ALB yang tinggi dapat menimbulkan ketengikan, perubahan rasa, dan warna pada CPO (Simatupang et al., 2020). ALB dalam CPO terbentuk dari reaksi hidrolisis triasilgliserol (TAG) yang dikatalisis oleh enzim lipase yang terdapat dalam mesokarp atau daging buah sawit. Kadar ALB dalam CPO harus menjadi perhatian bagi produsen karena berkaitan dengan kualitas CPO tersebut (Tan et al., 2023). Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menurunkan kadar ALB pada CPO. Adsorpsi menjadi metode yang paling sering digunakan untuk menurunkan kadar ALB pada CPO (Syahwandi et al., 2019).

Metode adsorpsi dalam menurunkan kadar ALB menggunakan berbagai jenis adsorben diantaranya abu tandan kosong sawit, zeolit, arang sekam padi, kulit ubi kayu, dan abu boiler. Studi menunjukkan bahwa abu boiler kelapa sawit memiliki potensi besar sebagai adsorben dalam peningkatan mutu CPO. Abu boiler dihasilkan dari pembakaran cangkang dan *fiber* kelapa sawit dalam tungku boiler pada suhu tinggi. Abu boiler ini terdiri dari *fly ash* dan *bottom ash* boiler. Kinerja abu boiler akan lebih efektif jika telah melalui proses aktivasi sebelum dikontakkan dengan CPO, meskipun berpotensi meningkatkan kadar kotoran (Ifa et al., 2018; Syahwandi et al., 2019; Rangkuti et al., 2021; Phetrungnapha et al., 2023; Nurdiansyah et al., 2025). Beberapa jenis aktivator kimia yang biasa digunakan dalam mengaktivasi beragam adsorben diantaranya KOH (Wang et al., 2022; Jedynek et al., 2024), HCl (Pamungkas et al., 2022; Khairiah et al., 2023), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Hasyim et al., 2019), dan H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (Castro et al., 2024; Yuliusman et al., 2021).

Asam fosfat menjadi salah satu aktivator kimia yang sangat potensial dalam memperluas pori, meningkatkan jumlah porositas serta luas permukaan adsorben berbasis karbon, sehingga kinerja adsorpsinya meningkat (Alhawtali et al., 2023; Basu et al., 2018; Neme et al., 2022). Castro et al. (2024) melaporkan bahwa abu boiler mengalami kenaikan luas permukaan secara signifikan setelah diaktivasi dengan asam fosfat.

Pemanfaatan *bottom ash* boiler sebagai adsorben dapat meningkatkan nilai guna dan mengurangi limbah industri, sehingga memberikan solusi berkelanjutan bagi pengelolaan limbah kelapa sawit. Selama ini, *bottom ash* boiler belum dikelola secara maksimal dan menjadi limbah yang memberikan dampak negatif bagi lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan model isoterm adsorpsi *bottom ash* boiler teraktivasi dari pabrik kelapa sawit dalam meningkatkan mutu CPO *recovery*. Pada penelitian ini juga dianalisis pengaruh konsentrasi aktivator dari adsorben *bottom ash* boiler serta waktu kontak pada proses adsorpsi terhadap peningkatan mutu CPO setelah adsorpsi.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan dan Alat

Bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya CPO *recovery* dan *bottom ash* boiler diperoleh dari PT. Perkebunan Nusantara PKS Sei. Galuh, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 85% (Merck), NaOH *pellet* (Merck), *n*-heksana, kertas saring, alat-alat gelas, dan pH-meter.

### Metode

#### *Aktivasi Bottom Ash Boiler*

*Bottom ash* boiler dihaluskan hingga 150 mesh dan diaktivasi menggunakan larutan H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> dengan variasi konsentrasi 5, 10 dan 15% selama 48 jam. Setelah itu, larutan tersebut dicuci dengan akuades hingga pH 7 dan dikeringkan dalam oven selama 2 jam pada 110 °C.

#### *Adsorpsi ALB dalam CPO Recovery*

Adsorben *bottom ash* boiler yang belum dan sudah diaktivasi masing-masing sebanyak 0,5 g ditambahkan ke dalam 100 mL CPO *recovery* dengan variasi waktu 1, 2, 3 dan 4 jam. Setelah itu, CPO *recovery* yang telah diadsorpsi tersebut dipisahkan dengan adsorben dan dianalisis.

### Penentuan kadar asam lemak bebas dalam CPO Recovery sebelum dan setelah adsorpsi

Penetapan kadar asam lemak bebas berdasarkan SNI 01-2901-2006. Kadar asam lemak bebas dihitung sebagai presentase berat dari asam lemak bebas yang terkandung dalam CPO Recovery. Berat molekul asam lemak bebas tersebut dianggap sebesar 25,6 (sebagai asam palmitat). Sampel CPO Recovery sebanyak  $\pm 3$  g dengan suhu  $60^{\circ}\text{C}$  dilarutkan dalam 50 mL isopropil alkohol 95%. Selanjutnya sampel dikondisikan pada suhu  $40^{\circ}\text{C}$ . Sampel di dalam Erlenmeyer ditambahkan indikator fenolftalein dan dititrasi dengan larutan NaOH 0,1 N sampai terjadi perubahan warna menjadi merah muda. Kadar asam lemak bebas dihitung berdasarkan persamaan (1):

$$\text{Kadar Asam Lemak Bebas} = \frac{V \times N \times 25,6}{w} \quad (1)$$

Keterangan :

V : Volume larutan titrasi yang digunakan (ml)

N : Normalitas larutan titrasi (N)

W : Berat sampel (g)

### Penentuan kadar air dalam CPO Recovery sebelum dan setelah adsorpsi sesuai SNI 01-2901-2006

Kadar air dihitung sebagai berat yang hilang setelah sejumlah tertentu sampel dipanaskan pada  $103^{\circ}\text{C}$  selama 30 menit. Wadah yang akan digunakan sebagai tempat sampel dikeringkan di dalam oven pada  $103^{\circ}\text{C}$  selama 15 menit untuk memastikan wadah dalam keadaan kering. Ke dalam wadah tersebut dimasukkan 5 gram sampel CPO recovery dan dipanaskan di dalam oven pada suhu  $103^{\circ}\text{C}$  selama 30 menit. Setelah selesai dipanaskan, wadah yang berisi sampel dimasukkan ke dalam desikator untuk didinginkan dan selanjutnya ditimbang beratnya. Langkah- langkah ini diulang hingga selisih antara penimbangan 2 kali berturut – turut tidak melebihi 0,02% dari berat sampel. Kadar air dihitung berdasarkan persamaan (2):

$$\text{Kadar Air} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_3} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan :

$W_1$  : Berat cawan porselen + sampel sebelum dipanaskan (g)

$W_2$  : Berat cawan porselen + sampel setelah dipanaskan (g)

$W_3$  : Berat cawan porselen kosong (g)

### Penentuan kadar kotoran dalam CPO Recovery sebelum dan setelah diadsorpsi sesuai SNI 01-2901-2006

Kadar kotoran dihitung sebagai bahan dalam minyak sawit mentah yang tidak larut dalam *n*-heksana. Sampel sejumlah tertentu dikeringkan pada suhu  $103^{\circ}\text{C}$  selama 30 menit. Sampel tersebut didinginkan dalam desikator selama 15 menit. Pelarut *n*-heksana sebanyak 50 mL ditambahkan ke dalam wadah sampel dan diaduk hingga minyak larut. Setelah itu, larutan dilakukan penyaringan dan diikuti dengan pencucian beberapa kali. Media penyaring dengan seluruh isinya dikeringkan dalam oven pada suhu  $103^{\circ}\text{C}$  selama 30 menit, lalu didinginkan dalam desikator dan ditimbang beratnya. Kadar kotoran dihitung berdasarkan persamaan (3):

$$\text{Kadar Kotoran} = \frac{W_1 - W_2}{W} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

$W_1$  : Berat kertas saring dan sisa tidak larut sebelum dioven (g)

$W_2$  : Berat kertas saring dan sisa tidak larut setelah dioven (g)

W : Berat sampel CPO (g)

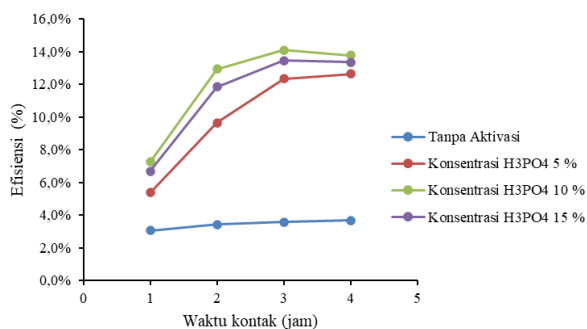
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hubungan Konsentrasi Aktivator dan Waktu Kontak terhadap Efisiensi serta Kapasitas Adsorpsi Asam Lemak Bebas dari CPO Recovery

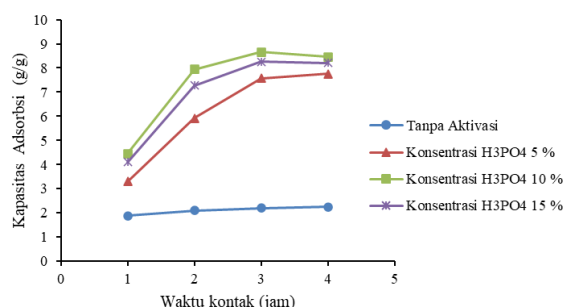
Penentuan efisiensi dan kapasitas adsorpsi telah dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi  $\text{H}_3\text{PO}_4$  sebagai aktivator adsorben *bottom ash* boiler dan waktu kontak proses adsorpsi ALB dalam sampel CPO recovery. Variasi waktu kontak bertujuan untuk menentukan waktu optimum yang dibutuhkan adsorben *bottom ash* boiler untuk dapat mengadsorpsi ALB dalam sampel CPO recovery. Data hasil penentuan efisiensi dan kapasitas adsorpsi adsorben *bottom ash* boiler dapat diamati pada *Figure 1* dan *2*.

*Figure 1* dan *2* memperlihatkan bahwa adsorben *bottom ash* boiler teraktivasi  $\text{H}_3\text{PO}_4$  cenderung memiliki efisiensi dan kapasitas adsorpsi terhadap ALB yang lebih tinggi dibandingkan dengan tidak teraktivasi. Hal ini menunjukkan bahwa area aktif pada permukaan adsorben menjadi lebih luas setelah mengalami

aktivasi dengan  $H_3PO_4$ , dan ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilaporkan Alhawli et al. (2022). Efisiensi dan kapasitas adsorpsi mengalami peningkatan seiring semakin lamanya waktu kontak adsorpsi hingga mencapai waktu tertentu. Kenaikan efisiensi dan kapasitas adsorpsi diamati relatif tinggi pada tahap awal adsorpsi hingga mencapai waktu kontak 3 jam dan perlahan mengalami penurunan. Tingginya adsorpsi ALB pada awal proses adsorpsi disebabkan masih banyaknya tersedia area aktif dari adsorben, dan akan melambat hingga permukaan adsorben mengalami kejenuhan dan berada dalam kesetimbangan. Ketika adsorben telah mencapai kejenuhan, proses adsorpsi akan berubah menjadi desorpsi. Pada proses desorpsi, adsorbat yang teradsorpsi pada area aktif adsorben terlepas dan kembali ke dalam larutan menjadi zat pengotor yang mengakibatkan kapasitas dan efisiensi adsorpsi semakin menurun (Rupilu et al., 2024).



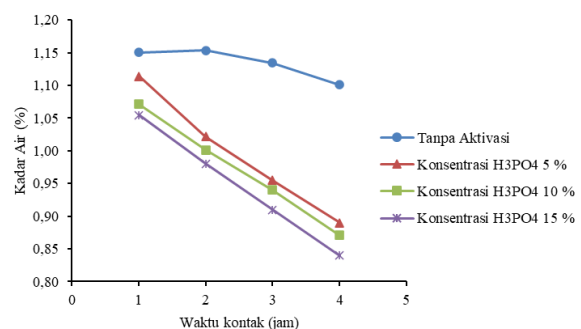
**Figure 1.** Relationship between Contact Time and ALB Adsorption Efficiency in CPO Recovery, comparing Phosphoric Acid-activated and Non-activated Bottom Ash Boiler Adsorbents



**Figure 2.** Relationship between Contact Time and ALB Adsorption Capacity in CPO Recovery, comparing Phosphoric Acid-activated and Non-activated Bottom Ash Boiler Adsorbents

Adsorben *bottom ash* boiler yang diaktivasi  $H_3PO_4$  10% dengan lama waktu kontak 3 jam memiliki efisiensi dan kapasitas adsorpsi paling tinggi dibandingkan yang diaktivasi  $H_3PO_4$  5% atau 15%. Nilai efisiensi dan kapasitas adsorpsinya yaitu 8,66 g/g dan 14,10% secara berurutan. Hal ini menunjukkan bahwa proses aktivasi meningkatkan kapasitas adsorpsi hingga konsentrasi optimum tertentu. Pada konsentrasi aktivator  $H_3PO_4$  15% dengan waktu kontak 3 jam terjadi penurunan nilai efisiensi dan kapasitas adsorpsi menjadi 13,78% dan 8,2 g/g secara berurutan. Konsentrasi  $H_3PO_4$  sebagai aktivator mempengaruhi peningkatan jumlah, ukuran pori serta luas permukaan adsorben. Pada konsentrasi yang relatif tinggi dapat mengakibatkan kerusakan struktur karbon atau bisa juga pelebaran ukuran pori yang mengakibatkan penurunan luas permukaan adsorben (Utomo et al., 2023; Yahya et al., 2015).

Nilai efisiensi yang diperoleh pada penelitian ini lebih kecil dibandingkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Rangkuti et al. (2021) yang memperoleh efisiensi penyerapan ALB dengan adsorben *bottom ash* boiler sebesar 39,10%. Rendahnya efisiensi yang diperoleh pada penelitian ini diasumsikan karena jenis CPO yang digunakan merupakan CPO *recovery* yang memiliki mutu lebih rendah dibandingkan dengan CPO murni. Tingginya kadar ALB dan pengotor pada CPO *recovery* dapat menutup pori pada adsorben *bottom ash* boiler, sehingga dapat mengganggu proses jalannya adsorpsi.



**Figure 3.** Relationship between Contact Time and Activator Concentration on Water Content in CPO Recovery

### Pengaruh Konsentrasi Aktivator dan Waktu Kontak Terhadap Kadar Air CPO Recovery

Kadar air yang tinggi dalam CPO dapat menurunkan mutu produk yang dihasilkan. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kadar air dalam CPO *recovery* setelah

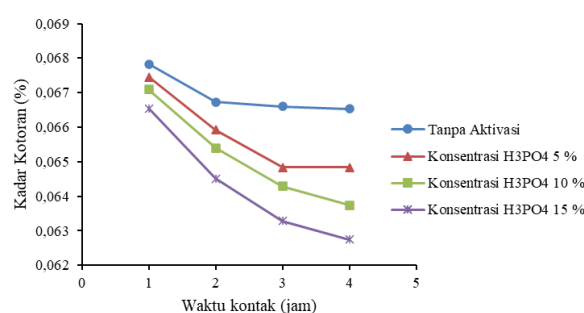
proses adsorpsi menggunakan adsorben *bottom ash boiler* pada *Figure 3*.

*Figure 3* memperlihatkan penurunan kadar air dalam CPO *recovery* yang semakin meningkat seiring bertambah lamanya waktu kontak, dan peningkatan konsentrasi aktivator  $H_3PO_4$ . Adsorpsi dengan adsorben *bottom ash boiler* tanpa aktivasi  $H_3PO_4$  memperlihatkan sedikit penurunan kadar air. Rendahnya penurunan kadar air saat menggunakan adsorben *bottom ash boiler* tanpa aktivasi ini disebabkan oleh jumlah area aktif adsorben yang sedikit, dan adanya pengotor logam seperti K, Si, Mg, Ca, Fe, Zn, dan logam lainnya yang menghambat proses adsorpsi (Yin et al., 2008; Fadilla et al., 2022). Kadar air paling rendah dalam sampel CPO *recovery* didapat setelah proses adsorpsi selama 4 jam menggunakan adsorben *bottom ash boiler* teraktivasi  $H_3PO_4$  15% yaitu sebesar 0,84 %. Hasil yang diperoleh tersebut lebih tinggi dibandingkan penelitian yang dilakukan Syahwandi et al (2019) menggunakan adsorben abu tandan kosong sawit yaitu sebesar 0,00119%. Pengotor logam yang masih ada, setelah proses aktivasi pada adsorben *bottom ash boiler* diasumsikan menjadi salah satu penyebab masih tingginya kadar air dalam sampel CPO *recovery* dibandingkan menggunakan abu tandan kosong sawit. Pengotor logam tersebut menyumbat pori-pori adsorben dan menghambat proses adsorpsi (Fadilla et al., 2022).

### Pengaruh Konsentrasi Aktivator dan Waktu Kontak Terhadap Kadar Kotoran CPO Recovery

Kadar kotoran menunjukkan jumlah bahan-bahan yang tidak terlarut dalam minyak. Kotoran yang tidak terlarut ditunjukkan dalam persen (%) dari zat kotoran terhadap minyak atau lemak. Penyaringan hasil minyak sawit biasanya dilakukan melalui berbagai prosedur untuk menghindari kontaminasi yang masih terkait dengan hasil produksi CPO. *Figure 4* menunjukkan penurunan kadar kotoran tertinggi sebesar 0,004% pada konsentrasi  $H_3PO_4$  15% dengan waktu kontak 4 jam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kadar kotoran dalam sampel CPO *recovery* setelah dikontakkan dengan *bottom ash boiler* tidak mengalami penurunan yang signifikan. Kondisi ini disebabkan oleh keterbatasan kemampuan adsorben *bottom ash boiler* yang hanya efektif dalam mengikat sebagian zat pengotor organik, sementara partikel padat seperti pasir dan debu tidak dapat teradsorpsi secara optimal. Selain itu, perbedaan ukuran antara pori-pori adsorben dan partikel

yang terdapat dalam CPO *recovery* juga memengaruhi efektivitas proses ini. Beberapa pengotor memiliki dimensi lebih besar dibandingkan rongga yang tersedia pada adsorben, sehingga tidak dapat tertahan dengan baik. Menurut Rangkuti et al. (2021) hanya molekul dengan ukuran sama atau lebih kecil dari pori-pori yang dapat diserap secara efektif. Meskipun demikian, penurunan kadar kotoran pada sampel juga dapat dipengaruhi oleh tahap penyaringan yang dilakukan setelah adsorpsi. Proses ini membantu menahan sisa adsorben dan partikel tidak larut dari CPO *recovery*, sehingga menghasilkan produk dengan kadar kotoran yang lebih rendah.



**Figure 4.** Impurity Content (%) as a Function of Contact Time and  $H_3PO_4$  Activator Concentration

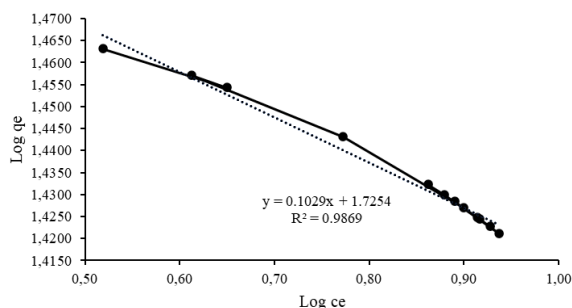
Berdasarkan SNI No. 01-2901-2006, CPO dengan kualitas terbaik maksimal mengandung kadar zat pengotor sebesar 0,5%. Kadar pengotor pada semua sampel CPO *recovery* telah memenuhi SNI yang ditetapkan yaitu berada pada rentang 0,067–0,063 %. Hasil yang didapat tersebut lebih baik dibandingkan penelitian yang dilaporkan sebelumnya oleh Syahwandi et al., (2019) yaitu sebesar 0,8408%.

### Model Isoterm Adsorpsi

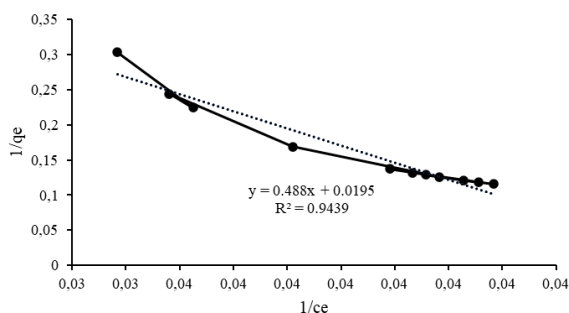
Isoterm adsorpsi menyatakan hubungan keseimbangan antara jumlah adsorbat yang diadsorpsi oleh adsorben dalam suatu sistem (Miri et al., 2022). Grafik isoterm adsorpsi ALB sampel CPO *Recovery* terhadap adsorben *bottom ash boiler* disajikan pada *Figure 5* dan 6.

Pada analisis isoterm adsorpsi Freundlich dihasilkan grafik plot antara  $\log q_e$  vs  $\log c_e$ , sehingga diperoleh garis linear dengan nilai *slope* sama dengan  $1/n$  dan nilai intersep sama dengan  $\log k$ . Dari hasil penelitian ini diperoleh persamaan  $y = 0,1029x + 1,7254$  dan nilai  $R^2 = 0,9869$  untuk model isotherm Freundlich. Langkah tersebut juga dilakukan pada saat

melakukan analisis isoterm Langmuir dan diperoleh persamaan  $y = 0,488x - 0,0195$  dan nilai  $q_m$  diperoleh dari *slope* yang sama dengan  $1/q_m$ , serta intersep sama dengan  $1/(q_m \cdot b)$ . Hasil perhitungan model isoterm Freundlich dan Langmuir seperti pada *Table 1*. Dari *Table 1* dapat dilihat bahwa model isoterm adsorpsi ALB pada CPO recovery dengan menggunakan *bottom ash boiler* mengacu pada model isoterm Freundlich. Hal ini berdasarkan nilai koefisien korelasi ( $R^2$ ) dari hasil regresi linier data adsorpsi (Haryono et al., 2023). Nilai  $R^2$  untuk model Freundlich lebih besar dibandingkan Langmuir yaitu 0,9869. Adsorpsi ALB oleh adsorben *bottom ash boiler* yang sesuai dengan model isoterm Freundlich mengindikasikan mekanisme adsorpsinya yaitu multilayer dan heterogen (Dimbo et al., 2024).



**Figure 5.** Freundlich isotherm model for ALB adsorption in CPO recovery, using boiler bottom ash as the adsorbent



**Figure 6.** Langmuir isotherm model for ALB adsorption in CPO recovery using boiler bottom ash as adsorbent

**Table 1.** Adsorption isotherm parameters of boiler bottom ash adsorbent for ALB adsorption in CPO recovery

Model Isoterm	Nilai
<b>Langmuir</b>	
$q_m$ (mg/g)	2,049
$K_L$ (L/mg)	0,0195
$R_L$	0,9439
<b>Freundlich</b>	
$K_F$ (L/mg)	5,614
$1/n$	0,1029
$R^2$	0,9869

Nilai  $n$  yang dihasilkan dari model isoterm Freundlich untuk adsorpsi ALB oleh adsorben *bottom ash boiler* yaitu 9,72. Kristina et al (2023) melaporkan bahwa nilai  $n$  menyatakan jenis proses adsorpsi yang berlaku. Nilai  $n=1$  menunjukkan proses adsorpsi linier dan jika nilai  $n<1$  atau  $n>1$  secara berurutan menunjukkan adsorpsi secara kimiawi atau fisika. Pada penelitian ini didapatkan nilai  $n$  untuk isoterm Freundlich  $>1$ , dan ini mengindikasikan bahwa jenis proses adsorpsi yang berlaku adalah adsorpsi fisika. Proses adsorpsi fisika ini dapat dideskripsikan dengan gaya *van der waals*, ikatan hidrogen, dan interaksi hidrofobik (Fito et al., 2023). Keberadaan gaya *van der waals* yang lemah dapat dihubungkan dengan nilai  $K_L$  yang sangat rendah yaitu 0,0195 L/mg. Nilai  $K_L$  yang rendah ini menunjukkan adanya ikatan yang lemah antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben (Syahwandi et al., 2019)

## KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi kinerja adsorben *bottom ash* yang teraktivasi dan tanpa aktivasi  $H_3PO_4$  dengan parameter konsentrasi  $H_3PO_4$ , serta waktu kontak selama proses adsorpsi untuk penghilangan asam lemak bebas dari CPO recovery. Kondisi adsorpsi optimum didapatkan untuk variasi waktu kontak selama 3 jam dengan konsentrasi aktivator  $H_3PO_4$  10%. Penurunan kadar kotoran dan air pada kondisi tersebut setelah melewati proses adsorpsi menggunakan adsorben *bottom ash boiler* yaitu sebesar 0,03 dan 0,22%. Model isoterm adsorpsi yang sesuai adalah isoterm Freundlich dengan indikasi adsorpsi *multilayer* ( $R^2 = 0,986$ ) dan jenis proses adsorpsi adalah proses fisika dengan nilai  $n$  sebesar 9,7.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alhawtali, S., El-Harbawi, M., Al-Awadi, A. S., El Bliidi, L., Alrashed, M. M., & Yin, C. Y. (2023). Enhanced Adsorption of Methylene Blue Using Phosphoric Acid-Activated Hydrothermal Carbon Microspheres Synthesized from a Variety of Palm-Based Biowastes. *Coatings*, 13(7), 1287. <https://doi.org/10.3390/coatings13071287>.
- Basu, S., Ghosh, G., & Saha, S. (2018). Adsorption characteristics of phosphoric acid induced activation of bio-carbon: Equilibrium, kinetics, thermodynamics and batch adsorber design. *Process Safety and*

- Environmental Protection*, 117, 125–142.  
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.015>.
- Castro, L. E. N., Matheus, L. R., Sganzerla, W. G., & Colpini, L. M. S. (2025). Valorization of residual ashes from boiler combustion process into activated carbon for adsorption of food industry wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(7), 5341–5362.  
<https://doi.org/10.1007/s13762-024-05998-7>.
- Dimbo, D., Abewaa, M., Adino, E., Mengistu, A., Takele, T., Oro, A., & Rangaraju, M. (2024). Methylene blue adsorption from aqueous solution using activated carbon of *spathodea campanulata*. *Result in Engineering*, 21, 101910.  
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101910>.
- Fadilla, P. J., Sururi, M. R., Marganingrum, D., & Dirgawati, M. (2022). Utilization of Bottom Ash as an Adsorbent for Color and COD Removal for Textile Industry Waste. *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 19(1), 78-88.  
<https://doi.org/10.14710/presipitasi.v19i1.78-88>.
- Fito, J., Abewaa, M., Mengistu, A. et al. Adsorption of methylene blue from textile industrial wastewater using activated carbon developed from *Rumex abyssinicus* plant. *Sci. Rep*, 13, 5427 (2023).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-32341-w>.
- GAPKI. (2024). Ekspor melonjak, Stok turun [Siaran Pers]. Diperoleh dari : <https://gapki.id/news/2024/08/29/ekspor-melonjak-stok-turun/>.
- Haryono, Noviyanti, A. R., & Ernawati, E. E. (2023). Sintesis, karakterisasi, dan uji adsorpsi komposit silika/karbon dari limbah sekam padi sebagai adsorben tembaga (II). *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24 (1), 058-066. <https://doi.org/10.55981/jtl.2023.241>.
- Hasyim, U. H., Kurniaty, I., Mahmudah, H., & Hermanti, M. (2019). Pengaruh waktu adsorpsi asam lemak bebas dalam minyak kelapa sawit mentah pada pembuatan bioadsorben limbah batang pisang. *Konversi*, 8(1), 61 – 69.  
<https://doi.org/10.24853/konversi.8.1.10>.
- Ifa, L., Faudzal, M., & Nurjannah, N. (2018). Kelapa sawit menggunakan adsorben (zeolit dan bioarang sekam padi). *Journal of Chemical Process Engineering*. 03(02), 8–11.
- Jedynak, K., & Charmas, B. (2024). Adsorption properties of biochars obtained by KOH activation. *Adsorption*, 30(2), 167–183.  
<https://doi.org/10.1007/s10450-023-00399-7>.
- Khairiah, H., Fatmayati, & Dhora, A. (2023). Pemanfaatan limbah padat kelapa sawit untuk pemurnian minyak goreng bekas. *JUTIN : Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, 7(1), 460-469.  
<https://doi.org/10.31004/jutin.v7i1.24720>.
- Kristina, T., Assiddiqi, T. D., Setiawan, B. I., Arif, C., & Kurniawan, A. (2023). Kinerja Unit dan Isoterm Adsorpsi Filtrasi Multimedia Pada Sistem Resirkulasi Akuakultur Ikan Hias Berdasarkan Variasi Ketebalan Media dan Debit Aliran. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(4), 933-945. <https://doi.org/10.14710/jil.21.4.933-945>.
- Lengke, G., Lembang, T.O., Saleh, M., Pasae, Y., & Djonny, M. (2024). Evaluasi kualitas Minyak Sawit Mentah (CPO) PT Suryaraya Lestari I berdasarkan parameter FFA, kadar air, DOBI, dan kadar pengotor. *Paulus Chem Engineering Journal*, 2(1), 6-11.  
<https://doi.org/10.63365/pspcs213>.
- Miri, N. S. S., & Narimo. (2022). Review : Kajian persamaan isoterm Langmuir dan Freundlich pada adsorpsi logam berat Fe(II) dengan zeolit dan karbon aktif . *Jurnal Kimia dan Rekayasa*, 2(2), 58–71.
- Neme, I., Gonfa, G., & Masi, C. (2022). Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid : a review. *Heliyon*, 8, e11940.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11940>.
- Nirmala, D., Pelita, E., Desniorita, D., Youfa, R., Jayanti, R. T., Sahaq, A. B., & Permadani, R. L. (2024). Pemanfaatan limbah fly ash pabrik kelapa sawit sebagai adsorben low cost untuk pemucatan crude palm oil. *Jurnal Integrasi Proses*, 13(2), 153–159.

- <http://dx.doi.org/10.62870/jip.v13i2.28882>.
- Nurdiansyah, N., Hidayat, C., & Suroto, D. (2025). Boiler Ash of Oil Palm Shell as Adsorbent for Lead Adsorption. *agriTECH*, 45(2), 177-186. <https://doi.org/10.22146/agritech.93514>
- Pamungkas, R. B., Karimah, K., & Puspawiningtyas, E. (2022). Activation of carbon using microwave-assisted hydrochloric acid for urea adsorption. *RiCE: Research in Chemical Engineering*, 1(1), 28–35. <https://doi.org/10.30595/rice.v1i1.10>.
- Phestrungnapha, A., Wiengnak, N., & Maikrang, K. (2023). Removal of free fatty acid from waste cooking oil using an adsorbent derived from cassava peels. *Korean J. Chem. Eng*, 40, 2253 – 2262. <https://doi.org/10.1007/s11814-023-1413-3>.
- Rangkuti, I. U. P., Purwanto H, & Pohan, H. S. U. (2021). Pengaruh jenis aktivator adsorben abu boiler pabrik kelapa sawit terhadap mutu minyak sawit mentah. *Jurnal Teknik pertanian Lampung*, 10 (3), 351 – 355. <http://dx.doi.org/10.23960/jtep-1.v10.i3.351-355>.
- Rupilu, G. N., Sunarti, S., & Manuhutu, J. B. Karakterisasi abu kerak boiler dari PT. Nusa Ina Group untuk adsorpsi logam Pb. (2024). *MJoCE*, 14(1), 47 – 59. <https://doi.org/10.30598/MJoCEvol14iss1p47-59>.
- Simatupang, G. A., Wondamina, N. W., & Oktavia, L. (2020). Pengaruh penambahan kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>) pada kandungan asam lemak bebas pada minyak kelapa sawit restan. *J. Pen. Kelapa Sawit*, 29(2), 63-72. <https://doi.org/10.22302/iopri.jur.jpks.v29i2.127>.
- Syahwandi, M., Rahmalia W., Zahara, T.A., & Usman, T. (2019). Adsorpsi asam lemak bebas dalam minyak sawit mentah menggunakan adsorben abu tandan kosong sawit. *Indo. J. Pure App. Chem*, 2(3), 121-129. <https://doi.org/10.26418/indonesian.v2i3.36894>.
- Tan, B. A., Nair, A., Zakaria, M. I. S., Low, J. Y. S., Kua, S. F., Koo, K. L., Wong, Y. C., Neoh, B. K., Lim, C. M., & Appleton, D. R. (2023). Free Fatty Acid Formation Points in Palm Oil Processing and the Impact on Oil Quality. *Agriculture*, 13(5), 957. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050957>.
- Utomo, W. P., Jovita, S., Maghfur, B., Ratri, A., Afifah, P. A. I., & Yuhaneke, G. (2023). Studi adsorpsi zat warna indigosol yellow dengan karbon reaktivasi asam fosfat dari pirolisis ampas tebu. *Akta kimia*, 8(2), 138-159. <http://dx.doi.org/10.12962/j25493736.v8i2.19477>.
- Wang, S., Lee, Y., Won, Y., Kim H., Jeong, S. E., Hwang, B. W., Cho, A. R., Kim, J. Y., Park, Y. C., Nam, H., Lee, D. H., Kim, H., & Jo, S. H. (2022). Development of high-performance adsorbent using KOH-impregnated rice husk-based activated carbon for indoor CO<sub>2</sub> adsorption. *Chem. Eng. Journal*, 431 (1), 135378. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2022.135378>.
- Yahya, M.A., Al-Qodah, Z. and Ngah, C.Z. (2015) Agricultural Bio-Waste Materials as Potential Sustainable Precursors Used for Activated Carbon Production: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 218-235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.05>.
- Yin, C. Y., Kadir, S. A. S. A., Lim, Y. P., Syed-Arifin, S. N., & Zamzuri, Z. (2008). An investigation into physicochemical characteristics of ash produced from combustion of oil palm biomass waste in a boiler. *Fuel Processing Technology*, 89 (7), 693-696. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.12.012>.
- Yuliusman, & Afifah, T. M. (2021). Production of palm shell-based activated carbon by two stage phosphoric acid impregnation and impregnation and physican activation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1173 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1173/1/012019>.