

Penyisihan Kandungan Pencemar Fe Pada Air Sumur Menggunakan Kombinasi Aerasi *Diffuser* dan Adsorpsi Sistem Kontinyu

Muhammad Rizha Fahry*, Muhammad Abdus Salam Jawwad

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: 20034010100@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 29 Januari 2026

Disetujui: 10 Februari 2026

Abstract

Well water is one of the groundwater sources widely utilized by communities; however, it generally contains high concentrations of dissolved minerals such as iron (Fe) causing substances that can degrade water quality. This study examines efforts to improve well water quality through a combination of aeration and adsorption processes. Aeration was carried out using *Diffusers* with sizes of 8 inches and 10 inches, while the adsorption process employed a continuous column system using sugarcane bagasse, banana peel, and a mixture of both as adsorbents. The objectives of this study were to analyze the effectiveness of aeration variations in reducing Fe concentrations, to evaluate the performance of different adsorbents in the continuous column system, and to assess the effectiveness of combining both processes. The results showed that aeration was highly effective in reducing Fe concentrations, with removal efficiencies ranging from 91.4–94.1%. In the adsorption process, the mixed adsorbent column exhibited the best performance, achieving Fe removal of 86.7–87.1%. Overall, the combination of *Diffuser* aeration followed by mixed-column adsorption represents an integrated treatment process. This combination results in very high overall removal efficiency, facilitates the adsorption process, and reduces adsorbent consumption, as the aeration process is applied prior to adsorption.

Keywords: *well water, diffuser, column adsorption, adsorbent, fe*

Abstrak

Air sumur merupakan salah satu sumber air tanah yang banyak dimanfaatkan, namun umumnya mengandung mineral terlarut dalam konsentrasi tinggi seperti besi (Fe) yang dapat menurunkan kualitas air. Penelitian ini mengkaji upaya peningkatan kualitas air sumur melalui kombinasi proses aerasi dan adsorpsi. Aerasi dilakukan menggunakan *diffuser* berukuran 8 inch dan 10 inch, sedangkan proses adsorpsi menggunakan sistem kolom kontinyu dengan adsorben ampas tebu, kulit pisang, dan campuran keduanya. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis efektivitas variasi aerasi terhadap penurunan kadar Fe. Menganalisis kinerja variasi adsorben pada kolom kontinyu, serta menganalisis efektivitas kombinasi kedua proses tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aerasi sangat efektif dalam menurunkan Fe dengan persen removal 91,4 - 94,1%,. Pada proses adsorpsi, kolom campuran menunjukkan kinerja terbaik dengan persen removal Fe sebesar 86,7 - 87,1%. Secara keseluruhan, kombinasi aerasi *diffuser* diikuti dengan adsorpsi kolom campuran merupakan kombinasi 2 proses yang saling terhubung. Hal ini akan menghasilkan efisiensi penyisihan total yang sangat tinggi serta lebih mempermudah dalam proses adsorpsi dan menghemat penggunaan media adsorben dikarenakan sebelum masuk ke dalam proses adsorpsi dilakukan proses aerasi terlebih dahulu.

Kata Kunci: *air sumur, diffuser, adsorpsi kolom, adsorben, fe*

1. Pendahuluan

Air bersih merupakan salah satu kebutuhan penting dalam kehidupan manusia dan menjadi sumber daya alam yang memiliki fungsi sangat vital. Air bersih digunakan manusia untuk keperluan sehari-hari mulai dari minum, mandi, memasak, mencuci, serta keperluan lainnya. Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 09/PRT/M/2015 tentang penggunaan sumber air menyebutkan bahwa air adalah semua air yang terdapat didalam dan atau berasal dari sumber-sumber air, baik yang terdapat diatas maupun dibawah permukaan tanah [1].

Besi merupakan unsur logam yang sangat penting dan berlimpah di bumi. Berada di posisi kedua sebagai logam paling banyak ditemukan, besi juga merupakan logam berat yang paling melimpah di kerak bumi, dengan proporsi lebih dari 85%. Kandungan besinya pun tidak merata, dan berbeda-beda tergantung

kedalamannya [2]. Kadar besi (Fe) dalam air sumur merupakan salah satu parameter yang penting dalam menentukan kualitas air. Meskipun besi adalah logam yang berlimpah dan memiliki banyak manfaat, ia memiliki kelemahan yaitu mudah berkarat. Karat merupakan kerusakan pada material yang diakibatkan oleh faktor lingkungan, seperti lingkungan asam, embun, air tawar, air laut, air danau, air sungai, dan air tanah [3]. Kadar besi yang tinggi dalam air sumur dapat menyebabkan kesehatan buruk bagi masyarakat yang menggunakan air tersebut. Peningkatan kandungan zat besi dalam air memiliki efek yang merugikan bagi penggunaan air di perkotaan, mesin industri, pertanian, dan kesehatan manusia [4].

Aerasi merupakan salah satu proses pengolahan air yang dilakukan melalui penambahan oksigen ke dalam air guna meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut. Penambahan oksigen ini berfungsi sebagai upaya untuk menghilangkan atau menurunkan konsentrasi zat pencemar terlarut dan tersuspensi yang keberadaannya dipengaruhi oleh kondisi reduktif di dalam air. [5] peningkatan kadar oksigen terlarut melalui proses aerasi mampu mempercepat reaksi oksidasi senyawa anorganik, seperti besi dan mangan terlarut, sehingga mengubahnya menjadi bentuk yang kurang larut dan mudah dipisahkan.

Diffuser adalah sebuah alat distribusi udara yang berfungsi untuk mengoptimalkan proses aerasi dengan cara menghasilkan gelembung udara berukuran kecil hingga sangat kecil (mikro-gelembung). Prinsip kerjanya didasarkan pada hubungan antara ukuran gelembung dan luas permukaan transfer massa. Bahwa laju perpindahan oksigen dari gelembung ke air berbanding terbalik dengan diameter gelembung. Artinya, dengan volume udara yang sama, gelembung yang lebih kecil akan memiliki total luas permukaan kontak (*interfacial area*) yang jauh lebih besar dibandingkan gelembung besar, sehingga efisiensi transfer oksigen meningkat secara signifikan. *Diffuser* biasanya terbuat dari bahan berpori seperti karet (*membrane diffuser*) atau keramik, dan dipasang di dasar tangki aerasi. Penggunaannya membuat proses oksidasi besi menjadi lebih cepat, seragam, dan hemat energi dibandingkan metode aerasi sembur (*splash*) konvensional [5].

Adsorpsi merupakan proses pemisahan di mana ion atau molekul terlarut menempel pada permukaan adsorben melalui gaya fisik maupun ikatan kimia. Dalam pengolahan air yang mengandung Fe, adsorpsi berperan sebagai proses lanjutan setelah aerasi, dengan menangkap Fe(III) teroksidasi maupun sisa Fe terlarut. Efektivitas adsorpsi sangat dipengaruhi oleh luas permukaan adsorben, karakteristik pori, serta gugus fungsi aktif yang mampu berinteraksi dengan ion logam. Adsorben berbasis biomaterial, seperti limbah pertanian, memiliki potensi tinggi karena mengandung gugus hidroksil dan karboksil yang mampu berikatan dengan ion Fe, sehingga meningkatkan efisiensi penurunan kadar besi dalam air [6].

Ampas tebu adalah limbah padat yang dihasilkan setelah ekstraksi air tebu dari batang tanaman tebu (*Saccharum officinarum*). Ampas tebu terdiri dari serat yang kaya akan komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Komposisi ini menjadikannya sebagai bahan potensial untuk aplikasi adsorpsi, terutama dalam pengolahan air limbah, karena kemampuan selulosa dan lignin dalam berinteraksi dengan berbagai polutan [6].

Kulit pisang, sebagai bahan limbah organik, telah banyak dieksplorasi dalam berbagai penelitian sebagai adsorben potensial untuk penurunan kadar logam berat dalam air. Kulit pisang mengandung berbagai senyawa kimia seperti pektin, lignin, dan selulosa, yang memberikan sifat-sifat adsorpsi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kulit pisang memiliki kemampuan untuk mengikat ion logam seperti Fe (besi). Hal ini disebabkan oleh adanya gugus hidroksil (-OH), karbonil (C=O), dan karboksil (-COOH) yang dapat berinteraksi dengan logam [7].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas kombinasi aerasi *Fine Bubble Diffuser* dan adsorpsi kolom dalam menurunkan konsentrasi Fe pada air sumur. Selain itu, penelitian juga akan mengkaji pengaruh variasi waktu aerasi dan waktu tinggal selama adsorpsi, serta menentukan waktu sampling yang tepat pada masing-masing tahapan dalam mengurangi kandungan pencemar tersebut. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai proses pengolahan air sumur yang efektif, berkelanjutan, dan dapat diterapkan di lapangan, serta menjadi referensi dalam pemilihan metode pengolahan air sumur di masa mendatang.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan Kombinasi Aerasi *Diffuser* dan Adsorpsi Kolom. Untuk Aerasi menggunakan variabel *Diffuser* 8 Inch dan 10 Inch, dan untuk Adsorpsi menggunakan variabel Adsorben Ampas Kulit Pisang, Adsorben Ampas Tebu dan Adsorben (Campuran) Ampas Kulit Pisang dan Ampas Tebu

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas bahan dan peralatan pendukung proses aerasi serta adsorpsi. Bahan yang digunakan meliputi air sumur sebagai sampel penelitian, ampas tebu, dan kulit pisang yang dimanfaatkan sebagai bahan baku adsorben. Adapun peralatan yang digunakan meliputi pompa udara, *diffuser* dengan diameter 8 inch (20,32 cm) dan 10 inch (25,4 cm) sebagai media aerasi, bak penampung aerasi, serta bak penampung adsorpsi kolom yang berfungsi sebagai wadah proses adsorpsi.

Pembuatan Adsorben

1. Ampas Tebu

Pembuatan karbon aktif dari ampas tebu dilakukan melalui beberapa tahapan yang terkontrol. Tahap awal adalah preparasi bahan baku, di mana ampas tebu dipotong menjadi ukuran kecil (± 5 mm) kemudian dikeringkan di dalam oven pada suhu $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam untuk menurunkan kadar air. Selanjutnya, bahan baku dikarbonisasi menggunakan furnace pada suhu $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 30 menit hingga terbentuk karbon. Setelah proses karbonisasi selesai, karbon yang dihasilkan didinginkan di dalam desikator selama ± 30 menit guna mencegah penyerapan kelembapan dari udara. Karbon kemudian ditumbuk dan diayak menggunakan ayakan berukuran 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Tahap berikutnya adalah aktivasi kimia, yaitu dengan merendam karbon dalam larutan H_3PO_4 selama 48 jam, kemudian dicuci menggunakan aquades secara berulang hingga mencapai pH netral dan selanjutnya disaring. Karbon aktif yang telah diaktivasi dikeringkan kembali menggunakan oven pada suhu $\pm 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam dan didinginkan dalam desikator selama ± 30 menit. Melalui tahapan tersebut, diperoleh karbon aktif dari ampas tebu yang dapat digunakan sebagai adsorben dalam penelitian adsorpsi untuk menyisihkan parameter Fe pada air sumur dengan menggunakan aktivator H_3PO_4 .

2. Kulit Pisang

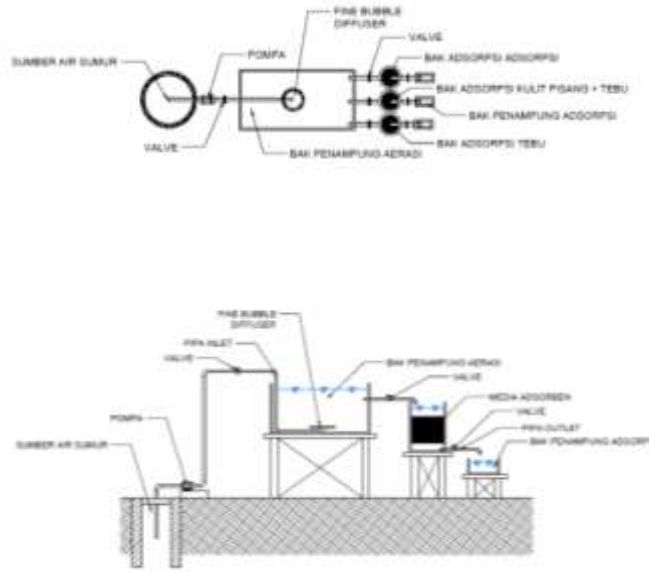
Pembuatan karbon aktif dari kulit pisang dilakukan melalui beberapa tahapan yang sistematis. Tahap awal adalah preparasi bahan baku, di mana kulit pisang dipotong menjadi ukuran kecil (± 5 mm) kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam untuk mengurangi kadar air. Selanjutnya, bahan baku dikarbonisasi di dalam furnace pada suhu $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 30 menit hingga terbentuk karbon. Setelah proses karbonisasi, karbon yang dihasilkan didinginkan di dalam desikator selama ± 30 menit agar stabil terhadap pengaruh kelembapan udara. Karbon kemudian ditumbuk dan diayak menggunakan ayakan berukuran 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Tahap berikutnya adalah aktivasi kimia, yaitu dengan merendam karbon dalam larutan H_3PO_4 selama 48 jam, kemudian dicuci menggunakan aquades secara berulang hingga pH netral dan disaring. Karbon aktif yang telah diaktivasi selanjutnya dikeringkan kembali dalam oven pada suhu $\pm 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam dan didinginkan dalam desikator selama ± 30 menit. Melalui rangkaian proses tersebut, diperoleh karbon aktif dari kulit pisang yang siap digunakan sebagai adsorben dalam penelitian adsorpsi untuk menyisihkan parameter Fe pada air sumur dengan menggunakan aktivator H_3PO_4 .

Penelitian Utama

Aerator *Diffuser* dan adsorpsi kolom. Air sumur yang menjadi sampel diambil dari sumber dan terlebih dahulu dialirkan ke dalam bak penampung limpahan, yang berfungsi untuk menjaga kestabilan debit aliran air yang masuk ke sistem *diffuser*.

Proses aerasi dilakukan dengan menggunakan *diffuser* yang memiliki diameter lubang udara sebesar 8 inch dan 10 inch, untuk menghasilkan gelembung udara mikro yang mampu memperluas kontak antara oksigen dan air. Tujuan utama dari proses aerasi ini adalah untuk mengoksidasi ion logam Fe^{2+} menjadi bentuk padat yaitu $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang dapat dipisahkan secara fisik.

Pengambilan sampel air dilakukan pada interval waktu 20 menit, 40 menit, 60 menit, 80 menit dan 100 menit, untuk mengevaluasi efektivitas proses aerasi terhadap penurunan kadar Fe. Setelah proses aerasi, air dialirkan menuju ke unit adsorpsi kolom sebagai tahap lanjutan untuk meningkatkan efisiensi penurunan pencemar. Unit adsorpsi kolom bekerja secara kontinyu, dengan waktu tinggal (*residence time*) yang disesuaikan dengan waktu sampling 20 menit, 40 menit, 60 menit, 80 menit dan 100 menit. Kolom adsorpsi diisi dengan media kombinasi antara Kulit pisang dan Ampas tebu Fe melalui mekanisme penjerapan dan flokulasi. Setelah air melewati proses adsorpsi, dilakukan pengambilan sampel untuk pengujian kadar Fe dari air hasil olahan. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui efisiensi penurunan kadar pencemar oleh masing-masing proses, baik dari unit aerasi *Fine Bubble Diffuser* maupun unit Adsorpsi Kolom secara terintegrasi.



Gambar 1. Detail Reaktor Aerasi *Fine Bubble Diffuser* dan Adsorpsi Kolom
 Sumber: Data Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Uji Aerasi *Fine Bubble Diffuser*

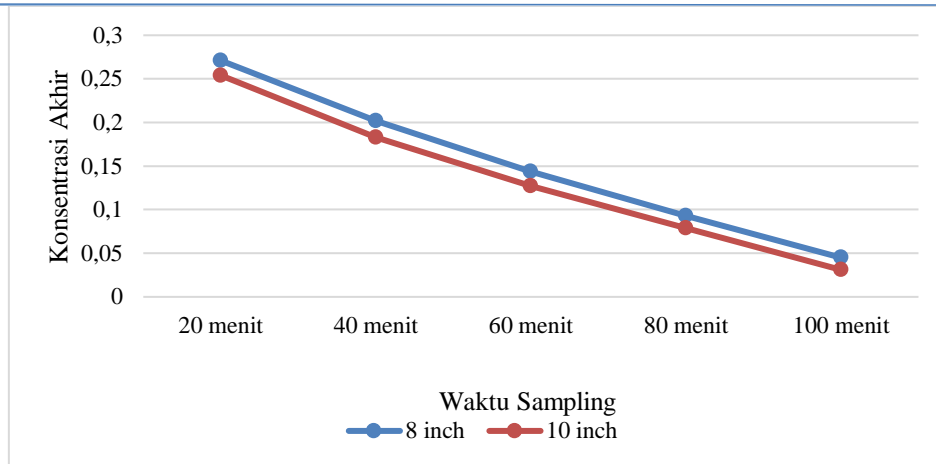
Berdasarkan data hasil uji laboratorium, proses aerasi menggunakan *Fine Bubble Diffuser* dengan variasi diameter 8 inch dan 10 inch menunjukkan perbedaan efektivitas dalam menurunkan konsentrasi besi (Fe). Data pengukuran dianalisis dalam bentuk grafik konsentrasi akhir dan persen removal untuk menggambarkan penurunan Fe terhadap waktu kontak aerasi serta membandingkan kinerja kedua diameter *diffuser*. Grafik pada **Gambar 1** menyajikan secara visual pengaruh variasi diameter *Fine Bubble Diffuser* terhadap efisiensi proses aerasi dalam menurunkan kadar Fe pada air uji

Tabel 1. Penurunan Parameter Fe Setelah Proses Aerasi dengan *Diffuser* dengan Diameter 8 Inch dan 10 Inch

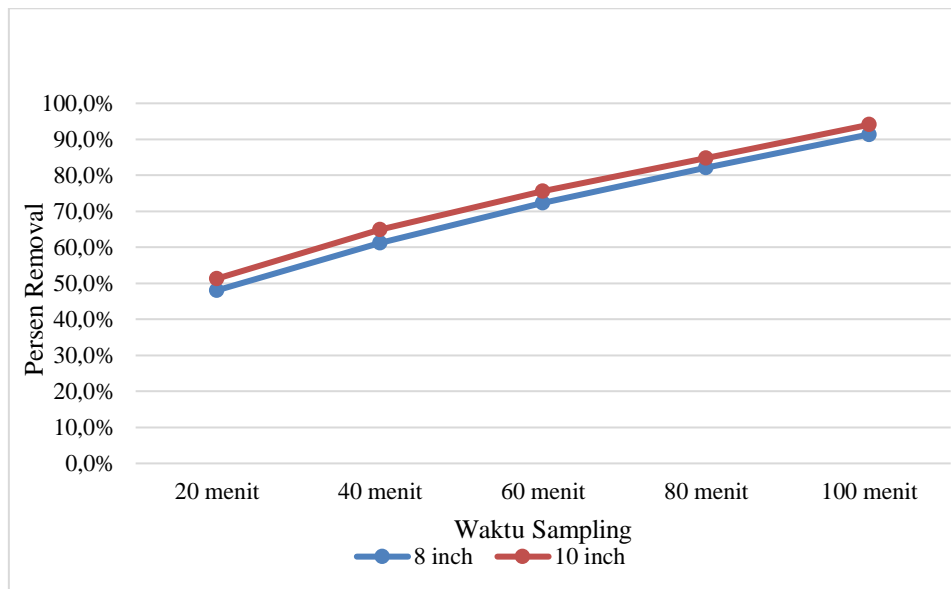
Sampel	Waktu Sampling	Kadar Parameter Fe (mg/l)		Persen removal	
		8 inch	10 inch	8 inch	10 inch
Bak <i>Diffuser</i> aerator	0 menit	0.522	0.522		
	20 menit	0.271	0.254	48.1%	51.3%
	40 menit	0.202	0.183	61.3%	64.9%
	60 menit	0.144	0.127	72.4%	75.7%
	80 menit	0.093	0.079	82.2%	84.9%
	100 menit	0.045	0.031	91.4%	94.1%

Sumber: Data Penelitian

Adapun grafik hasil dari penelitian Aerasi menggunakan *Fine Bubble Diffuser* terkait penurunan kadar parameter Fe dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. Grafik Konsentrasi Akhir Parameter Fe Setelah Proses Aerasi dengan menggunakan *Diffuser* Diameter 8 Inch dan 10 Inch
 Sumber: Data Penelitian



Gambar 3. Grafik Persen Removal Akhir Parameter Fe Setelah Proses Aerasi dengan menggunakan *Diffuser* Diameter 8 Inch dan 10 Inch
 Sumber: Data Penelitian

Berdasarkan data hasil pengujian, variasi waktu aerasi pada sistem *diffuser* menunjukkan pengaruh yang signifikan dan positif terhadap efisiensi penurunan kadar besi (Fe) dalam air. Efektivitas proses aerasi ini ditunjukkan oleh penurunan konsentrasi Fe yang konsisten seiring bertambahnya waktu. Pada menit ke-0, konsentrasi Fe awal tercatat sebesar 0,522 mg/l. Setelah mengalami aerasi selama 20 menit, konsentrasi turun drastis menjadi 0,271 mg/l dengan hasil persen removal 48,1%, mengindikasikan bahwa proses oksidasi telah berlangsung dengan cepat pada fase awal. Pada menit ke-100 konsentrasi Fe mencapai titik terendah, yaitu 0,045 mg/l dengan hasil persen removal 91,4% dengan menggunakan *diffuser* diameter 8 inch dan untuk *diffuser* dengan diameter 10 inch pada menit ke-20 konsentrasi turun drastis menjadi 0,254 mg/l dengan hasil persen removal 51,3% dan pada menit ke-100 konsentrasi Fe mencapai titik terendah, yaitu 0,031 mg/l dengan persen removal 94,1%. Penurunan ini sesuai dengan prinsip kinetika reaksi orde pertama, dimana laju reaksi oksidasi besi ferrous (Fe^{2+}) menjadi besi ferric (Fe^{3+}) yang kemudian mengendap, berbanding lurus dengan konsentrasinya [5]. Semakin lama waktu kontak antara gelembung udara (oksigen) dengan air, semakin banyak pula ion Fe^{2+} yang teroksidasi dan akhirnya dihilangkan dari air.

Dengan ini dapat disimpulkan *diffuser* dengan diameter yang lebih besar secara memiliki luas permukaan membran atau pori-pori yang lebih luas untuk menghasilkan gelembung udara. Laju transfer oksigen ke dalam air berbanding lurus dengan luas area gelembung-air [5]. Dengan area yang lebih besar,

diffuser 10 inch mampu menghasilkan lebih banyak gelembung halus (*s*), sehingga meningkatkan area kontak untuk reaksi oksidasi besi terjadi. Pemasangan *diffuser* pada diameter yang lebih besar memungkinkan gelembung udara memiliki karakteristik ukuran dan kecepatan naik yang berbeda, sehingga waktu kontak antara oksigen dan polutan di dalam kolom air sebelum mencapai permukaan menjadi lebih cepat [11].

Kombinasi dari luas area yang lebih besar, waktu kontak yang optimal, dan tekanan hidrostatik yang lebih menguntungkan ini membuat transfer oksigen oleh *diffuser* 10 inch menjadi lebih efisien, sehingga proses oksidasi besi berlangsung lebih cepat dan tuntas. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa waktu aerasi merupakan faktor dalam efisiensi penurunan parameter Fe, dan pemilihan diameter *diffuser* yang lebih besar 10 inch memberikan kinerja yang lebih unggul. Untuk aplikasi praktis, pemilihan *diffuser* 10 inch dapat merepresentasikan penghematan waktu operasional dan energi dalam jangka panjang untuk mencapai target kualitas air yang diinginkan.

Hasil Uji Adsorpsi Kolom

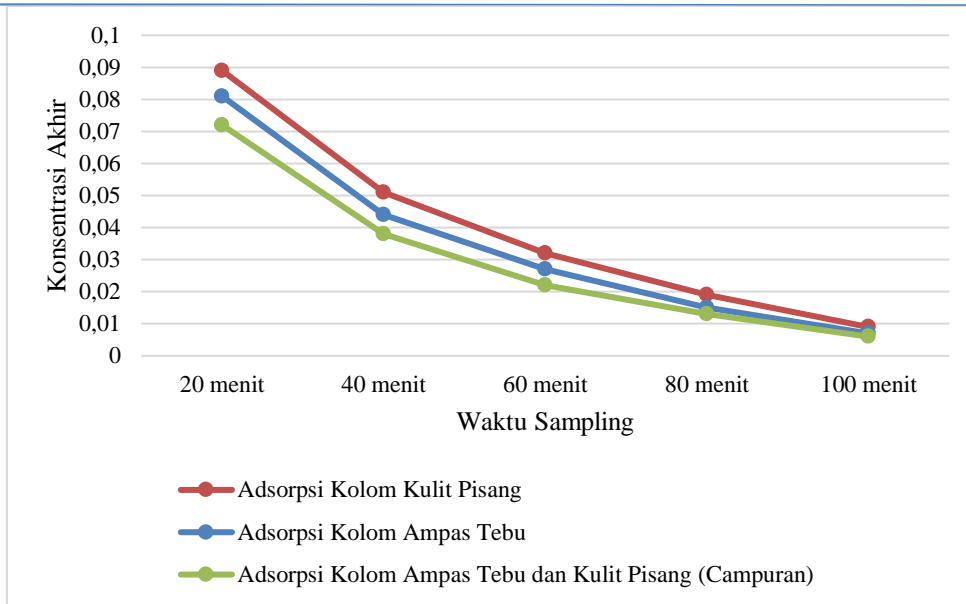
Berdasarkan data dari tabel dibawah, hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa proses adsorpsi kolom menggunakan media Ampas Tebu, Kulit Pisang, serta Campuran Ampas Tebu dan Kulit Pisang setelah melalui tahap aerasi dengan *Fine Bubble Diffuser* berdiameter 8 inch dan 10 inch mampu menurunkan konsentrasi parameter Besi (Fe) secara bertahap seiring dengan bertambahnya waktu kontak. Data hasil pengukuran tersebut selanjutnya diolah dan dianalisis untuk menggambarkan kinerja proses adsorpsi dalam bentuk grafik konsentrasi akhir dan persen removal, yang merepresentasikan persentase penurunan konsentrasi Fe terhadap waktu adsorpsi. Berikut ini gambar persen removal parameter Fe

Tabel 2. Penurunan Parameter Fe Setelah Proses Adsorpsi dengan menggunakan Adsorben Tebu, Kulit Pisang dan Campuran

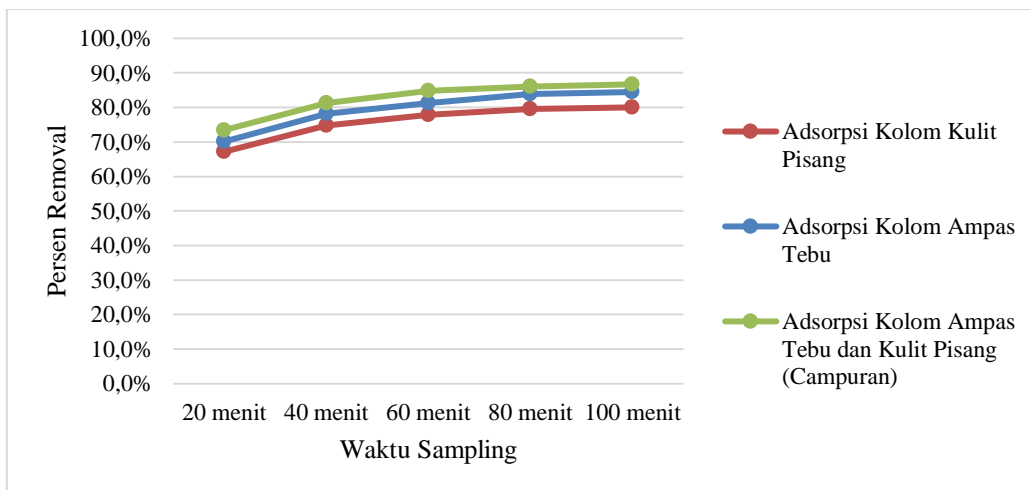
Sampel	Waktu Sampling	Kadar Parameter Fe (mg/l)		Persen removal	
		8 inch	10 inch	8 inch	10 inch
Adsorpsi Kolom Ampas Tebu	20 menit	0.081	0.073	70.1%	71.3%
	40 menit	0.044	0.039	78.2%	78.7%
	60 menit	0.027	0.024	81.3%	81.1%
	80 menit	0.015	0.013	83.9%	83.5%
	100 menit	0.007	0.005	84.4%	83.9%
Adsorpsi Kolom Kulit Pisang	20 menit	0.089	0.081	67.2%	68.1%
	40 menit	0.051	0.045	74.8%	75.4%
	60 menit	0.032	0.029	77.8%	77.2%
	80 menit	0.019	0.016	79.6%	79.7%
	100 menit	0.009	0.006	80.0%	80.6%
Adsorpsi Kolom Ampas Tebu dan Kulit Pisang (Campuran)	20 menit	0.072	0.063	73.4%	75.2%
	40 menit	0.038	0.034	81.2%	81.4%
	60 menit	0.022	0.020	84.7%	84.3%
	80 menit	0.013	0.011	86.0%	86.1%
	100 menit	0.006	0.004	86.7%	87.1%

Sumber: Data Penelitian

Adapun grafik hasil dari penelitian Adsorpsi menggunakan Adsorben Kulit Pisang, Ampas Tebu dan Campuran (Kulit Pisang dan Ampas Tebu) terkait penurunan kadar parameter Fe dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Grafik Konsentrasi Akhir Parameter Fe Setelah Proses Adsorpsi dengan menggunakan Adsorben Tebu, Kulit Pisang dan Campuran dengan Diameter *Fine Bubble Diffuser* 8 Inch
Sumber: Data Penelitian



Gambar 5. Grafik Persen Removal Akhir Parameter Fe Setelah Proses Adsorpsi dengan menggunakan Adsorben Tebu, Kulit Pisang dan Campuran dengan Diameter *Fine Bubble Diffuser* 8 Inch
Sumber: Data Penelitian

Berdasarkan data yang diperoleh, waktu kontak merupakan faktor yang secara signifikan mempengaruhi efisiensi proses adsorpsi kolom dalam menurunkan konsentrasi besi (Fe). Prinsipnya, semakin lama waktu kontak antara adsorbat (ion Fe) dan adsorben, semakin besar peluang terjadinya perpindahan massa dan penyerapan pada situs aktif permukaan adsorben hingga mencapai titik jenuh [12]. Data penurunan konsentrasi Fe pada ketiga kolom adsorben menunjukkan pola eksponensial, di mana penurunan paling drastis terjadi pada waktu awal (0-40 menit). Hal ini disebabkan oleh ketersediaan situs aktif adsorben yang masih sangat banyak pada fase awal proses, sehingga laju adsorpsi berlangsung sangat cepat. Seiring berjalannya waktu, situs aktif tersebut mulai terisi, gradien konsentrasi menurun, dan proses adsorpsi melambat hingga mencapai kondisi kesetimbangan[13].

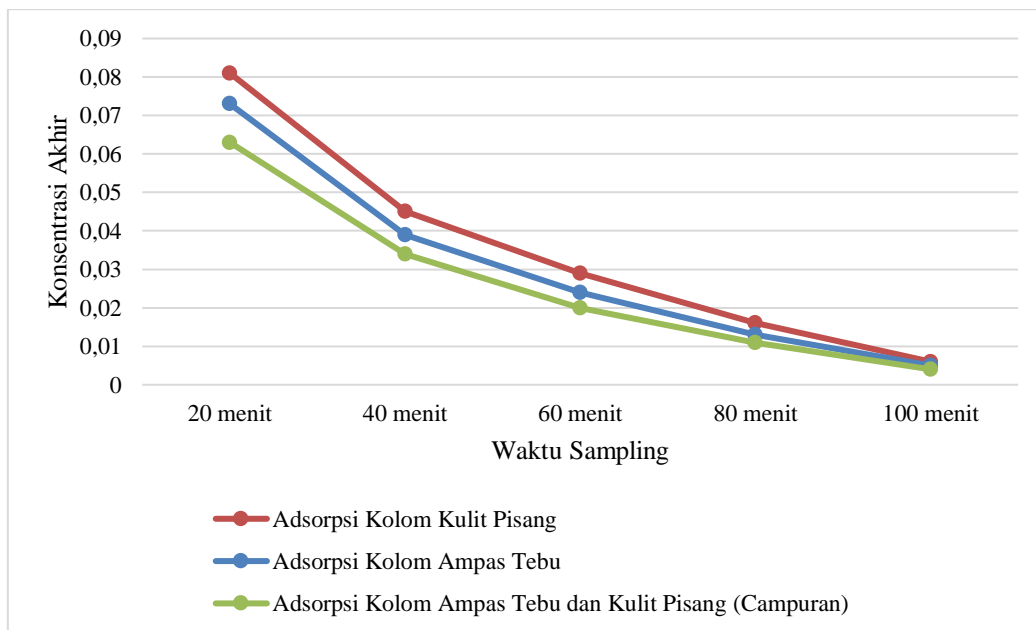
Dari ketiga konfigurasi adsorben yang diuji, terlihat perbedaan kinerja yang cukup jelas dalam menurunkan konsentrasi Fe. Kolom Kulit Pisang menunjukkan konsentrasi Fe di penurunan kadar 0,089 mg/l pada menit ke-20 dengan persen removal 67,2% dan 0,009 mg/l pada menit ke-100 mencapai efisiensi penyerapan terendah, yaitu 80,0% pada akhir pengamatan. Ini mengindikasikan bahwa kulit pisang, meskipun efektif dan mengandung senyawa pektin, hemiselulosa, dan lignin, memiliki kapasitas adsorpsi

yang lebih rendah. Kemungkinan hal ini disebabkan oleh struktur fisiknya yang kurang kompak dalam kolom, kepadatan situs aktif yang lebih rendah, atau karakteristik pori dan gugus fungsi yang kurang optimal untuk menyerap ion Fe dalam sistem aliran kontinu [14].

Kolom Ampas Tebu menunjukkan kinerja yang lebih baik, dengan konsentrasi Fe yang lebih rendah pada setiap pengukuran 0,081 mg/l pada menit ke-20 dengan persen removal 70,1% dan 0,007 mg/l pada menit ke-100 mencapai efisiensi 84,4% pada menit ke-100. Ampas tebu (*bagasse*) merupakan biomassa lignoselulosa yang kaya akan selulosa dan hemiselulosa, yang menyediakan berbagai gugus fungsi seperti hidroksil, karboksil, dan fenolik yang dapat mengikat logam [15]. Struktur fisiknya yang berserat dan berpori juga memberikan area kontak yang lebih baik bagi ion Fe.

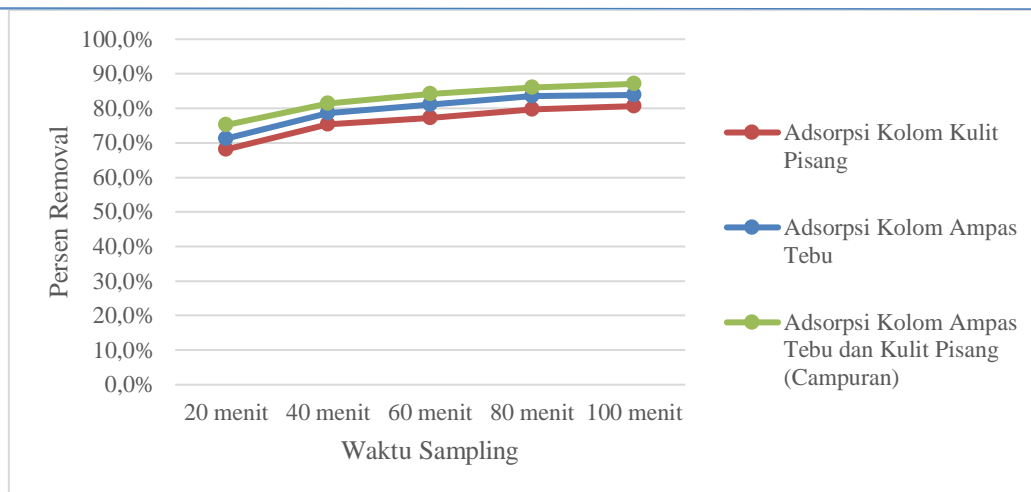
Kolom Campuran (Ampas Tebu dan Kulit Pisang) terbukti sebagai yang paling efektif, dengan nilai konsentrasi terendah 0,072 mg/l pada menit ke-20 dengan persen removal 73,4% dan 0,006 mg/l pada menit ke-100 efisiensi tertinggi sebesar 86,7%. Keefektifan kolom campuran ini dapat dijelaskan melalui konsep adsorben. Kombinasi dua material yang berbeda memungkinkan menciptakan struktur berlapis dalam kolom yang lebih kompleks dan kompak, sehingga mengurangi terjadinya *channeling* (pembentukan saluran) yang membuat air limbah tidak terkontak sempurna dengan adsorben. Selain itu, campuran ini menggabungkan keunggulan gugus fungsi dari masing-masing adsorben, menciptakan lebih banyak variasi situs aktif untuk mengikat ion Fe dengan mekanisme yang berbeda-beda, sehingga memperluas area permukaan efektif dan meningkatkan kapasitas ikat [13].

Berdasarkan analisis data, dapat disimpulkan bahwa waktu kontak berbanding lurus dengan efisiensi penurunan Fe hingga mendekati titik jenuh. Di antara ketiga adsorben, Kolom Kombinasi Ampas Tebu dan Kulit Pisang menunjukkan performa terbaik, baik dari segi efisiensi akhir maupun laju adsorpsi pada fase awal, diikuti oleh Kolom Ampas Tebu, dan kemudian Kolom Kulit Pisang. Keunggulan kolom kombinasi dikarenakan berasal dari efek penggabungan antara kedua material yang menciptakan adsorpsi dalam kolom yang lebih optimal, baik dari segi distribusi aliran, pemanfaatan situs aktif, maupun variasi mekanisme penjerapan ion Fe.



Gambar 6. Grafik Konsentrasi Akhir Parameter Fe Setelah Proses Adsorpsi dengan menggunakan Adsorben Tebu, Kulit Pisang dan Campuran dengan Diameter *Fine Bubble Diffuser* 10 Inch

Sumber: Data Penelitian



Gambar 7. Grafik Persen Removal Parameter Fe Setelah Proses Adsorpsi dengan menggunakan Adsorben Tebu, Kulit Pisang dan Campuran dengan Diameter *Fine Bubble Diffuser* 10 Inch
 Sumber: Data Penelitian

Berdasarkan data kinetika adsorpsi yang diperoleh, waktu kontak memegang peranan kritis dalam menentukan efisiensi penurunan konsentrasi besi (Fe) oleh ketiga jenis adsorben kolom. Prinsipnya, semakin lama waktu kontak antara larutan dengan media adsorben di dalam kolom, semakin banyak molekul Fe yang memiliki kesempatan untuk berdifusi menuju permukaan pori-pori adsorben dan terikat pada situs aktifnya [12]. Dari pola penurunan konsentrasi Fe yang bersifat eksponensial terhadap waktu pada semua adsorben. Pada 20 menit pertama, terjadi penurunan konsentrasi yang sangat signifikan, menunjukkan bahwa situs aktif adsorben masih sangat banyak tersedia dan proses adsorpsi berlangsung cepat. Seiring berjalannya waktu, laju penurunan konsentrasi melambat, yang mengindikasikan bahwa situs aktif tersebut mulai jenuh dan gradien konsentrasi antara larutan dengan permukaan adsorben mengecil [13].

Dalam, Adsorben Kolom Kulit Pisang mencatat konsentrasi Fe pada waktu 0,081 mg/l pada menit-20 persen removal 68.1% hingga 0,006 mg/l pada menit-100 persen removal 80,6%, yang mengindikasikan kapasitas adsorpsi yang lebih rendah dibandingkan dengan kedua adsorben lainnya. Meskipun kulit pisang mengandung gugus fungsi seperti karboksil dan hidroksil yang dapat mengikat logam [16], struktur fisik dan porositasnya kurang optimal untuk aliran kontinu dalam kolom, sehingga waktu residu dan difusi internal menjadi kurang efisien. Efisiensi yang dicapai yaitu 80,6% pada akhir pengamatan.

Sebaliknya, Adsorben Kolom Ampas Tebu menunjukkan kinerja yang lebih baik dengan konsentrasi Fe yang lebih rendah pada titik waktu 0,073 mg/l persen removal 71,3% pada menit-20 hingga 0,005 mg/l pada menit-100 dan mencapai efisiensi 83,9%. Ampas tebu (*bagasse*) memiliki struktur berserat dan berpori yang dapat membentuk kerapatan dan distribusi aliran yang lebih baik. Serat selulosanya menyediakan sejumlah situs aktif untuk pengikatan ion logam [17], sehingga efisiensi penyisihannya lebih tinggi.

Namun, adsorben kolom campuran (ampas tebu dan kulit pisang) terbukti yang paling efektif, secara konsisten menghasilkan konsentrasi Fe terendah di sepanjang proses 0,063 mg/l persen removal 73,4% pada menit-20 hingga 0,004 pada menit-100 dan mencapai efisiensi tertinggi 87,1% pada menit ke-100. Keunggulan ini dikarenakan berasal dari efek penggabungan antara kedua material. Ampas tebu, dengan struktur fisiknya yang kokoh dan berpori, berfungsi sebagai mencegah pemadatan berlebihan dan menciptakan jalur aliran yang lebih optimal. Sementara itu, partikel kulit pisang yang penurunan di dalam ampas tebu menyumbang gugus fungsi tambahan untuk mengikat Fe. Kombinasi ini menciptakan lingkungan di dalam kolom yang tidak hanya memiliki kapasitas adsorpsi tinggi tetapi juga karakteristik hidrodinamik, sehingga memaksimalkan kontak antara Fe dan seluruh situs aktif yang tersedia [18].

Menurut, Srivastava et al [19] dan Wiranata et al [20], kombinasi dua adsorben lignoselulosa yang berbeda dapat menciptakan struktur pori yang lebih kompleks dan heterogen serta menyediakan variasi gugus fungsi (seperti karboksil, hidroksil, dan fenolik) yang lebih beragam. Ampas tebu yang mungkin memiliki pori-pori berukuran lebih besar dapat berfungsi sebagai jalur difusi awal, sementara kulit pisang menyediakan lebih banyak gugus fungsi spesifik untuk pengikatan.

Dapat disimpulkan bahwa meskipun kedua adsorben tunggal (ampas tebu dan kulit pisang) memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mengadsorpsi ion Fe, adsorben campuran antara ampas tebu dan kulit pisang terbukti paling efektif. Ke-efektifannya ditunjukkan bukan hanya oleh nilai efisiensi akhir yang tertinggi, tetapi juga oleh kinerjanya yang lebih unggul sepanjang durasi proses yang mengindikasikan kapasitas dan kinetika adsorpsi yang lebih baik.

4. Kesimpulan

Dalam penurunan kandungan parameter Fe aerasi sangat efektif menurunkan Fe pada menit ke-100 dengan persen removal 91,4% - 94,1%, namun proses adsorpsi memberikan hasil yang lebih stabil pada menit-menit awal. Kolom campuran merupakan yang terbaik, mencapai removal 86,7% - 87,1% pada menit ke-100. Dapat disimpulkan untuk proses aerasi sangat efektif dalam menurunkan parameter Fe dengan persen removal mencapai 91,4% - 94,1%. Kombinasi aerasi *Fine Bubble Diffuser* diikuti dengan adsorpsi kolom campuran merupakan kombinasi 2 proses yang saling terhubung. Ini memanfaatkan efisiensi tinggi aerasi sebagai tahap utama dan efektivitas media Adsorben sebagai tahap proses di akhir setelah aerasi. Hal ini akan menghasilkan efisiensi penyisihan total yang sangat tinggi, serta lebih mempermudah dalam proses adsorpsi dikarenakan sebelum masuk ke dalam proses adsorpsi dilakukan proses aerasi terlebih dahulu.

5. Daftar Pustaka

- [1] Apriani, R. (2018). Efektivitas Pendapatan Usaha pada Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Tirta Musi Kota Palembang. *Jurnal Studi Sosial dan Politik*, 2(2), 85–89.
- [2] Dmitry, P., 2019. *Iron and Its Compounds in the Earth's Core: New Data and Ideas*. *Geochemistry International* 57, 941–955.
- [3] Mastiani, N., Amalia, V., Rosahdi, T.D., 2018. Potensi Penggunaan Tempurung Kelapa sebagai Adsorben Ion Logam Fe(III). *al Kimiya: Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan* 5, 42–47. <https://doi.org/10.15575/ak.v5i1.3731>
- [4] Hossain, M.A., Haque, M.I., Parvin, M.A., Islam, M.N., 2023. *Evaluation of iron contamination in groundwater with its associated health risk and potentially suitable depth analysis in Kushtia Sadar Upazila of Bangladesh*. *Groundwater for Sustainable Development* 21, 100946. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100946>
- [5] Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*.
- [6] Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *Water Treatment: Principles and Design* (3rd ed.).
- [7] Santos, S. C. R., Vaghetti, J. C. P., & Lima, E. C. (2019). *Use of sugarcane bagasse as a low-cost adsorbent in the removal of turbidity and pollutants from water*. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100323.
- [8] Abdullah, M., Suryani, A., & Putra, R. H. (2017). Pemanfaatan kulit pisang sebagai adsorben untuk penurunan kadar logam berat dalam air limbah. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18(1), 45–52..
- [9] Hasanah, H., Sirait, R., & Lubis, R. Y. (2022) Pengaruh Konsentrasi Aktivator H₃PO₄ Terhadap Karbon Aktif Ampas Tebu. *Journal Online Of Physics*, 8(1):11-15.
- [10] Sariwahyuni. Yusuf, A. A., Khulwa, S. M., Latifah. (2023). Pemanfaatan Karbon Aktif Kulit Pisang (Musa Paradisiacara R) Sebagai Adsorben Untuk Menyisihkan Padatan Terlarut dan Logam Besi (FE) Pada Air Sungai Tello. *Politeknik ATI Makassar. JTKM 2* (2): 93-97..
- [11] Rosso, D., Iranpour, R., & Stenstrom, M. K. (2011). Oxygen transfer efficiency in diffused aeration systems. *Water Research*, 45(1), 1–14.
- [12] Gupta, S. S., & Bhattacharyya, K. G. (2011). *Kinetics of adsorption of metal ions on inorganic materials: A review*. *Advances in Colloid and Interface Science*, 162(1–2), 39–58.
- [13] Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). *Insights into the modeling of adsorption isotherm systems*. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- [14] Njoku, V. O., Foo, K. Y., Asif, M., & Hameed, B. H. (2014). *Preparation of activated carbons from rambutan (Nephelium lappaceum) peel by microwave-induced KOH activation for acid yellow 17 dye adsorption*. *Chemical Engineering Journal*, 250, 198–204..
- [15] Sousa, F. W., Oliveira, A. G., Ribeiro, J. P., Rosa, M. F., Keukeleire, D., & Nascimento, R. F. (2010). *Green coconut shells applied as adsorbent for removal of toxic metal ions using fixed-bed column*. *Journal of Environmental Management*, 91(8), 1634–1640.
- [16] Mohan, D., & Pittman Jr., C. U. (2011). *Activated carbons and low-cost adsorbents for remediation of water pollution: A review*. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1–2), 1–53.

- [17] Ibrahim, S., Wang, S., & Ang, H. M. (2012). *Removal of emulsified oil from oily wastewater using agricultural waste biomass*. *Journal of Hazardous Materials*, 213–214, 295–302..
- [18] Ali, I. (2012). *New generation adsorbents for water treatment*. *Chemical Reviews*, 112(10), 5073–5091.
- [19] Srivastava, S., Agrawal, S. B., & Mondal, M. K. (2019). *A review on progress of heavy metal removal using adsorbents of biological origin*. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 11031–11045..
- [20] Wiranata, A., Warmadewanthi, I. D. A. A., & Bagastyo, A. Y. (2020). *Removal of iron (Fe) from groundwater using adsorption process with agricultural waste-based adsorbent*. *Journal of Ecological Engineering*, 21(6), 1–9.
- [21] Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 09/PRT/M/2015 Tahun 2015 tentang Penggunaan Sumber Daya Air.