



# Penyisihan Warna, Zat Organik, dan Logam Fe Air Gambut dengan *Magnetic Biochar* Berbahan Dasar Cangkang Sawit

David Andrio<sup>1</sup>, Dewa Ayu Divia Pradhaswari Mahardika<sup>2</sup>, Lita Darmayanti<sup>3\*</sup> 

<sup>1,2,3</sup> Program Studi S1 Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received June 23, 2023

Accepted December 10, 2023

Available online April 25, 2024

### Kata Kunci:

*Magnetic Biochar, Cangkang Sawit, Air Gambut, Adsorpsi, Dosis Adsorben, Waktu Kontak.*

### Keywords:

Magnetic Biochar, Palm Kernel Shell, Peat Water, Adsorption, Dosage Adsorbent, Contact Time.



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2024 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

## ABSTRAK

Air gambut menjadi salah satu air permukaan yang dapat digunakan masyarakat sebagai sumber air bersih. Meskipun jumlahnya banyak, dari segi kualitas air gambut kurang baik karena memiliki warna merah kecokelatan, kandungan organik tinggi, Fe tinggi, dan pH 3-5. Kondisi ini menyebabkan beberapa daerah di Provinsi Riau memiliki akses terbatas terhadap sumber air bersih, sehingga diperlukan pengolahan air gambut terlebih dahulu sebelum digunakan. Selain itu Provinsi Riau juga memiliki perkebunan sawit yang luas sehingga menghasilkan limbah cangkang sawit. Meskipun limbah cangkang sawit kaya dengan selulosa, hemiselulosa, dan lignin sehingga berpotensi untuk dijadikan *magnetic biochar*. *Magnetic biochar* adalah padatan kaya karbon dari biomassa yang memiliki sifat magnetik dengan penambahan ion yang mengandung logam dan melalui proses pirolisis. *Magnetic biochar* memiliki potensi untuk dijadikan adsorben. Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan *magnetic biochar* dari cangkang sawit untuk menyisihkan warna, zat organik, dan logam Fe dalam air gambut. Proses adsorpsi dilakukan dengan memvariasikan dosis *magnetic biochar* dan waktu kontak. Hasil analisis proksimat penyisihan terbaik diperoleh pada dosis *magnetic biochar* 8,55 g/l dan waktu kontak 150 menit dengan efisiensi penyisihan warna 69,1% serta zat organik dengan efisiensi penyisihan 54,5%. Di sisi lain konsentrasi Fe mengalami peningkatan setelah dilakukan pengolahan dari 0,07 mg/l menjadi 0,60 mg/l pada dosis 1,25 g/l dan waktu kontak 30 menit. Kandungan warna dan zat organik hasil pengolahan masih melebihi baku mutu air untuk keperluan higiene sanitasi.

## ABSTRACT

Peat water is one of the surface waters that can be used by the community as a source of clean water. Despite its abundance, the quality of peat water is not good because it has a red-brown color, high organic content, high Fe, and pH 3-5. This condition causes some areas in Riau Province to have limited access to clean water sources, so it is necessary to treat peat water first before use. In addition, Riau Province also has extensive palm oil plantations that produce palm kernel shell waste. Although palm kernel shell waste is rich in cellulose, hemicellulose, and lignin, it has the potential to be used as *magnetic biochar*. *Magnetic biochar* is a carbon-rich solid from biomass that has magnetic properties with the addition of metal-containing ions and through pyrolysis process. *Magnetic biochar* has the potential to be used as an adsorbent. This research aims to utilize *magnetic biochar* from palm kernel shells to remove color, organic matter, and Fe metal in peat water. The adsorption process was carried out by varying the dose of *magnetic biochar* and contact time. The best removal proximate analysis results were obtained at a *magnetic biochar* dose of 8.55 g/l and a contact time of 150 minutes with a color removal efficiency of 69.1% and organic substances with a removal efficiency of 54.5%. On the other hand, Fe concentration increased after treatment from 0.07 mg/l to 0.60 mg/l at a dose of 1.25 g/l and a contact time of 30 minutes. The color and organic matter content of the treatment results still exceed the water quality standards for sanitary hygiene purposes.

## 1. PENDAHULUAN

Ketersediaan air sangat dibutuhkan bagi kelangsungan hidup manusia. Indonesia memiliki ketersediaan air sebesar 694 milyar m<sup>3</sup> per tahun, namun hanya 23% yang baru dimanfaatkan dimana 20% sebagai kebutuhan bahan baku domestik dan 80% sebagai kebutuhan irigasi (Darmayanti, Putri, & HS, 2022; Syukur, Indah, & Komala, 2023). Pemanfaatan air yang belum menyeluruh terjadi karena beberapa sumber air memiliki kandungan tertentu yang membutuhkan pengolahan khusus, seperti air gambut. Provinsi Riau sebagai daerah yang memiliki lahan gambut terbesar di Indonesia memiliki kondisi air sungai yang berwarna merah kecokelatan, bersifat asam, dengan kandungan organik yang tinggi. Ketika musim kemarau, masyarakat yang kesulitan akses air bersih menggunakan air gambut yang diperoleh dari sungai dengan pengolahan seadanya (Efendi, Sihombing, Rosmainar, & Carolius Angga, 2024; Harfinda, Delyani, & Apindiati, 2020). Proses ini tidak cukup untuk menyisihkan kontaminan pada air gambut,

\*Corresponding author.

E-mail addresses: [litadarmayanti@eng.unri.ac.id](mailto:litadarmayanti@eng.unri.ac.id) (Lita Darmayanti)

sehingga masyarakat terdampak beberapa penyakit seperti infeksi kulit, infeksi saluran pencernaan, pengeroposan gigi, dan lain-lain. Oleh karena itu, untuk memastikan terjaganya kesejahteraan masyarakat dan pemenuhan kebutuhan air bersih terlaksana, diperlukan cara efisien dan ekonomis untuk menunjang pengolahan air gambut. Hal ini sangat penting untuk memastikan ketersediaan pasokan air lokal atau pengembangan potensi sumber air permukaan yang belum dimanfaatkan seperti air dari lahan gambut (Gani, Taroepratjeka, & Marganingrum, 2023; Khair, Prihatini, Apriani, & Pramaningsih, 2021). Potensi lahan gambut di Indonesia mencapai 18,9 juta hektar yang tersebar di Riau, Jambi, Sumatera Selatan, Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, Kalimantan Selatan, dan Papua. Provinsi Riau memiliki lahan gambut sebesar 3,89 juta hektar. Kemampuan gambut mengikat air dapat mencapai 20 kali berat keringnya. Air gambut menjadi salah satu sumber air permukaan yang dapat digunakan masyarakat khususnya daerah Riau (Asmiyarna et al., 2021; Hendrasarie & Andhika, 2021).

Salah satu metode yang dapat digunakan dalam pengolahan air gambut adalah adsorpsi untuk menyerap logam dan zat pengotor lainnya. Bahan yang bisa digunakan sebagai penyerap (adsorben) antara lain adalah *biochar*. *Biochar* merupakan salah satu jenis adsorben yang menarik perhatian peneliti karena memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi terutama dalam penyisihan polutan pada air (Alfi Rahmi, Anton Ariyanto, & Afriyandi, 2023; Envirotek, Meicahayanti, Envirotek, Envirotek, & Zulya, 2023). *Biochar* adalah padatan kaya karbon yang dihasilkan dari proses pirolisis biomassa pada temperatur 300-700°C dengan sedikit atau tanpa oksigen. *Biochar* dapat diperoleh dari pengolahan cangkang kelapa sawit. Komponen cangkang sawit terdiri dari 53,85% lignin, 26,16% hemiselulosa, dan 6,92%. Kandungan lignoselulosa yang tinggi pada cangkang sawit menunjukkan bahwa cangkang sawit berpotensi sebagai bahan baku pembuatan *biochar* (Elystia, Hasibuan, & Zultiniar, 2022; Lubis, Elystia, Ermal, & Zultiniar, 2022). Secara material, *biochar* memiliki luas permukaan spesifik yang besar dengan struktur berpori, gugus fungsi, dan kandungan karbon yang tinggi. Namun kelemahan dari *biochar* adalah sulit dipisahkan dari air karena partikelnya yang sangat kecil (Darmayanti et al., 2022; Riyandini & Iqbal, 2020). Masalah ini dapat diatasi dengan penggunaan *magnetic biochar* yakni padatan hasil konversi *biochar* menjadi material yang memiliki sifat magnetik.

Senyawa  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  merupakan bahan kimia yang umumnya digunakan dalam menimbulkan sifat magnetik pada *biochar* karena sifat dari Fe yang tidak mudah menguap pada temperatur tinggi. *Magnetic biochar* yang terbuat dari tandan kosong sawit diimpregnasi menggunakan  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dan dipirolisis pada temperatur 550°C (tanpa oksigen) mampu menyisihkan 96,68% *methylene blue* dan 90,76% *orange-G*. *Magnetic biochar* dari bahan baku cottonwood dengan penambahan  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dan dipirolisis pada temperatur 600°C (tanpa oksigen) mampu menyisihkan 99% *methylene blue* (Elystia et al., 2022; Maya Sylvani, Simbolon, & Susanti, 2023). Berdasarkan penelitian sebelumnya dapat dilihat *magnetic biochar* berpotensi untuk digunakan sebagai adsorben menyisihkan zat-zat terlarut dalam air. Penelitian ini menggunakan limbah cangkang sawit yang jumlahnya sangat banyak untuk bahan dasar *magnetic biochar* untuk mengolah air gambut. Tujuan penelitian ini adalah memanfaatkan *magnetic biochar* berbahan dasar cangkang sawit untuk menyisihkan warna, zat organik, dan logam Fe pada air gambut, sehingga diperoleh cara terbaru dalam pengolahan air gambut menjadi air bersih yang dapat digunakan sebagai sumber air utama bagi kehidupan sehari-hari.

## 2. METODE

Air gambut yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari sungai di Kelurahan Rimbo Panjang, Kecamatan Tambang, Kabupaten Kampar. Cangkang sawit diperoleh dari Kecamatan Tapung, Kabupaten Kampar. Bahan kimia yang digunakan adalah  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (Merck) untuk proses impregnasi cangkang sawit, gas nitrogen ( $\text{N}_2$ ), dan akuades.

### **Pembuatan Magnetic biochar**

Cangkang sawit dibersihkan dengan akuades untuk menyisihkan zat pengotor. Selanjutnya dilakukan pengeringan dengan oven pada temperatur 105°C selama 24 jam. Cangkang sawit dihancurkan sampai lolos saringan ukuran 100 mesh. Kemudian dilakukan impregnasi menggunakan logam  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dengan rasio impregnasi yakni 0,5 ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ :biomassa). Selama impregnasi campuran distirrer dengan kecepatan 150 rpm pada temperatur 30°C selama 3 jam. Selanjutnya dikeringkan menggunakan oven pada temperatur 100°C selama 24 jam. Cangkang sawit yang telah dikeringkan kemudian dipirolisis pada temperatur 550°C selama 20 menit dengan aliran gas  $\text{N}_2$  0,2 l/ menit. *Magnetic biochar* kemudian dicuci dengan akuades sampai netral dan dikeringkan menggunakan oven pada temperatur 105°C selama 3 jam. Karakterisasi *magnetic biochar* ditentukan dengan uji proksimat (SNI 06-3730-1995).

**Penelitian Adsorpsi**

Penelitian adsorpsi dilakukan dengan memvariasikan dosis 1,25; 3,15; 5; 6,8; 8,55 g/l dan waktu kontak 30; 60; 90; 120; 150 menit dengan kecepatan pengadukan 150 rpm. Setelah diaduk sampel disaring dan warna, zat organik, dan logam Fe dari filtrat diukur. Parameter yang dianalisis adalah warna dengan dengan instrumentasi spektrofotometri (SM 2120 B), zat organik sebagai mg/l KMnO4 (SNI 01-3554-2006), dan Fe menggunakan instrumentasi AAS. Proses adsorpsi dilakukan secara duplo dan diulang sampai perbedaan hasil yang didapatkan kurang dari 5%. Data yang diperoleh dari proses adsorpsi kemudian diolah untuk mendapatkan nilai persentase penyisihan setiap parameter.

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Hasil**

Air gambut diperoleh dari sungai di Kelurahan Rimbo Panjang, Kecamatan Tambang, Kabupaten Kampar. Air gambut kemudian dianalisa untuk mengetahui konsentrasi awal dari parameter pH, warna, zat organik, dan Fe. Adapun karakteristik air gambut disajikan pada [Tabel 1](#).

**Tabel 1.** Karakteristik Awal Air Gambut

Parameter	Satuan	Penelitian ini	PERMENKES No. 32 Tahun 2017
pH	-	4,1	6,5-8,5
Warna	Pt/Co	1830	50
Zat organik	mg/l	437,8	10
Besi (Fe)	mg/l	0,07	1

Hasil uji karakteristik *magnetic biochar* dari cangkang sawit dibandingkan dengan standar karbon aktif teknis yang ditetapkan dalam SNI 06-3730-1995 untuk melihat apakah kualitas *magnetic biochar* yang dihasilkan sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Perbandingan hasil uji dapat dilihat pada [Tabel 2](#).

**Tabel 2.** Hasil Uji Karakterisasi *Magnetic Biochar* dari Cangkang Sawit

Parameter	Cangkang sawit <sup>1</sup>	Penelitian ini	SNI 06-3730-1995 <sup>2</sup>
Kadar Air (%)	3,87	1,13%	Max 15%
Kadar Abu (%)	7,06	4,99%	Max 10%
<i>Volatile matter</i> (%)	20,61	15,85%	Max 25%
<i>Fixed carbon</i> (%)	72,34	78,03%	Min 65%

(1) Raju dkk., 2016

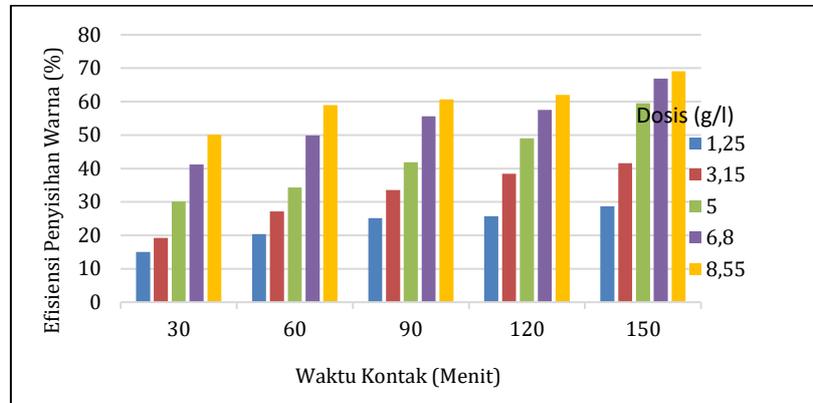
(2) Standar Karbon Aktif Teknis

Warna air gambut setelah diadsorpsi dengan pH berbeda dapat dilihat pada [Gambar 1](#)

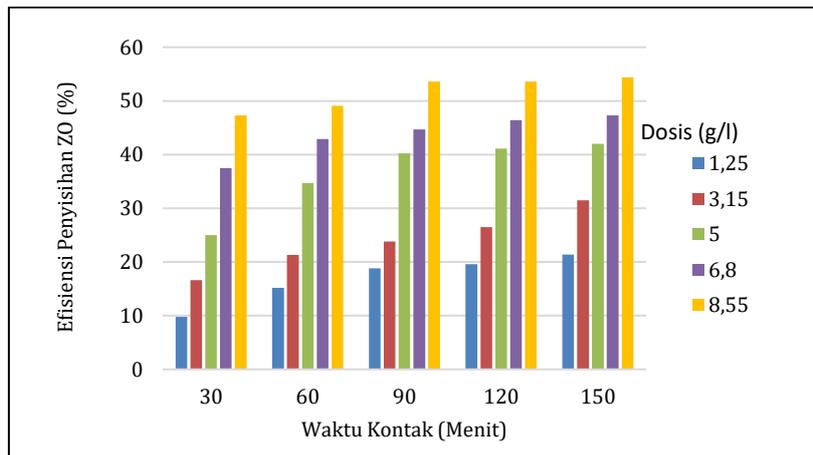


**Gambar 1.** Pengaruh Pengaturan pH Air Gambut pada Proses Adsorpsi Menggunakan *Magnetic Biochar*

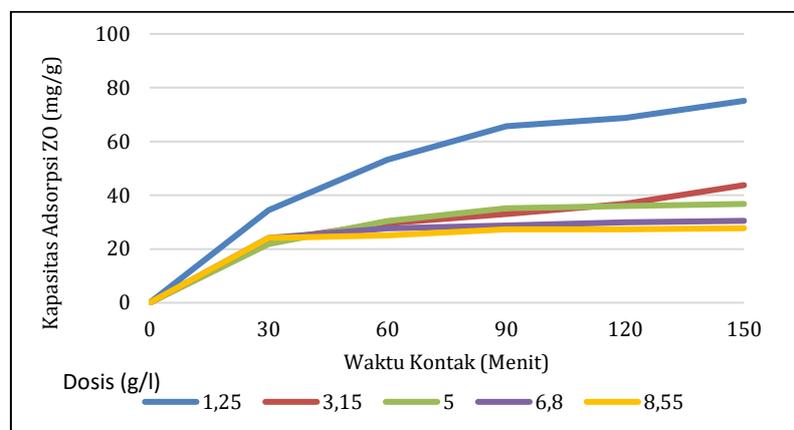
Dosis adsorben dan waktu kontak merupakan salah satu parameter yang penting dan mempengaruhi proses adsorpsi. Kedua hal tersebut dapat mempengaruhi tingkat penyisihan warna, zat organik, dan logam Fe pada air gambut. Dari proses ini juga dapat diketahui kapasitas adsorpsi untuk mengetahui banyaknya zat warna, zat organik, dan logam besi (Fe) yang mampu diserap oleh setiap gram adsorben *magnetic biochar*. Pengaruh dosis *magnetic biochar* dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi zat warna, zat organik, dan Fe dapat dilihat pada Gambar 2-6.



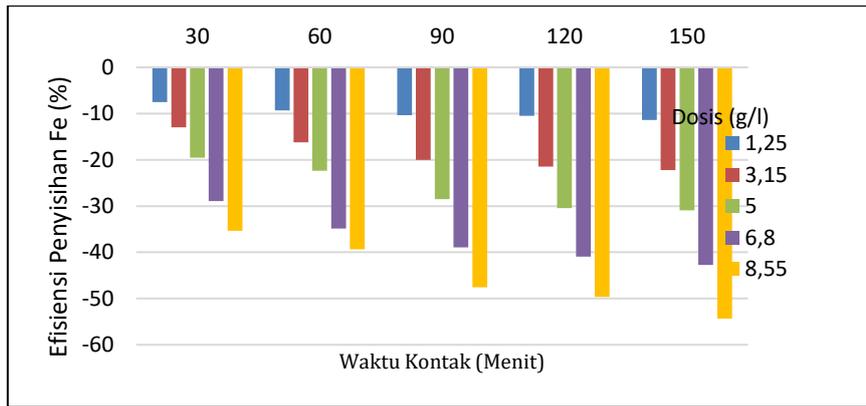
Gambar 2. Pengaruh Dosis *Magnetic Biochar* dan Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Penyisihan Warna



Gambar 3. Pengaruh Dosis *Magnetic Biochar* dan Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Penyisihan Zat Organik

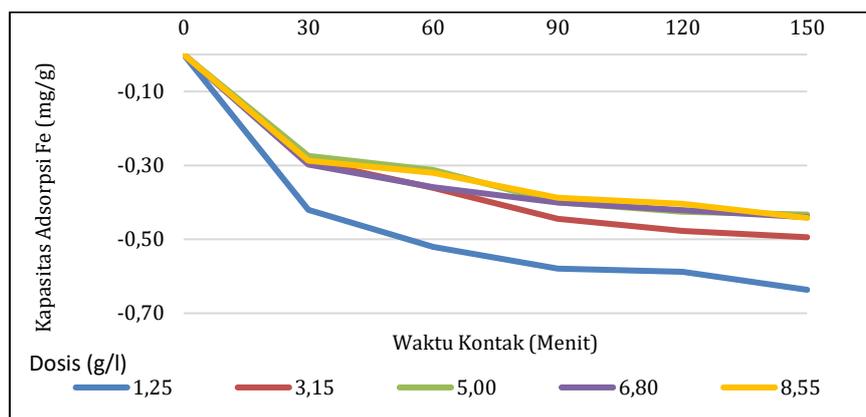


Gambar 4. Pengaruh Dosis *Magnetic Biochar* dan Waktu Kontak Terhadap Kapasitas Adsorpsi Zat Organik



Gambar 5. Pengaruh Dosis *Magnetic Biochar* dan Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Penyisihan Logam Fe

Melalui gambar di atas dapat dilihat bahwa dosis dan waktu kontak mempengaruhi penyisihan kontaminan pada air gambut. **Error! Reference source not found.** menunjukkan pengaruh dosis dan waktu kontak terhadap penyisihan warna menggunakan *magnetic biochar* dari cangkang sawit. Efisiensi penyisihan warna tertinggi terjadi pada dosis 8,55 gr dan waktu kontak 150 menit dengan efisiensi penyisihan 69,13% sedangkan efisiensi terendah terjadi pada dosis 1,25 gr dan waktu kontak 30 menit dengan efisiensi penyisihan sebesar 15%. Efisiensi penyisihan warna pada penelitian ini terus mengalami peningkatan hingga dosis dan waktu kontak tertinggi.



Gambar 6. Pengaruh Dosis *Magnetic Biochar* dan Waktu Kontak Terhadap Kapasitas Adsorpsi Logam Fe

Selanjutnya pada Gambar 3. dan Gambar 4. menunjukkan pengaruh dosis dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi zat organik menggunakan *magnetic biochar* dari cangkang sawit. Efisiensi penyisihan zat organik tertinggi terjadi pada dosis 8,55 g/l dan waktu kontak 150 menit sebesar 54,5% dengan kapasitas adsorpsi 27,73 mg/g, sedangkan efisiensi terendah pada dosis 1,25 g/l dan waktu kontak 30 menit sebesar 9,8% dengan kapasitas adsorpsi 34,4 mg/g. Begitu juga untuk parameter logam Fe yang terdapat pada Gambar 5. dan Gambar 6. menunjukkan pengaruh dosis dan waktu kontak terhadap konsentrasi Fe menggunakan *magnetic biochar* dari cangkang sawit. Adapun pada hasil penelitian ini, terjadi peningkatan konsentrasi Fe saat penggunaan dosis 1,25 g/l dan waktu kontak 30 menit sebesar 0,60 mg/l dari konsentrasi awal Fe pada air gambut sebesar 0,07 mg/l.

### Pembahasan

Penggunaan air gambut sebagai sumber air bersih tidak bisa dilakukan tanpa pengolahan terlebih dahulu. Pada Tabel 1. menunjukkan konsentrasi warna dan zat organik air gambut melebihi ambang batas standar untuk digunakan sebagai air keperluan higiene sanitasi menurut Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 32 Tahun 2017. Namun konsentrasi Fe air gambut pada penelitian ini sudah berada di bawah baku mutu yang ditetapkan yakni 0,07 mg/l. Secara visual, air gambut berwarna merah kecoklatan. Adapun zat organik pada air gambut berasal dari hasil dekomposisi tidak sempurna tumbuhan dan hewan yang menyebabkan air gambut tidak dapat dikonsumsi secara langsung karena dapat menimbulkan keluhan kesehatan pada masyarakat (Eprrie, Bungas, & Abudarin, 2022; Pribadi, 2024). Pengaturan pH dilakukan untuk menentukan pH terbaik dalam proses adsorpsi selanjutnya. Pada Gambar 1 dapat dilihat penurunan

warna terendah didapat pada pH 6 dan penurunan warna tertinggi pada pH 2. Perubahan warna merah kecokelatan pada air gambut terjadi pada saat pH semakin rendah. Arisna et al., (2016) menentukan pH kerja adsorpsi pada air gambut dengan variasi pH 3; 4; 5; 6; 7 dan didapatkan pH adsorpsi terbaik yaitu 3, sedangkan pada penelitian ini didapatkan pH kerja adsorpsi lebih rendah yaitu 2. Pada kondisi pH rendah terjadi netralisasi dari muatan negatif pada permukaan adsorben yang meningkatkan protonasi dan menghasilkan aktivitas adsorpsi. Kondisi ini memungkinkan terjadinya difusi sehingga situs aktif pada permukaan adsorben bertambah. Dengan demikian, semakin rendah pH adsorbat maka proses adsorpsi semakin optimal karena terjadinya interaksi elektrostatis antara muatan negatif dari gugus fungsi pada zat organik dan muatan positif pada permukaan adsorben (Handayani, Desasy, & Darmayanti, 2024; Yuni, Darmayanti, & Fitria, 2021).

Penelitian ini menggunakan karbon aktif sebagai adsorben zat warna, zat organik, dan Fe pada air gambut. Tabel 2 menunjukkan kadar air, kadar abu, *volatile matter*, dan *fixed carbon* untuk cangkang sawit dan *magnetic biochar*. Penetapan kadar air bertujuan untuk mengetahui kelembaban dari *magnetic biochar*. Kadar air yang berlebihan akan mengisi ruang kosong antara *magnetic biochar* dan dapat menyebabkan keretakan mendadak akibat kerapuhan struktur. Kandungan air karbon aktif yang besar dapat menurunkan kualitas adsorpsi yang dimilikinya (Pramuni Oktaviani Sitanggang, Kholiza, & Diah Ivontianti, 2022; Yuni et al., 2021). Pada penelitian ini, kadar air yang dimiliki relatif kecil yakni sebesar 1,13%. Selanjutnya penetapan kadar abu pada *magnetic biochar* dari cangkang sawit dilakukan untuk mengetahui kandungan oksida logam dalam *magnetic biochar*. Keberadaan abu yang berlebihan dapat menyebabkan terjadinya penyumbatan pori-pori karbon aktif, sehingga luas permukaan menjadi berkurang dan mempengaruhi proses adsorpsi. Kadar abu *magnetic biochar* dari cangkang sawit pada penelitian ini adalah 4,99%. Nilai ini telah memenuhi kadar abu yang ditetapkan dalam SNI 06-3730-1995 dengan maksimal 10%. Penetapan nilai *volatile matter* pada *magnetic biochar* bertujuan untuk mengetahui seberapa banyak senyawa yang belum menguap pada *magnetic biochar* saat pirolisis (Rahmawati, Nigravita, Larasati, Mahafani, & Syafutra, 2024; Ubaidillah, Faizal, & Napoleon, 2022). Kadar *volatile matter* yang tinggi menunjukkan bahwa masih terdapatnya senyawa non karbon yang menempel pada permukaan karbon aktif sehingga mengurangi efektivitasnya dalam menyerap adsorbat. Kadar *volatile matter* dari *magnetic biochar* pada penelitian ini adalah 15,85%. Nilai ini telah memenuhi kadar *volatile matter* yang ditetapkan dalam SNI 06-3730-1995 dengan maksimal 25% (Afifah, Adicita, & Suryawan, 2021; Savitri, Andrio, & Helwani, 2022). Kadar karbon (*fixed carbon*) adalah padatan karbon pada biomassa yang tertinggal dalam bentuk *char* setelah proses pirolisis. Kadar *fixed carbon* yang tinggi menunjukkan semakin sedikit pengotor yang terdapat dalam *biochar*, sehingga dapat meningkatkan kualitas *biochar* dalam proses adsorpsi. Kadar *fixed carbon magnetic biochar* dari cangkang sawit pada penelitian ini adalah 78,03%. Nilai ini telah memenuhi kadar *fixed carbon* yang ditetapkan dalam SNI 06-3730-1995 dengan minimal 65% (Alam, 2022; Sa'diyah, Suharti, Hendrawati, Pratamasari, & Rahayu, 2021) Terdapat berbagai macam faktor yang dapat mempengaruhi proses adsorpsi, beberapa diantaranya adalah dosis dan waktu kontak adsorben. Pada Gambar 2 dapat dilihat pengaruh dosis dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan warna menggunakan adsorben *magnetic biochar* dari cangkang sawit. Dosis adsorben memiliki pengaruh terhadap efisiensi peningkatan kejernihan warna, dimana peningkatan efisiensi warna air gambut berbanding lurus dengan jumlah situs adsorpsi yang bertambah seiring dengan penambahan dosis adsorben. Efisiensi penyisihan pada penelitian ini terus mengalami peningkatan hingga dosis dan waktu kontak tertinggi (Agusdin & Setiorini, 2020; Amalia, Nisa, & Hadisantoso, 2022).

Dosis dan waktu kontak adsorben juga berpengaruh terhadap proses adsorpsi zat organik. Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan pengaruh dosis dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi zat organik menggunakan *magnetic biochar* dari cangkang sawit (Afifah et al., 2021; Zahro & Adityosulindro, 2023). Hasil ini sesuai dengan penelitian yang menyatakan bahwa waktu kontak dan jumlah adsorben memainkan peranan penting dalam meningkatkan efisiensi penyisihan zat organik. Berdasarkan Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4 dapat dilihat bahwa efisiensi penyisihan warna dan zat organik air gambut akan terus meningkat seiring bertambahnya dosis adsorben dan lamanya waktu kontak yang digunakan. Hal ini terjadi karena semakin banyak dosis yang diberikan, maka semakin luas permukaan yang tersedia untuk menyerap adsorbat. Kemudian semakin lama waktu kontak yang diberikan, maka adsorbat dan adsorben diizinkan berinteraksi lebih lama, dan kesempatan adsorbat untuk mengisi setiap pori-pori dan permukaan adsorben menjadi lebih optimal. Waktu kontak yang lebih lama memungkinkan proses difusi dan penjerapan molekul adsorbat berlangsung lebih baik. Pada hasil penelitian ini, konsentrasi zat organik menurun karena terjadinya penjerapan komponen senyawa humus ke dalam pori-pori permukaan *magnetic biochar* (Khan, Gao, Qiu, Islam, & Song, 2020; Sun et al., 2021).

Selain mempengaruhi efisiensi penyisihan pada air gambut, dosis dan waktu kontak juga mempengaruhi kapasitas adsorpsi dari adsorben, dimana kapasitas adsorpsi *magnetic biochar* pada penyisihan zat organik dalam penelitian ini mengalami penurunan seiring banyaknya dosis yang

ditambahkan, namun mengalami peningkatan seiring lamanya waktu kontak yang digunakan. Kapasitas adsorpsi meningkat sejalan dengan penurunan dosis adsorben karena kapasitas adsorpsi dihitung sebagai jumlah ion logam yang teradsorpsi per gram adsorben. Semakin banyak dosis adsorben, maka kapasitas adsorpsi semakin menurun (Suhermen & Komala, 2022; Yuni et al., 2021). Peningkatan dosis adsorben menyebabkan proporsi jumlah ion logam berkurang dalam larutan yang berhubungan dengan jumlah sisi aktif pada adsorben, yang dapat menyebabkan perubahan kesetimbangan adsorpsi. Semakin besar dosis adsorben yang digunakan, dengan waktu kontak dan konsentrasi adsorbat dalam keadaan tetap maka akan menyebabkan penyebaran adsorbat tidak secara merata dalam per satuan gram adsorben. Akibatnya, proses adsorpsi tidak berjalan secara maksimal. Sebaliknya, pada penelitian ini kapasitas adsorpsi pada penyisihan zat organik meningkat seiring lamanya waktu kontak yang digunakan. Waktu kontak yang lama mengizinkan adsorbat dan adsorben berinteraksi lebih lama sehingga adsorbat akan lebih maksimal untuk mengisi pori-pori permukaan adsorben yang masih kosong. Peningkatan kapasitas adsorpsi akan terus bertambah seiring lamanya waktu kontak yang digunakan (Fatmawati, Syar, Suhartono, Maulina, & Ariyadi, 2021; Septiani, Rachmawati, & Zulfikar, 2023).

Proses adsorpsi menggunakan *magnetic biochar* pada air gambut dimulai melalui *bulk diffusion* pada permukaan partikel dimana terjadi perpindahan zat organik melalui lapisan *bulk liquid* menuju lapisan film yang melapisi adsorben. Kemudian terjadi difusi melalui lapisan batas permukaan karbon eksternal yang merupakan proses perpindahan difusi zat organik pada lapisan film yang stagnan menuju pori adsorben. Kedua tahap ini sangat dipengaruhi proses pengadukan yang dilakukan. Selanjutnya terjadi difusi pada struktur pori yang merupakan perpindahan zat organik yang akan diserap melalui pori-pori yang terdapat pada adsorben (Aini, Rahayu, & Jamilatun, 2022; Fitria, Komala, & Vendela, 2022). Pada tahap ini, terjadi difusi pori ketika zat organik masuk ke dalam pori-pori yang diisi cairan, selain itu terjadi juga difusi permukaan ketika zat organik diserap di sepanjang permukaan adsorben. Tahap terakhir adalah proses adsorpsi yang merupakan proses melekatnya zat organik yang diadsorpsi pada adsorben. Hasil terbaik dalam penurunan konsentrasi warna dan zat organik pada penelitian ini didapatkan pada dosis 8,55 gr/l dan waktu kontak 150 menit sebesar 565 Pt.Co dan 199,3 mg/l. Hasil ini masih tergolong tinggi karena dosis *magnetic biochar* dan waktu kontak belum mengisi semua pori-pori permukaan adsorben secara optimal. Faktor lainnya adalah pengaruh dari lepasnya Fe pada permukaan *magnetic biochar* yang berakibat pada tingginya konsentrasi warna pada air gambut. Pada hasil penelitian ini belum terjadi kesetimbangan karena situs aktif yang tersedia dalam adsorben masih memungkinkan untuk terjadinya proses penjerapan. Hal ini dimungkinkan karena luas permukaan, ukuran pori, dan volume total adsorben cukup besar. Peningkatan akan terus terjadi hingga beberapa waktu sampai peningkatan menjadi hampir konstan dikarenakan situs aktif telah ditempati dan tidak ada adsorpsi lebih lanjut (Asmiyarna et al., 2021; Elystia et al., 2022). Penggunaan dosis dan waktu kontak pada penelitian ini juga berpengaruh terhadap kandungan logam Fe pada air gambut, dimana Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan pengaruh dosis dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi logam Fe menggunakan *magnetic biochar* dari cangkang sawit. Adapun pada hasil penelitian ini, konsentrasi Fe mengalami peningkatan. Peningkatan konsentrasi Fe terjadi seiring bertambahnya dosis dan waktu kontak yang diberikan. Hal ini dipengaruhi oleh pengaturan pH kerja awal air gambut (Darmayanti et al., 2022; Syukur et al., 2023).

Pada penelitian ini dilakukan penurunan pH alami air gambut dari 4,1 menjadi 2. Penurunan pH dapat menyebabkan situs aktif yang ada pada permukaan *magnetic biochar* dikelilingi oleh ion H<sup>+</sup> yang membuat adsorben bersifat positif sehingga mencegah terjadinya interaksi antara ion Fe dengan situs aktif pada permukaan *magnetic biochar*. Adapun larutan asam seperti HCl dapat menyebabkan logam besi mengalami *disolution* atau terlepas dari medianya. Pada proses pembuatan *magnetic biochar*, hasil impregnasi FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O setelah proses pirolisis berbentuk Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Logam Fe pada permukaan *magnetic biochar* tersebut lepas karena berinteraksi dengan larutan asam. Semakin lama waktu kontak yang diberikan menyebabkan semakin banyak logam Fe yang terlepas dari permukaan adsorben. Oleh karena itu penambahan larutan asam berupa HCl dalam penurunan pH menyebabkan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada permukaan adsorben bereaksi dengan Cl<sup>-</sup> yang kemudian terlepas dan menyebabkan konsentrasi Fe terus meningkat (Muqim & Purnomo, 2023; Nafilah, Noor, & Mahmud, 2021). Kapasitas adsorpsi pada penjerapan Fe berada di bawah 0 mg/g. Hal ini dikarenakan terjadinya peningkatan konsentrasi Fe pada air gambut akibat penurunan pH kerja adsorpsi. Tidak terjadinya penjerapan Fe oleh *magnetic biochar* akibat meningkatnya ion H<sup>+</sup> yang mengelilingi permukaan adsorben sehingga sehingga situs aktif adsorben yang memiliki muatan bersih cenderung positif yang menyebabkan interaksi antara kation dengan situs aktif berkurang atau bahkan hilang. Faktor lainnya adalah penambahan larutan asam ketika penurunan pH menyebabkan larutnya Fe pada permukaan *magnetic biochar*. Berdasarkan hasil keseluruhan parameter uji, dapat disimpulkan bahwa pH awal sampel sangat mempengaruhi kinerja dari adsorben *magnetic biochar* cangkang kelapa sawit.

#### 4. SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan magnetic biochar dari cangkang sawit yang disintesis memenuhi persyaratan karbon aktif. Karbon aktif sebagai adsorben zat warna, zat organik, dan Fe pada air. Penetapan kadar air bertujuan untuk mengetahui kelembaban dari magnetic biochar. Kadar air yang berlebihan akan mengisi ruang kosong antara magnetic biochar dan dapat menyebabkan keretakan mendadak akibat kerapuhan struktur. Kandungan air karbon aktif yang besar dapat menurunkan kualitas adsorpsi yang dimilikinya. Adsorben magnetic biochar mampu menyisihkan warna dan zat organik air gabut. Kapasitas adsorpsi pada penyerapan Fe berada di bawah 0 mg/g. Hal ini dikarenakan terjadinya peningkatan konsentrasi Fe pada air gambut akibat penurunan pH kerja adsorpsi. Peningkatan konsentrasi Fe terjadi seiring bertambahnya dosis dan waktu kontak yang diberikan. Hal ini dipengaruhi oleh pengaturan pH kerja awal air gambut. Konsentrasi Fe meningkat kemungkinan disebabkan Fe pada magnetic biochar larut dalam air gambut yang asam. Hal ini menunjukkan magnetic biochar berbahan dasar cangkang sawit berpotensi untuk dijadikan adsorben.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, A. S., Adicita, Y., & Suryawan, I. W. K. (2021). Reduksi Warna Methylen Blue (MB) dengan Granular Zeolit Klinoptilolit Teraktivasi. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, 6(1), 24–33. doi: [10.33084/mitl.v6i1.1271](https://doi.org/10.33084/mitl.v6i1.1271).
- Agusdin, A., & Setiorini, I. A. (2020). A Analisa Kemampuan Penyerapan Bubur Kertas (Pulp) Dari Kertas Bekas Sebagai Adsorbent Zat Warna Reaktif Dan Logam Berat (Cu Dan Fe) Dari Limbah Cair Tekstil Dengan Adsorber Vertikal. *Jurnal Teknik Patra Akademika*, 11(01), 4–12. doi: [10.52506/jtpa.V11i01.100](https://doi.org/10.52506/jtpa.V11i01.100).
- Aini, N., Rahayu, A., & Jamilatun, S. (2022). Potensial Biosorben Dalam Removal Fosfat Dengan Metode Adsorpsi: a Review. *Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ*, 23–28. Retrieved from <http://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnaslit>.
- Alam, M. N. (2022). Pengaruh Suhu Pirolisis Terhadap Kadar Fixed Carbon Dari Karbon Aktif Kulit Batang Sagu. *Cokroaminoto Journal of Chemical Science*, 4(2), 19–22. Retrieved from <https://science.e-journal.my.id/cjcs/article/view/132>.
- Alfi Rahmi, Anton Ariyanto, & Afriyandi. (2023). Analisis Pengaruh Filtrasi Terhadap Penurunan Kadar Logam Besi (Fe) dan Mangan (Mn) Air Gambut. *Aptek*, 16(1), 93–98. doi: [10.30606/aptek.v16i1.2275](https://doi.org/10.30606/aptek.v16i1.2275).
- Amalia, V., Nisa, A. R., & Hadisantoso, E. P. (2022). Tinjauan Nanokomposit Hidroksiapatit/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sebagai Adsorben Logam Berat pada Air. *Gunung Djati Conference Series*, 7, 8–24.
- Asmiyarna, L., Daud, S., Darmayanti, L., Prodi, M., Lingkungan, T., Teknik, F., & Riau, U. (2021). Penyisihan Warna dan Zat Organik Pada Air Gambut Secara Koagulasi-Flokulasi dengan Koagulan Belimbing Wuluh. *JT: Jurnal Teknik*, 10(1), 53–58. Retrieved from <http://jurnal.umt.ac.id/index.php/jt/index>
- Darmayanti, L., Putri, M., & HS, E. (2022). Membran Keramik Berbahan Dasar Tanah Liat dan Fly Ash untuk Penyisihan Warna dan Zat Organik pada Air Gambut. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Lingkungan*, 6(1), 1. doi: [10.19184/jrsl.v6i1.28173](https://doi.org/10.19184/jrsl.v6i1.28173).
- Efendi, M., Sihombing, P., Rosmainar, L., & Carolius Angga, S. (2024). Analisis kondisi Optimum Senyawa Kalsium Ferrat (CaFeO<sub>4</sub>) Sebagai Oksidator Untuk Penurunan Intensitas Warna Pada Air Gambut di Kota Palangka Raya. *Jurnal Cendekia Kimia*, 02(02), 60–71. Retrieved from <https://e-journal.upr.ac.id/index.php/bohr/>.
- Elystia, S., Hasibuan, N. A. H., & Zultiniar, Z. (2022). Pemanfaatan Bionanomaterial Chitosan dari Limbah Cangkang Kulit Udang Sebagai Adsorben dalam Pengolahan Air Gambut. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(3), 570–578. doi: [10.14710/jil.20.3.570-578](https://doi.org/10.14710/jil.20.3.570-578).
- Envirotek, A. A. P., Meicahayanti, I., Envirotek, S. N., Envirotek, I., & Zulya, F. (2023). Pengaruh Waktu Kontak serta Jenis Elektroda Al-Al dan Al-Fe pada Elektrokoagulasi dalam Penyisihan Fe dan Mn Air Asam Tambang. *Jurnal Envirotek*, 15(2), 124–128. doi: [10.33005/envirotek.v15i2.272](https://doi.org/10.33005/envirotek.v15i2.272).
- Eprrie, E., Bungas, K., & Abudarin, A. (2022). Pemanfaatan arang cangkang sawit teraktivasi NaOH dan HCl dalam menurunkan kadar Fe, Mn dan zat warna pada air gambut. *Journal of Environment and Management*, 3(2), 146–152. doi: [10.37304/jem.v3i2.5506](https://doi.org/10.37304/jem.v3i2.5506).
- Fatmawati, S., Syar, N. I., Suhartono, S., Maulina, D., & Ariyadi, R. (2021). Arang Aktif Gambut sebagai Filter Logam Berat Mercury (Hg). *Jurnal Ilmiah Sains*, 21(1), 63. doi: [10.35799/jis.21.1.2021.32908](https://doi.org/10.35799/jis.21.1.2021.32908).
- Fitria, D., Komala, P. S., & Vendela, D. (2022). Pengaruh Waktu Flokulasi Pada Proses Koagulasi Flokulasi Dengan Biokoagulan Kelor Untuk Menyisihkan Kadar Besi Air Sumur. *Jurnal Reka Lingkungan*, 10(2), 165–174. doi: [10.26760/rekalingkungan.v10i2.165-174](https://doi.org/10.26760/rekalingkungan.v10i2.165-174).
- Gani, J. F., Taroepratjeka, D. A. H., & Marganingrum, D. (2023). Efisiensi Penggunaan Material Preservasi

- Mikroorganisme (Mpmo) Dalam Penyisihan Timbal (Pb) Dan Kromium (Cr) Pada Limbah Cair Industri Tekstil Menggunakan Reaktor Batch. *Jurnal Reka Lingkungan*, 11(2), 130–139. doi: [10.26760/rekalingkungan.v11i2.130-139](https://doi.org/10.26760/rekalingkungan.v11i2.130-139).
- Handayani, Y. L., Desasy, H. J., & Darmayanti, L. (2024). PENGARUH KETEBALAN MEDIA PASIR KUARSA DAN BATU APUNG PADA PENGOLAHAN AIR GAMBUT. 3(1), 34–44.
- Harfinda, E. M., Delyani, R., & Apindiati, R. K. (2020). Ca-ALGINAT UNTUK ADSORPSI Fe DAN Mn PADA AIR GAMBUT Ca-ALGINATE FOR ADSORPTION OF Fe AND Mn FROM PEAT WATER. *Kimia Mulawarman*, 18(1), 16–21.
- Hendrasarie, N., & Andhika, A. P. (2021). Efektivitas Penambahan Green Adsorbent Di Sequencing Batch Reactor Untuk Menurunkan Parameter Bod, Tss, Dan Warna Pada Limbah Industri Batik. *EnviroUS*, 2(1), 9–17. doi: [10.33005/enviroUS.v2i1.52](https://doi.org/10.33005/enviroUS.v2i1.52).
- Khair, R. M., Prihatini, N. S., Apriani, A., & Pramaningsih, V. (2021). PENURUNAN KONSENTRASI WARNA LIMBAH CAIR SASIRANGAN MENGGUNAKAN ADSORBEN LIMBAH PADAT. LUMPUR-AKTIF TERAKTIVASI INDUSTRI KARET. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 7(1), 74–83. doi: [10.20527/jukung.v7i1.10822](https://doi.org/10.20527/jukung.v7i1.10822).
- Khan, Z. H., Gao, M., Qiu, W., Islam, M. S., & Song, Z. (2020). Mechanisms for cadmium adsorption by magnetic biochar composites in an aqueous solution. *Chemosphere*, 246. doi: [10.1016/j.chemosphere.2019.125701](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125701).
- Lubis, K. L., Elystia, S., Ermal, D. A. S., & Zultiniar, Z. (2022). Penyisihan Logam Fe Pada Air Gambut Menggunakan Membran Chitosan Sebagai Adsorben. *Jurnal Sains Teknologi & Lingkungan*, 8(1), 15–24. doi: [10.29303/jstl.v8i1.298](https://doi.org/10.29303/jstl.v8i1.298).
- Maya Sylvani, M., Simbolon, W., & Susanti, R. (2023). Review: Berbagai Macam Jenis Membran Untuk Pemulihan Air Gambut. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 1(5), 598–609. Retrieved from <https://doi.org/10.5281/zenodo.8280003>.
- Muqim, R. B., & Purnomo, Y. S. (2023). Koagulan Polielektrolit Alami dari Kulit Udang Kaki Putih untuk Menyisihkan Parameter Warna, TSS, dan COD dalam Limbah Cair Batik. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(4), 7348–7355. doi: [10.32672/jse.v8i4.6903](https://doi.org/10.32672/jse.v8i4.6903).
- Nafilah, S., Noor, R., & Mahmud, M. (2021). Aplikasi Karbon Aktif Kayu Ulin Sebagai Adsorben Dalam Menurunkan Bahan Organik Alami (Boa) Pada Air Gambut. *Jernih: Jurnal Tugas Akhir Mahasiswa*, 4(1), 1–12. doi: [10.20527/jernih.v4i1.735](https://doi.org/10.20527/jernih.v4i1.735).
- Pramuni Oktaviani Sitanggang, E. P. O. S., Kholiza, N., & Diah Ivontianti, W. (2022). Efektivitas Pengolahan Air Gambut Kota Pontianak dengan Adsorpsi Menggunakan Karbon Aktif dari Cangkang Buah Bintaro (Cerbera manghas). *Jurnal Envirotek*, 14(2), 182–187. doi: [10.33005/envirotek.v14i2.253](https://doi.org/10.33005/envirotek.v14i2.253).
- Pribadi, S. D. (2024). PERBAIKAN KUALITAS AIR GAMBUT Dusun Banjar Rejo adalah salah satu dusun di Desa Rasau Jaya Dua yang belum memiliki Permenkes Nomor 32 Tahun 2017. Perlunya pengolahan air gambut terlebih dahulu agar menggunakan air gambut sebagai kebutuhan sehari-hari. untuk proses adsorpsi seperti daun nanas. Karbon aktif daun nanas berhasil menurunkan Penelitian ini akan memanfaatkan daun nanas sebagai biosorben untuk memperbaiki kualitas air gambut dengan sistem batch dan aktivasi secara kimia menggunakan larutan 1. Waktu dan Lokasi Penelitian Jaya Dua, Dusun Banjar Rejo. Metode yang digunakan dalam memperbaiki kualitas air Laboratorium Analisis Kualitas Lingkungan Fakultas Teknik Lingkungan Universitas Gambar 1. Lokasi Desa Rasau Jaya Dua, Dusun Banjar Rejo. 12(2), 458–465.
- Rahmawati, R., Nigravita, A. N., Larasati, I., Mahafani, R. H., & Syafutra, R. (2024). Pengolahan Air Gambut dengan Magnetik Karbon / Clay Komposit dari Spent Bleaching Earth Limbah Pengolahan Minyak Sawit Peat Water Treatment with Magnetic Carbon / Clay Composite from Spent Bleaching Earth Palm Oil Treatment. 1(1), 1–5.
- Riyandini, V. L., & Iqbal, M. (2020). Pengaruh Koagulan Biji Asam Jawa (Tamarindus indica) Terhadap Efisiensi Penurunan Zat Organik Pada Air Gambut. *Jurnal Serambi Engineering*, 5(3), 1222–1227. doi: [10.32672/jse.v5i3.2145](https://doi.org/10.32672/jse.v5i3.2145).
- Sa'diyah, K., Suharti, P. H., Hendrawati, N., Pratamasari, F. A., & Rahayu, O. M. (2021). Pemanfaatan Serbuk Gergaji Kayu sebagai Karbon Aktif melalui Proses Pirolisis dan Aktivasi Kimia. *CHEESA: Chemical Engineering Research Articles*, 4(2), 91. doi: [10.25273/cheesa.v4i2.8589.91-99](https://doi.org/10.25273/cheesa.v4i2.8589.91-99).
- Savitri, K., Andrio, D., & Helwani, Z. (2022). Karakteristik Magnetic Biochar Sebagai Adsorben Untuk Pemanfaatan Kembali Buangan Akhir POME Untuk Air Baku Industri. *Seminar Nasional Riset & Inovasi Teknologi*, 381–391.
- Septiani, W., Rachmawati, R., & Zulfikar, M. A. (2023). Adsorpsi Zat Warna Tekstil Direct Blue 14 Menggunakan Kitosan Termodifikasi Dan Komposit Kitosan Termodifikasi Bentonit. *Arena Tekstil*, 38(1), 27–36. doi: [10.31266/at.v38i1.8071](https://doi.org/10.31266/at.v38i1.8071).
- Suhermen, P. A. A., & Komala, P. S. (2022). Tinjauan Singkat Pengolahan Limbah Cair Menggunakan

- Metode Kombinasi Koagulasi Dan Advanced Oxidation Processes (AOPs). *Universitas Riau*, 1(1), 9–15.
- Sun, H., Yang, J., Wang, Y., Liu, Y., Cai, C., & Davarpanah, A. (2021). Study on the removal efficiency and mechanism of tetracycline in water using biochar and magnetic biochar. *Coatings*, 11(11), 1–23. doi: [10.3390/coatings11111354](https://doi.org/10.3390/coatings11111354).
- Syukur, A., Indah, S., & Komala, P. S. (2023). Studi Kinetika dan Isoterm Adsorpsi Abu Tandan Kosong Kelapa Sawit dalam Penyisihan Warna Air Limbah Pabrik Minyak Kelapa Sawit. *Cived*, 10(1), 218. doi: [10.24036/cived.v10i1.122629](https://doi.org/10.24036/cived.v10i1.122629).
- Ubaidillah, A., Faizal, M., & Napoleon, A. (2022). Peningkatan Potensi Air Gambut Sebagai Air Baku (Studi Kasus: Kebun Raya Sriwijaya Sumatera Selatan). *Publikasi Penelitian Terapan Dan Kebijakan*, 5(2). doi: [10.46774/pptk.v5i2.492](https://doi.org/10.46774/pptk.v5i2.492).
- Yuni, F. R., Darmayanti, L., & Fitria, D. (2021). Pengaruh Rasio Padat/Cair dan Waktu Pengadukan pada Proses Ekstraksi Silika dari Palm Oil Fly Ash (POFA). *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(2), 60–67. doi: [10.29080/alard.v6i2.1065](https://doi.org/10.29080/alard.v6i2.1065).
- Zahro, S. F., & Adityosulindro, S. (2023). Literature Review: Penggunaan Bahan Berbasis Limbah Sebagai Adsorben untuk Degradasi Zat Warna pada Air Limbah. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 22(3), 359–368. doi: [10.14710/jkli.22.3.359-368](https://doi.org/10.14710/jkli.22.3.359-368).