

Efektivitas Hydrochar Serbuk Kayu Sengon sebagai Adsorben dalam Menurunkan Kadar Antibiotik Enrofloxacin pada Limbah Cair

Islamiyatur Rosida¹, Muchammad Tamyiz²

^{1,2}Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Nahdlatul Ulama Sidoarjo
Jl. Lingkar Timur KM 5,5, Rangkah Kidul, Kec. Sidoarjo, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur 61234
Email: m_tamyiz.tkl@unusida.ac.id

ABSTRAK

Enrofloxacin merupakan antibiotik yang berpotensi mencemari lingkungan perairan karena bersifat persisten dan sulit terdegradasi secara alami. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas hydrochar berbahan serbuk kayu sengon sebagai adsorben untuk menyisihkan enrofloxacin serta menentukan kondisi optimum berdasarkan ukuran partikel, waktu kontak, pH, konsentrasi awal, dan dosis adsorben. Hydrochar diproduksi melalui hidrotermal karbonisasi pada suhu 200°C selama 10 jam, kemudian dikarakterisasi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Konsentrasi sisa enrofloxacin dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis untuk menghitung efisiensi penyisihan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hydrochar berukuran 160 mesh memiliki kemampuan adsorpsi terbaik dan digunakan pada pengujian lanjutan. Variasi waktu kontak memperlihatkan bahwa efisiensi adsorpsi meningkat hingga mencapai nilai maksimum 48,69% pada menit ke-30. Kondisi pH netral, yaitu pH 7, menghasilkan penyerapan terbaik. Pada variasi konsentrasi awal, konsentrasi 5 mg/L memberikan persentase penyisihan tertinggi, sedangkan peningkatan konsentrasi menurunkan efisiensi akibat keterbatasan situs aktif adsorben. Peningkatan dosis hydrochar meningkatkan efisiensi adsorpsi hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Pengujian triplo menunjukkan hasil yang konsisten dan presisi. Analisis FTIR mengidentifikasi gugus hidroksil, karbonil, aromatik, C–O, dan C–O–C yang berperan dalam adsorpsi melalui ikatan hidrogen, interaksi elektrostatik, dan interaksi π – π . Temuan ini menunjukkan bahwa karakteristik permukaan, ketersediaan gugus fungsi, dan kondisi operasional secara bersama-sama memengaruhi kapasitas penyerapan, sehingga optimasi parameter diperlukan untuk memperoleh kinerja pengolahan limbah antibiotik yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan. Dengan demikian, hydrochar serbuk kayu sengon berpotensi menjadi adsorben alternatif yang ramah lingkungan untuk menyisihkan enrofloxacin dari larutan.

Katakunci: Hydrochar, Serbuk kayu sengon, *Enrofloxacin*, Adsorpsi, *Hydrothermal carbonization*, Limbah antibiotik.

ABSTRACT

*Enrofloxacin is an antibiotic that poses a risk of contaminating aquatic environments due to its persistence and resistance to natural degradation. This study aimed to evaluate the effectiveness of hydrochar derived from *Sengon* wood powder as an adsorbent for removing enrofloxacin and to determine optimal conditions regarding particle size, contact time, pH, initial concentration, and adsorbent dosage. The hydrochar was produced via hydrothermal carbonization at 200°C for 10 hours and subsequently characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Residual enrofloxacin concentrations were analyzed using a UV-Vis spectrophotometer to calculate removal efficiency. The results indicated that 160-mesh hydrochar exhibited the best adsorption capacity and was selected for further testing. Experiments on contact time showed that adsorption efficiency increased to a maximum of 48.69% at 30 minutes. Neutral pH (pH 7) yielded the best adsorption performance. Regarding initial concentration, 5 mg/L resulted in the highest removal percentage, while higher concentrations reduced efficiency due to the limited availability of active adsorption sites. Increasing the hydrochar dosage enhanced adsorption efficiency until equilibrium was reached. Triplicate testing demonstrated consistent and precise results. FTIR analysis identified hydroxyl, carbonyl, aromatic, C–O, and C–O–C groups, which facilitate adsorption through hydrogen bonding, electrostatic interactions, and π – π interactions. These findings demonstrate that surface characteristics, functional group availability, and operational conditions collectively influence adsorption capacity; thus, parameter optimization is essential to achieve more effective, efficient, and sustainable antibiotic wastewater treatment. Consequently, *Sengon* wood powder hydrochar shows potential as an eco-friendly alternative adsorbent for removing enrofloxacin from solution..*

Keywords: Hydrochar, Sengon wood sawdust, *Enrofloxacin*, Adsorption, *Hydrothermal carbonization*, Antibiotic waste.

Pendahuluan

Penggunaan antibiotik di bidang kesehatan dan peternakan terus meningkat karena upaya mengobati berbagai penyakit infeksi yang disebabkan oleh bakteri. Antibiotik yang sering digunakan adalah *enrofloxacin*, termasuk dalam golongan fluoroquinolone, yang bisa mengatasi berbagai jenis bakteri, termasuk bakteri berwarna biru kehijauan (Gram positif) dan bakteri berwarna ungu (Gram negatif) [1]. Meskipun *enrofloxacin* efektif digunakan untuk mengobati, sebagian dari obat ini tidak sepenuhnya dicerna oleh tubuh, sehingga sisa obatnya dikeluarkan melalui urine dan tinja. Sisa-sisa tersebut kemudian masuk ke dalam limbah cair yang berasal dari peternakan, rumah sakit, industri farmasi, dan limbah rumah tangga [2]. *Enrofloxacin* memiliki sifat yang cukup kuat sehingga tidak mudah hancur secara alami dan bisa menumpuk di lingkungan air. Adanya sisa antibiotik dapat menyebabkan bakteri menjadi tahan terhadap antibiotik, mengacaukan keseimbangan lingkungan air, dan meningkatkan kemungkinan terjadinya polusi lingkungan [3].

Berbagai cara telah ditemukan untuk menghilangkan sisa antibiotik di limbah cair, contohnya metode biologis, teknologi membran, serta proses *Advanced Oxidation Processes* (AOPs). Namun, metode tersebut masih memiliki beberapa kekurangan, seperti biaya operasional yang mahal, kebutuhan energi yang besar, serta efisiensi yang berbeda-beda tergantung pada jenis antibiotiknya. Oleh karena itu, adsorpsi menjadi salah satu metode yang sangat menjanjikan karena prosesnya tidak terlalu rumit, biaya yang digunakan tidak terlalu mahal, kemampuan menghilangkan polutan cukup baik, dan cara penerapannya cukup mudah dalam penanganan limbah cair [4]. Salah satu adsorben yang dikembangkan dari bahan biomassa adalah *hydrochar*, yaitu suatu bahan karbon yang dihasilkan dari proses *hydrothermal carbonization* (HTC). *Hydrochar* memiliki gugus fungsi yang aktif dan struktur berpori, sehingga bisa digunakan untuk menyerap berbagai senyawa organik, termasuk antibiotik [5].

Penelitian sebelumnya sudah banyak mencatat penggunaan berbagai jenis biomassa, seperti sekam padi, tongkol jagung, tempurung kelapa, bambu, serta limbah pertanian lainnya, sebagai bahan dasar untuk membuat biochar atau *hydrochar*. Bahan ini digunakan untuk menyerap berbagai jenis polutan, termasuk senyawa antibiotik [6]. Namun, penelitian yang khusus menggunakan *hydrochar* dari serbuk kayu sengon (*Paraserianthes falcataria*) sebagai bahan penyerap untuk menghilangkan *enrofloxacin* masih sangat sedikit. Selain itu, penelitian yang menganalisis dampak berbagai parameter operasional seperti ukuran partikel, lama kontak, tingkat keasaman, jumlah adsorben, konsentrasi awal *enrofloxacin*, dan tipe air terhadap kinerja adsorpsi *hydrochar* serbuk kayu sengon masih belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi seberapa efektif *hydrochar* serbuk kayu sengon sebagai bahan adsorben dalam menghilangkan *enrofloxacin*, serta menentukan kondisi kerja terbaik berdasarkan variasi ukuran partikel, lama kontak, tingkat keasaman, jumlah adsorben, konsentrasi awal, dan jenis air yang digunakan. Penelitian ini diharapkan bisa berkontribusi dalam mengungkap cara menggunakan serbuk kayu sengon sebagai bahan penyerap alternatif yang ramah lingkungan dan memiliki nilai tambah, terutama dalam mengolah limbah yang mengandung antibiotik.

Selain memberikan kontribusi ilmiah terkait pemanfaatan *hydrochar* serbuk kayu sengon sebagai alternatif adsorben, penelitian ini juga memberikan manfaat praktis dalam pengelolaan limbah cair yang mengandung antibiotik. *Hydrochar* yang dibuat dari limbah serbuk kayu sengon bisa menjadi adsorben yang ramah lingkungan karena menggunakan limbah biomassa yang tersedia dalam jumlah banyak dan memiliki nilai ekonomi yang rendah. Penggunaan bahan ini diharapkan bisa membantu menurunkan konsentrasi *enrofloxacin* dalam limbah cair, sehingga mengurangi bahaya pencemaran terhadap lingkungan air dan mendukung terwujudnya teknologi pengolahan limbah yang lebih ramah lingkungan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *hydrochar* serbuk kayu sengon memiliki potensi sebagai adsorben alternatif yang ramah untuk penyisihan *enrofloxacin* dari limbah cair. Menggunakan serbuk kayu sengon sebagai bahan dasar adsorben dapat meningkatkan nilai limbah biomassa dan membantu memajukan teknologi pengolahan limbah cair yang lebih ramah lingkungan. Meskipun begitu, penelitian lebih lanjut mengenai regenerasi adsorben, analisis kecepatan reaksi, isoterma, dan termodinamika masih diperlukan agar penerapannya bisa dilakukan secara lebih luas.

Metode Penelitian

Penelitian ini berlangsung selama tiga bulan, dari bulan April sampai Juni 2026, dan melibatkan tiga laboratorium yang berbeda agar setiap tahap pengujian bisa dilakukan dengan baik dan maksimal. Proses pembuatan *hydrochar* dan pengujian kemampuan adsorpsinya dilakukan di Laboratorium Lingkungan Universitas Nahdlatul Ulama Sidoarjo. Selanjutnya, untuk mengetahui sifat dan karakteristik air, pengujian dilakukan di laboratorium yang dimiliki Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Mojokerto. Sementara itu, untuk menganalisis struktur dan kelompok fungsi dari bahan tersebut, teknik *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) digunakan di Laboratorium Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Ada empat jenis air yang digunakan sebagai sampel dalam penelitian ini, yaitu air hujan, air aquades, air PDAM, dan air sungai. Semua sampel tersebut diambil pada tanggal 28 April 2026 dari berbagai tempat yang berada di sekitar area Jawa Timur.

Pada awal penelitian ini, fokusnya adalah pada pembuatan *hydrochar* menggunakan metode hidrotermal karbonisasi (HTC). Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan yang disajikan pada gambar di bawah ini:



Gambar 1. Diagram alur tahapan penelitian pembuatan *hydrochar* serbuk kayu sengon dan pengujian adsorpsi *enrofloxacin*

Berdasarkan gambar di atas, penelitian dimulai dengan persiapan bahan baku yaitu serbuk kayu sengon yang telah dikeringkan, dihaluskan, dan diayak sesuai dengan variasi ukuran partikel yang berbeda, yaitu 120 mesh, 140 mesh, dan 160 mesh. Setelah itu, serbuk kayu sengon diolah menggunakan metode Hydrothermal Carbonization (HTC) dengan suhu 200°C selama 10 jam untuk menghasilkan *hydrochar*. *Hydrochar* yang didapatkan selanjutnya dicuci sampai mencapai pH yang netral, lalu dikeringkan terlebih dahulu sebelum dilakukan pengujian dengan menggunakan teknik *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Langkah selanjutnya adalah melakukan uji adsorpsi terhadap limbah antibiotik *enrofloxacin* dengan memvariasikan ukuran partikel, durasi kontak, tingkat keasaman atau kebasaaan larutan, jumlah adsorben yang digunakan, konsentrasi awal *enrofloxacin*, serta jenis air yang digunakan. Seluruh hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui seberapa efektif *hydrochar* serbuk kayu sengon dalam menyerap, berdasarkan nilai efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsinya.

Menimbang 2 gram serbuk kayu sengon, lalu dicampurkan dengan 40 mL air suling hingga diperoleh perbandingan biomassa terhadap air sebesar 1:20 (b/v) [7]. Penambahan aquades berperan sebagai bahan bantu reaksi dalam proses hidrotermal karbonisasi (HTC), yang membantu terjadinya reaksi hidrolisis, dehidrasi, dan dekarboksilasi, sehingga biomassa lignoselulosa berubah menjadi bahan karbon (*hydrochar*) [8]. Setelah bahan campuran siap, sampel dimasukkan ke dalam reaktor hidrotermal, lalu dipanaskan dengan suhu 200°C selama 10 jam sesuai dengan kondisi yang digunakan dalam penelitian tersebut. Proses pemanasan dilakukan pada suhu dan waktu tertentu agar dapat meningkatkan pembentukan *hydrochar* dari serbuk kayu sengon. Setelah proses hidrotermal selesai, *hydrochar* disaring dan dicuci dengan air aquades sampai air hasil penyaringan tampak bening. Selanjutnya, *hydrochar* dikeringkan kembali menggunakan oven dengan suhu 100°C selama 3 jam agar kadar airnya berkurang, sehingga sampel menjadi siap untuk dilakukan proses karakterisasi. Pengeringan sampel sebelum dilakukan karakterisasi adalah langkah yang biasanya dilakukan dalam proses persiapan material karbon. Serbuk kayu sengon yang digunakan dalam penelitian ini dibuat dalam tiga ukuran partikel yang berbeda, yaitu 120, 140, dan 160 mesh, agar bisa diketahui bagaimana pengaruh ukuran partikel tersebut terhadap sifat-sifat *hydrochar* dan kemampuan *hydrochar* dalam menyerap *enrofloxacin*.

Langkah berikutnya adalah melakukan pengujian untuk menentukan ukuran partikel yang terbaik. 8 mg hidrokarbon dicampurkan ke dalam 8 mL larutan *enrofloxacin* (ENR). Untuk mengaduk campuran secara merata, campuran tersebut dicampur menggunakan alat *ultrasonic cleaner* selama tiga menit. Campuran dimasukkan ke dalam *magnetic stirrer* kemudian diaduk menggunakan batang *magnetic stirrer* pada suhu ruangan. Pengambilan sampel dilakukan enam kali, masing-masing dengan volume 1 mL. Sampel pertama diambil setelah campuran diaduk selama 13 menit menggunakan pipet ukur, lalu dimasukkan ke dalam tabung *Eppendorf Icon*. Selanjutnya, sampel kedua diambil 10 menit setelah sampel pertama, yaitu pada menit ke-23. Pengambilan sampel ketiga, keempat, kelima, dan keenam dilakukan setiap 10 menit, sehingga waktu pengambilan berada pada menit ke-33, 43, 53, dan 63. Interval waktu tersebut digunakan untuk memantau perubahan konsentrasi *enrofloxacin* secara bertahap selama proses adsorpsi, sehingga dapat diamati dengan lebih jelas bagaimana laju penyerapan dan kecenderungan menuju kondisi kesetimbangan [9].

Setiap sampel yang diambil kemudian dipisahkan dengan cara di-*centrifugasi* selama 1 sampai 3 menit agar *hydrochar* terpisah dari larutan. Filtrat yang dihasilkan kemudian dianalisis menggunakan alat UV-Vis spektrofotometer pada panjang gelombang 340 nm untuk mengetahui kadar *enrofloxacin* yang tersisa setelah proses adsorpsi selesai. Bagian yang memiliki bentuk cair (filtrat) kemudian dianalisis menggunakan alat UV-Vis dengan panjang gelombang 324 nm. Dari uji coba tersebut, *hydrochar* berukuran 160 mesh terbukti memiliki kemampuan menyerap yang terbaik dan paling konsisten. Oleh karena itu, ukuran tersebut ditentukan sebagai bahan penyerap utama untuk semua tahap pengujian berikutnya. Pada tahap ini, beberapa variabel yang dianalisis meliputi: tingkat keasaman atau pH larutan yaitu 3, 5, 7, 9, dan 11, konsentrasi awal larutan ENR sebesar 5, 10,

15, 20, dan 25 mg/L, jumlah adsorben yang digunakan yaitu 0,5, 1, 1,5, 2, dan 2,5 mg per 10 mL larutan, durasi waktu kontak antara 3 hingga 180 menit, serta pengaruh jenis air yang digunakan seperti air hujan, Aquades, air PDAM, dan air sungai. Sebagai penutup, untuk mengetahui seberapa efektif proses adsorpsi tersebut, kita perlu memeriksa konsentrasi ENR sebelum dan setelah proses adsorpsi berlangsung. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat UV-Vis spektrofotometer pada panjang gelombang 324 nm, kemudian hasilnya dibandingkan dengan kurva kalibrasi yang didapat dari larutan standar. Efisiensi adsorpsi dihitung untuk mengetahui seberapa efektif *hydrochar* dalam menghilangkan *enrofloxacin* dari larutan. Persentase efisiensi adsorpsi diperoleh menggunakan Persamaan.

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

Keterangan:

C_0 = konsentrasi awal *enrofloxacin* (mg/L)

C_t = konsentrasi *enrofloxacin* setelah proses adsorpsi (mg/L)

Persamaan itu sering dipakai untuk menentukan persentase zat yang tertangkap oleh adsorben dengan membandingkan konsentrasi zat sebelum dan setelah larutan berhubungan dengan adsorben [10]. Karakterisasi *hydrochar* dilakukan dengan menggunakan alat *spektroskopi inframerah transformasi Fourier* (FTIR) *Agilent Cary 630* pada rentang bilangan gelombang 4000 hingga 650 cm^{-1} dengan resolusi 16 cm^{-1} [11]. Analisis FTIR bertujuan untuk mengetahui jenis gugus fungsi yang terdapat di permukaan *hydrochar*, sehingga bisa dipahami kemungkinan terjadinya interaksi kimia selama proses penyerapan *enrofloxacin* [10].

Hasil Dan Pembahasan

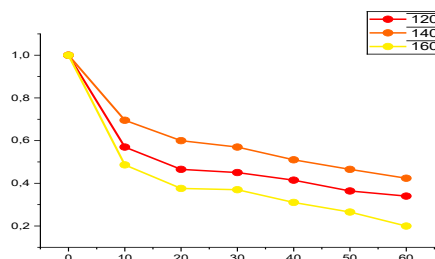
Uji Kinerja Ukuran Partikel *Hydrochar*

Penelitian ini dimulai dengan proses pembuatan *hydrochar* dari serbuk kayu sengon melalui metode *hydrothermal carbonization* (HTC) pada suhu 200°C selama 10 jam [12]. *Hydrochar* yang didapat kemudian diayak menggunakan ukuran partikel 120 mesh, 140 mesh, dan 160 mesh agar bisa mengetahui bagaimana pengaruh ukuran partikel terhadap kemampuan *hydrochar* dalam menyerap *enrofloxacin*. Selanjutnya, *hydrochar* diuji menggunakan larutan *enrofloxacin* sehingga dampak ukuran partikel dapat dilihat secara langsung.

Tabel 1. Uji Kinerja ENR

Waktu	120	140	160
0	1	1	1
10	0,570	0,695	0,486
20	0,465	0,600	0,376
30	0,450	0,570	0,370
40	0,415	0,510	0,310
50	0,364	0,465	0,265
60	0,340	0,424	0,200

Hasil uji coba efektivitas adsorpsi sesuai dengan perubahan ukuran partikel ditampilkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 1. Uji kinerja *hydrochr*

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa setiap ukuran partikel menghasilkan nilai efisiensi adsorpsi yang berbeda. Pada tahap seleksi ukuran partikel, *hydrochar* dengan ukuran 160 mesh menunjukkan hasil adsorpsi yang paling baik dibandingkan ukuran 120 dan 140 mesh, dengan tingkat penghapusan mencapai sekitar 72%. Berdasarkan hasil tersebut, ukuran 160 mesh ditentukan sebagai ukuran yang paling baik dan digunakan dalam semua pengujian berikutnya, termasuk variasi pH, lama kontak, jumlah adsorben, konsentrasi awal *enrofloxacin*, serta jenis air yang digunakan. Oleh karena itu, hasil penghapusan pada pengujian berikutnya tidak dibandingkan

langsung dengan hasil uji ukuran partikel karena setiap pengujian dilakukan dengan kondisi dan tujuan yang berbeda. Perbedaan mesh menunjukkan bahwa ukuran partikel memengaruhi kemampuan *hydrochar* dalam menyerap *enrofloxacin*. Semakin kecil ukuran partikel hidrokarbon, semakin besar luas permukaan yang ada, sehingga jumlah tempat yang bisa bereaksi dengan molekul *enrofloxacin* juga semakin banyak [13]. Permukaan yang lebih luas memudahkan molekul masuk ke pori-pori adsorben dengan cepat, sehingga lebih banyak molekul menempel di permukaan hidrokarbon. Selain itu, partikel yang lebih kecil membuat distribusi pori lebih merata, sehingga kontak antara adsorben dan adsorbat berlangsung lebih efektif [14].

Namun, jika ukuran partikel terlalu kecil, partikel *hydrochar* bisa menggumpal dan menyebabkan beberapa pori tertutup karena partikel tersebut saling menempel. Kondisi tersebut menyebabkan luas permukaan yang bisa digunakan berkurang, sehingga peningkatan efisiensi penyerapan tidak selalu sesuai dengan semakin kecilnya ukuran partikel [14]. Ukuran partikel biomassa memengaruhi pembentukan pori selama proses hidrotermal karbonisasi. Selain itu, *hydrochar* yang ukurannya lebih kecil memiliki kemampuan menyerap antibiotik yang lebih baik karena menyediakan lebih banyak titik penyerapan [11].

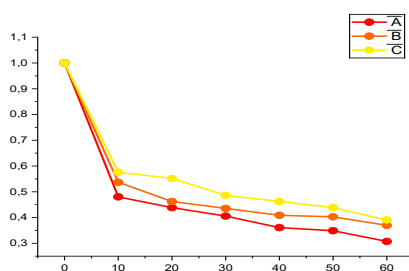
Uji Replikasi (Triplo)

Setelah melakukan uji kinerja, langkah berikutnya adalah melakukan pengujian triplo untuk mengetahui seberapa tepat dan akurat hasil penelitian tersebut. Pengulangan dilakukan tiga kali dalam kondisi terbaik agar dapat mengetahui konsistensi kemampuan *hydrochar* dalam menyerap *enrofloxacin* [15].

Tabel 2. Hasil uji triplo adsorpsi *enrofloxacin*

Waktu	A	B	C	Rata-rata Removal (%)
10	52%	46%	42%	47%
20	56%	54%	45%	52%
30	59%	56%	51%	56%
40	64%	59%	54%	59%
50	65%	60%	56%	60%
60	69%	63%	61%	64%

Berdasarkan hasil uji triplo di atas menunjukkan presentase penyerapan yang cukup serupa pada setiap pengulangan. Nilai-nilai antarulangan masih berbeda dalam rentang yang kecil, sehingga menunjukkan bahwa prosedur penelitian dilakukan secara konsisten. Hasil yang sama pada tiga kali pengulangan menunjukkan bahwa *hydrochar* dari serbuk kayu sengon mampu menyerap *enrofloxacin* dengan kemampuan yang cukup stabil. Hal itu juga menunjukkan bahwa persiapan adsorben, pengaturan kondisi adsorpsi, serta pengukuran dengan menggunakan spektrofotometer sudah dilakukan dengan baik, sehingga menghasilkan data yang dapat dipercaya. Perbedaan kecil yang terjadi di antara ulangan masih dapat dianggap sebagai hal yang normal dalam penelitian laboratorium. Perbedaan tersebut bisa terjadi karena cara pengadukan, ketercampuran larutan, keakuratan dalam menimbang adsorben, serta cara membaca alat ukur. Namun, variasi tersebut tidak berdampak signifikan terhadap tren hasil penelitian secara keseluruhan.



Gambar 2. Grafik hasil uji triplo adsorpsi *enrofloxacin*

Berdasarkan gambar di atas terlihat bahwa pola ketiga pengulangan memiliki kecenderungan yang hampir sama. Kurva pada masing-masing pengulangan menunjukkan peningkatan persentase *removal* yang relatif seragam sehingga membuktikan bahwa *hydrochar* serbuk kayu sengon memberikan hasil adsorpsi yang konsisten. Secara keseluruhan, hasil uji triplo menunjukkan bahwa data penelitian memiliki tingkat presisi yang baik. Hal ini memperkuat bahwa hasil pengujian yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi efektivitas *hydrochar* serbuk kayu sengon sebagai adsorben untuk menyisihkan *enrofloxacin* dari larutan.

Pengaruh pH Terhadap Efektivitas Adsorpsi *Enrofloxacin*

Derajat keasaman atau pH merupakan salah satu faktor yang memengaruhi hasil dari proses adsorpsi karena dapat mengubah sifat permukaan adsorben serta bentuk cara senyawa *enrofloxacin* berada dalam larutan.

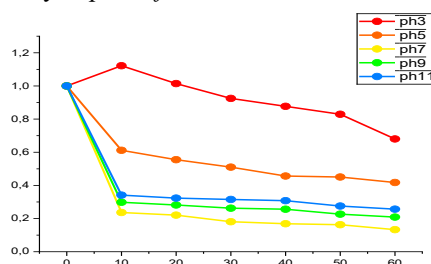
Perubahan pH menyebabkan jumlah ion hidrogen (H^+) dan ion hidroksida (OH^-) di dalam larutan berubah, sehingga memengaruhi cara molekul *enrofloxacin* berinteraksi dengan permukaan *hydrochar* [11]. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan pada beberapa tingkat pH yaitu 3, 5, 7, 9, dan 11 untuk menentukan kondisi pH yang paling efektif dalam proses adsorpsi [13]. Hasil pengaruh perubahan pH terhadap proses penyerapan *enrofloxacin* menggunakan *hydrochar* serbuk kayu sengon ditunjukkan pada tabel di bawah ini :

Tabel 3. Pengaruh variasi pH terhadap efektivitas adsorpsi *enrofloxacin*

Waktu	pH3	pH5	pH7	pH9	pH11
0	1	1	1	1	1
10	0,12179	0,61164	0,23662	0,29836	0,3413
20	1,01433	0,55493	0,2207	0,28194	0,32346
30	0,92478	0,51015	0,1809	0,25657	0,30794
40	0,87701	0,45642	0,16896	0,25657	0,30794
50	0,82925	0,45045	0,16299	0,22672	0,2757
60	0,68	0,41761	0,13313	0,20881	0,2566

Dari tabel di atas terlihat bahwa perubahan pH berdampak cukup besar terhadap kemampuan *hydrochar* dalam menyerap *enrofloxacin*. Persentase penyisihan (*removal*) menunjukkan tren yang berbeda tergantung pada kondisi pH yang berlaku. Nilai penghilangan tertinggi ditemukan saat pH 7, sedangkan nilai terendah terjadi saat pH 11. Efisiensi adsorpsi masih tergolong cukup baik, namun penai nilai maksimum, pada kondisi pH 3. Hal itu terjadi karena konsentrasi ion H^+ dalam larutan yang tinggi, sehingga bisa berlomba dengan molekul *enrofloxacin* untuk menempati tempat aktif di permukaan *hydrochar*. Karena adanya persaingan tersebut, sebagian tempat penyerapan diisi oleh ion H^+ , sehingga jumlah molekul *enrofloxacin* yang bisa melekat menjadi lebih sedikit. Di pH 5, persentase penghilangan tidak berubah banyak dibandingkan saat pH 3. Meskipun jumlah ion H^+ mulai berkurang, larutan masih cukup asam, sehingga kompetisi antara ion H^+ dan molekul *enrofloxacin* masih berlangsung. Akibatnya, proses adsorpsi belum berlangsung secara optimum [13]. Berbeda dengan kondisi sebelumnya, pH 7 memberikan efisiensi adsorpsi tertinggi selama seluruh waktu kontak.

Hal ini menunjukkan bahwa kondisi netral adalah kondisi terbaik untuk terjadinya proses penyerapan *enrofloxacin* oleh *hydrochar* serbuk kayu sengon. Pada kondisi pH netral, jumlah ion H^+ dan OH^- tidak terlalu banyak sehingga tidak mengganggu proses interaksi antara permukaan *hydrochar* dengan molekul *enrofloxacin*. Kondisi ini memudahkan molekul *enrofloxacin* untuk masuk ke pori-pori *hydrochar* dan mengisi tempat aktif yang tersedia [12]. Di pH 9, persentase penghilangan kembali menurun dibandingkan pada pH 7. Penurunan tersebut kemungkinan disebabkan karena konsentrasi ion OH^- dalam larutan mulai meningkat. Adanya ion OH^- dapat mengubah kondisi permukaan *hydrochar* dan melemahkan daya tarik antara adsorben dengan molekul *enrofloxacin*, sehingga jumlah senyawa yang berhasil menempel pada adsorben menjadi lebih sedikit. Nilai *removal* terendah diperoleh pada pH 11. Dalam kondisi basa yang kuat, jumlah ion OH^- yang banyak membuatnya bersaing dengan molekul *enrofloxacin* untuk mendekati permukaan adsorben. Selain itu, perubahan bentuk spesiasi *enrofloxacin* dalam kondisi basa juga bisa menurunkan daya tariknya terhadap permukaan *hydrochar*. Akibatnya, kemampuan *hydrochar* menyerap *enrofloxacin* lebih rendah dibandingkan kondisi pH yang lain.



Gambar 3. Grafik pengaruh variasi pH terhadap efektivitas adsorpsi *enrofloxacin* menggunakan *hydrochar* serbuk kayu sengon

Dari gambar di atas terlihat bahwa kurva pada pH 7 berada di atas kurva pH lainnya selama periode pengamatan. Hal itu menunjukkan bahwa kondisi netral memberikan efisiensi dalam proses penyisihan yang terbaik. Kurva pada pH 7 juga meningkat secara stabil hingga menit ke-60, menunjukkan bahwa proses penyerapan berjalan efektif selama waktu kontak berlangsung. Sementara itu, kurva pada pH 3 dan pH 5 menunjukkan tren naik, tetapi nilai penghilangan masih lebih rendah dibandingkan pada pH 7. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun *hydrochar* masih bisa menyerap *enrofloxacin* dalam kondisi asam, adanya ion H^+ yang terlalu banyak justru mengurangi proses penyerapan, sehingga efisiensi penghilangan tidak bisa mencapai tingkat terbaik. Kurva pada pH 9 dan pH 11 berada di bawah pH netral. Pada pH 11, proses peningkatan

penghilangan berlangsung lebih perlahan dibandingkan kondisi lainnya. Hal itu menunjukkan bahwa kondisi basa tidak cukup baik dalam mendukung proses penyerapan *enrofloxacin* menggunakan *hydrochar* dari serbuk kayu sengon.

Secara umum, grafik menunjukkan bahwa pH mempunyai pengaruh besar terhadap kemampuan adsorpsi [11]. Nilai *removal* yang tertinggi dicapai saat kondisi pH 7, sehingga dapat disimpulkan bahwa kondisi pH tersebut merupakan kondisi optimal dalam penelitian ini. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa *hydrochar* dari serbuk kayu sengon bekerja terbaik dalam kondisi netral untuk menyerap *enrofloxacin* dari larutan. Hasil penelitian ini sesuai dengan berbagai penelitian sebelumnya tentang penyerapan antibiotik menggunakan bahan adsorben berbasis biomassa, yang menyatakan bahwa kondisi pH netral biasanya memberikan efisiensi penangkapan yang lebih baik dibandingkan kondisi yang sangat asam atau sangat basa. Pada kondisi pH netral, interaksi antara adsorben dan adsorbat menjadi lebih kuat, sehingga meningkatkan jumlah molekul yang bisa terikat [16]. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan tingkat pH mempengaruhi seberapa efektif *enrofloxacin* dapat diserap. Berdasarkan hasil penelitian, pH 7 adalah kondisi terbaik karena menghasilkan persentase penyerapan tertinggi dibandingkan dengan kondisi pH lainnya. Dosis adsorben adalah jumlah *hydrochar* yang digunakan dalam proses penyerapan. Penambahan dosis adsorben bertujuan meningkatkan luas permukaan dan jumlah situs aktif, sehingga kemampuan menyerap *enrofloxacin* menjadi lebih baik

Pengaruh dosis adsorben terhadap efektivitas adsorpsi *enrofloxacin*

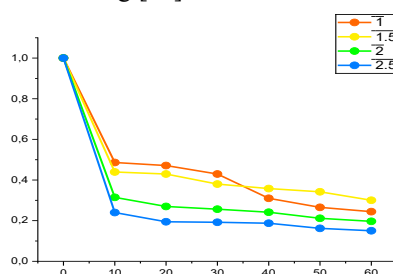
Dosis adsorben adalah jumlah *hydrochar* yang digunakan dalam proses penyerapan. Penambahan dosis adsorben bertujuan meningkatkan luas permukaan dan jumlah situs aktif, sehingga kemampuan menyerap *enrofloxacin* menjadi lebih baik [11]. Dalam penelitian ini, variasi dosis hidrokarbon dilakukan untuk menentukan jumlah adsorben yang memberikan hasil terbaik. Hasil dari pengaruh jumlah adsorben terhadap tingkat keefektifan proses adsorpsi ditunjukkan pada tabel di bawah ini :

Tabel 4. Pengaruh dosis adsorben terhadap efektivitas adsorpsi *enrofloxacin*

Waktu	1	1,5	2,	2,5
0	1	1	1	1
10	0,48627	0,4396	0,31478	0,23988
20	0,47134	0,42965	0,31478	0,19451
30	0,42955	0,3799	0,27	0,19212
40	0,31015	0,35801	0,35801	0,18734
50	0,26537	0,34209	0,21179	0,16227
60	0,24448	0,3003	0,19687	0,15033

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa perubahan jumlah *hydrochar* memengaruhi nilai persentase penyerapan *enrofloxacin*. Secara umum, semakin tinggi dosis adsorben yang digunakan, semakin baik kemampuan *hydrochar* dalam menyerap *enrofloxacin* hingga mencapai kondisi yang paling baik. Semakin banyak *hydrochar* yang digunakan, semakin besar pula luas permukaan adsorben yang bisa digunakan. Kondisi itu membuat jumlah tempat aktif yang bisa menangkap molekul *enrofloxacin* semakin banyak, sehingga proses penyerapan berjalan lebih baik [16].

Namun, setelah mencapai dosis tertentu, peningkatan efisiensi adsorpsi tidak lagi terlalu besar. Hal tersebut bisa terjadi karena beberapa partikel *hydrochar* bertumpuk (agregasi) atau berkumpul bersama, sehingga permukaan adsorben di sebagian area tidak lagi bersentuhan langsung dengan larutan. Akibatnya, luas permukaan yang efektif justru menurun meskipun jumlah adsorben terus diperbanyak. Selain itu, jumlah *enrofloxacin* yang terkandung dalam larutan juga membatasi kemampuan penggunaannya. Saat hampir semua molekul *enrofloxacin* sudah terserap, menambahkan *hydrochar* tidak lagi memberi peningkatan penangkapan yang signifikan karena jumlah molekul yang tersedia semakin berkurang [13].



Gambar 4. Grafik pengaruh dosis adsorben terhadap efektivitas adsorpsi *enrofloxacin*

Grafik pada gambar di atas menunjukkan adanya tren peningkatan persentase penangkapan seiring peningkatan dosis *hydrochar* hingga mencapai kondisi terbaik. Setelah titik itu, kurva mulai datar, yang

menunjukkan bahwa penambahan *hydrochar* tidak lagi membuat efektivitas adsorpsi meningkat secara nyata. Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa dosis adsorben yang menghasilkan nilai penghilangan (*removal*) tertinggi merupakan kondisi terbaik dalam penelitian ini, sehingga dapat dijadikan dasar dalam proses adsorpsi *enrofloxacin* menggunakan *hydrochar* serbuk kayu sengon.

Dari segi kimia, peningkatan kemampuan penyerapan pada dosis tertentu menunjukkan bahwa jumlah tempat aktif di permukaan *hydrochar* sudah cukup untuk berikatan dengan molekul *enrofloxacin*. Gugus hidroksil ($-OH$), karbonil ($C=O$), dan gugus aromatik ($C=C$) yang ada di permukaan *hydrochar* memungkinkan terjadinya ikatan hidrogen, interaksi elektrostatis, serta interaksi antar cincin aromatik dengan *enrofloxacin*. Ketika jumlah adsorben ditingkatkan melebihi tingkat yang paling efektif, peningkatan kemampuan menyerap tidak terlalu besar lagi karena sebagian tempat penyerapan sudah penuh dan sebagian partikel *hydrochar* mulai bergabung bersama, sehingga luas permukaan yang bisa digunakan berkurang. Dari segi aplikasi, penggunaan dosis optimum memberikan manfaat karena dapat menghasilkan efisiensi adsorpsi yang baik dengan memerlukan jumlah adsorben yang tidak terlalu besar, sehingga lebih menguntungkan secara ekonomi untuk diterapkan dalam pengolahan limbah cair yang mengandung sisa *enrofloxacin*.

Pengaruh Jenis Air terhadap Efektivitas Adsorpsi *Enrofloxacin*

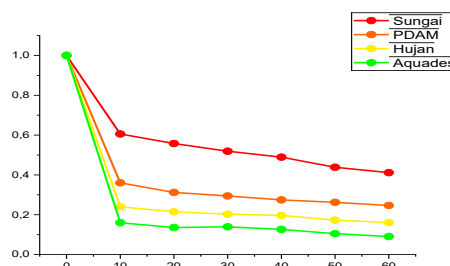
Jenis air bisa memengaruhi proses adsorpsi karena setiap jenis air memiliki sifat fisik dan kimia yang berbeda, seperti jenis ion yang terlarut, kandungan mineral, bahan organik, serta tingkat kekeruhan airnya. Penelitian ini menggunakan empat jenis air, yaitu air sungai, air PDAM, air hujan, dan air aquades, agar dapat mengetahui dampak dari jenis air tersebut terhadap kemampuan *hydrochar* serbuk kayu sengon dalam menyerap *enrofloxacin*.

Tabel 5. Pengaruh jenis air terhadap adsorpsi *enrofloxacin*

Waktu (menit)	Sungai	PDAM	Hujan	Aquades
0	1	1	1	1
10	0,606	0,360	0,240	0,160
20	0,558	0,312	0,215	0,136
30	0,519	0,294	0,203	0,140
40	0,489	0,274	0,197	0,126
50	0,439	0,262	0,173	0,105
60	0,412	0,247	0,161	0,091

Dari di atas terlihat bahwa jenis air berpengaruh cukup besar terhadap kemampuan adsorpsi *enrofloxacin* oleh *hydrochar* serbuk kayu sengon. Nilai kadar sisa *enrofloxacin* terus berkurang seiring bertambahnya waktu kontak di berbagai jenis air, menunjukkan bahwa proses penyerapan masih berlangsung hingga mencapai kondisi keseimbangan. Air aquades menunjukkan kadar sisa *enrofloxacin* yang paling rendah selama seluruh jangka waktu pengamatan, yaitu mencapai 0,091 pada menit ke-60. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *hydrochar* memiliki kemampuan untuk menyerap zat tertentu dengan sangat baik dalam air yang tidak mengandung zat lain. Kondisi ini terjadi karena air aquades hampir tidak memiliki ion terlarut atau bahan organik lainnya, sehingga *enrofloxacin* tidak bersaing dengan zat lain untuk mengikat tempat aktif pada permukaan *hydrochar*. Sebagian besar situs penyerapan dapat digunakan secara maksimal oleh molekul *enrofloxacin*.

Di air hujan, kadar sisa yang ada lebih tinggi dibandingkan aquades, tetapi masih lebih rendah dibandingkan air PDAM dan air sungai. Hal ini menunjukkan bahwa kadar zat yang larut dalam air hujan lebih kecil, sehingga pengaruh persaingan terhadap proses penyerapan masih kurang. Sementara itu, di air PDAM terdapat peningkatan kadar sisa *enrofloxacin* dibandingkan air hujan. Kondisi ini kemungkinan disebabkan oleh adanya mineral dan ion-ion yang larut, seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), natrium (Na^{+}), serta sisa bahan kimia yang digunakan dalam pengolahan air. Ion-ion dan mineral tersebut mungkin saling berebut dengan molekul *enrofloxacin* untuk menempel di permukaan bahan adsorben. Nilai konsentrasi sisa terbesar ditemukan di air sungai, yaitu 0,412 pada menit ke-60. Hasil ini menunjukkan bahwa kemampuan penyerapan dalam air sungai lebih rendah dibandingkan jenis air lainnya. Air sungai biasanya memiliki bahan organik alami, partikel padat yang terapung, serta beberapa ion yang larut dalam air dan lebih rumit. Zat-zat tersebut bisa mengganggu proses masuknya molekul *enrofloxacin* ke dalam pori-pori *hydrochar* dan menutupi sebagian tempat aktif adsorben, sehingga jumlah *enrofloxacin* yang berhasil tertangkap menjadi lebih sedikit. Secara umum, penelitian menunjukkan bahwa semakin sederhana komposisi air tersebut, maka semakin baik hasil adsorpsi *enrofloxacin* yang tercapai. Sebaliknya, jika ada lebih banyak ion dan bahan organik dalam air, efisiensi proses penyerapan cenderung berkurang karena terjadi persaingan di permukaan bahan penyerap.



Gambar 5. Grafik pengaruh jenis air terhadap efektivitas adsorpsi *enrofloxacin*

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa semua jenis air menunjukkan tren penurunan kadar *enrofloxacin* semakin lama waktu kontak berlangsung. Kurva aquades berada di tingkat terendah selama pengamatan, yang menunjukkan bahwa proses penyerapan berjalan paling efektif pada media tersebut. Sebaliknya, tingkat air sungai terlalu tinggi, menunjukkan bahwa zat terlarut dan bahan organik dalam air sungai menghalangi proses penyerapan. Kurva curah hujan dan PDAM berada di tengah, yang menunjukkan bahwa tingkat efektivitas adsorpsi tergantung pada tingkat kekompleksan komposisi air yang digunakan. Dengan demikian, jenis air terbukti menjadi salah satu faktor penting yang memengaruhi kemampuan *hydrochar* serbuk kayu sengon dalam menyaring *enrofloxacin* dari larutan.

Pengaruh Waktu Kontak (Kinetika Adsorpsi)

Waktu kontak merupakan salah satu faktor penting dalam proses adsorpsi karena memengaruhi lamanya interaksi antara adsorben dan zat yang diserap (adsorbat). Semakin lama *hydrochar* berada dalam kontak dengan larutan *enrofloxacin*, maka semakin tinggi kemungkinan molekul *enrofloxacin* untuk berdifusi ke dalam pori-pori dan melekat di permukaan *hydrochar* [11]. Pengujian variasi waktu kontak dalam penelitian ini menggunakan *hydrochar* dengan ukuran 160 mesh, yang telah ditentukan sebagai ukuran partikel terbaik berdasarkan hasil uji kinerja sebelumnya. Oleh karena itu, tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi dampak durasi kontak terhadap efektivitas adsorpsi, bukan untuk membandingkan kembali pengaruh ukuran partikel. Untuk itu, penelitian ini menggunakan berbagai durasi kontak yaitu 3, 5, 7, 9, 12, 15, 20, 25, dan 30 menit agar bisa mengetahui berapa lama waktu adsorpsi yang memberikan hasil penyerapan terbaik. Hasil uji adsorpsi berdasarkan perubahan lama kontak dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

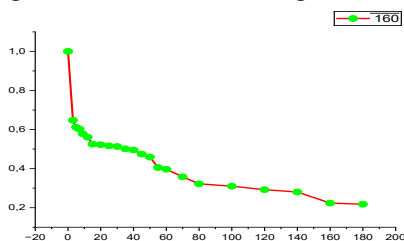
Tabel 6. Hasil adsorpsi *enrofloxacin* pada variasi waktu kontak

Waktu	Absorbansi	Konsentrasi (mg/L)	Removal (%)
3	0,204	6,474627	35%
5	0,192	6,116418	39%
7	0,189	6,026866	40%
9	0,181	5,78806	42%
12	0,175	5,608955	44%
15	0,163	5,250746	47%
20	0,162	5,220896	48%
25	0,160	5,161194	48%
30	0,159	5,131343	49%

Dari tabel di atas terlihat bahwa nilai absorbansi berkurang dari 0,204 pada saat kontak 3 menit menjadi 0,159 pada saat kontak 30 menit. Penurunan nilai absorbansi menunjukkan bahwa konsentrasi *enrofloxacin* dalam larutan semakin berkurang karena proses adsorpsi oleh *hydrochar* serbuk kayu sengon. Semakin rendah nilai absorbansi yang didapat dari hasil pengukuran dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis, maka semakin sedikit konsentrasi *enrofloxacin* yang masih ada dalam larutan. Selain itu, nilai konsentrasi sisa juga menunjukkan tren menurun seiring bertambahnya durasi kontak. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa molekul *enrofloxacin* perlahan berpindah dari fase cair ke permukaan *hydrochar*. Pada awal proses penyerapan, kebanyakan pori dan tempat aktif pada *hydrochar* masih kosong, sehingga molekul *enrofloxacin* bisa melekat dengan mudah. Hal ini menyebabkan proses penyerapan berlangsung cepat pada awalnya.

Persentase penghilangan (*removal*) meningkat dari 35,25% pada menit ketiga menjadi 48,69% pada menit ke-30. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin lama bahan *hydrochar* bersentuhan dengan *enrofloxacin*, kemampuannya untuk menyerap bahan tersebut juga semakin baik. Hal itu terjadi karena waktu kontak yang lebih lama memungkinkan molekul *enrofloxacin* lebih banyak masuk ke dalam pori-pori *hydrochar*, sehingga jumlah molekul yang menempel menjadi semakin besar. Namun demikian, setelah menit ke-20, nilai *removal* mulai meningkat, tetapi kenaikannya tidak terlalu besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar situs aktif pada hidrokarbon sudah tertampung oleh molekul *enrofloxacin*, sehingga proses penyerapan mulai mendekati kondisi

keseimbangan. Dalam kondisi tersebut, kecepatan penyerapan menjadi lebih perlahan dibandingkan di awal proses karena jumlah tempat aktif yang tersisa semakin berkurang.



Gambar 6. Grafik hubungan waktu kontak terhadap persentase removal enrofloxacin

Dari gambar di atas terlihat bahwa kurva persentase penghilangan menunjukkan pola yang naik seiring bertambahnya waktu kontak. Kenaikan kurva dari menit ke-3 sampai menit ke-15 menunjukkan bahwa proses penyerapan berjalan dengan cepat. Hal ini terjadi karena permukaan *hydrochar* masih memiliki banyak pori dan tempat aktif yang bisa diisi oleh molekul *enrofloxacin* [16]. Setelah masuk ke masa kontak selama 20 hingga 30 menit, kurva mulai membentuk pola yang lebih datar. Fenomena itu menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi proses penyerapan mulai menurun karena kebanyakan tempat aktif sudah terisi. Secara lain, penambahan waktu kontak setelah kondisi tersebut tidak lagi memberikan peningkatan yang berarti dalam kemampuan adsorpsi. Bentuk kurva yang didapat menunjukkan sifat penyerapan yang biasa terjadi pada bahan karbon. Pada awalnya, proses adsorpsi berjalan sangat cepat karena masih banyak situs aktif yang tersedia. Selanjutnya, laju penyerapan mulai berkurang hingga akhirnya mendekati kondisi keseimbangan karena jumlah situs aktif yang masih kosong semakin berkurang.

Penelitian ini menunjukkan bahwa *hydrochar* dari serbuk kayu sengon mampu menyerap *enrofloxacin* dengan cukup baik. Struktur *hydrochar* yang memiliki pori dan kelompok fungsi di permukaannya memungkinkan terjadinya interaksi antara adsorben dengan molekul *enrofloxacin*, sehingga konsentrasi *enrofloxacin* dalam larutan bisa berkurang secara perlahan [11]. Dengan demikian, lama waktu kondisi akan mengai kondisi optimal meningkatkan efektivitas proses adsorpsi. Secara umum, perbedaan durasi kontak mempengaruhi tingkat efektivitas proses penyisihan *enrofloxacin* dengan menggunakan *hydrochar* dari serbuk kayu sengon. Berdasarkan hasil penelitian, durasi kontak selama 30 menit memberikan persentase penyerapan yang paling tinggi, yaitu 48,69%, sehingga dapat disimpulkan sebagai durasi kontak yang paling efektif dalam penelitian ini.

Pengaruh Konsentrasi Enrofloxacin

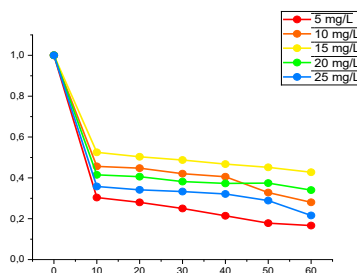
Konsentrasi awal adsorbat merupakan salah satu faktor yang memengaruhi proses penyerapan karena berkaitan dengan jumlah molekul yang tersedia untuk berinteraksi dengan permukaan bahan penyerap. Semakin tinggi konsentrasi awal *enrofloxacin*, semakin banyak molekul yang perlu diserap oleh *hydrochar* [17]. Oleh karena itu, dilakukan variasi konsentrasi awal yaitu 5, 10, 15, 20, dan 25 mg/L agar dapat mengetahui konsentrasi yang paling efektif dalam proses adsorpsi. Hasil pengaruh kadar awal terhadap persentase penghilangan *enrofloxacin* ditunjukkan pada tabel di bawah ini :

Tabel 7. Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Efektivitas Adsorpsi *Enrofloxacin*

Waktu	5 mg/L	10 mg/L	15 mg/L	20 mg/L	25 mg/L
10	85	54	21	17	10
20	86	55	25	19	15
30	87	58	27	24	17
40	89	59	30	25	20
50	91	67	32	25	28
60	92	72	36	32	46

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa peningkatan kadar awal mempengaruhi kemampuan *hydrochar* dalam menyerap *enrofloxacin*. Pada konsentrasi 5 mg/L, persentase penghilangan mencapai nilai tertinggi dibandingkan dengan variasi konsentrasi lainnya. Ini menunjukkan bahwa jumlah molekul *enrofloxacin* tetap seimbang dengan jumlah situs aktif yang ada di permukaan *hydrochar*, sehingga sebagian besar molekul dapat menempel dengan baik. Penyisihan mulai mengalami penurunan ketika konsentrasi awal dinaikkan 10 mg/L dan 15 mg/L, efisiensi penyisihan ketika konsentrasi awal. Kondisi ini terjadi karena jumlah molekul *enrofloxacin* dalam larutan semakin bertambah, sedangkan jumlah situs aktif pada *hydrochar* tetap tidak berubah. Akibatnya, tidak semua molekul bisa melekat pada permukaan adsorben, sehingga masih ada *enrofloxacin* yang tersisa di dalam larutan. Pada konsentrasi 20 mg/L dan 25 mg/L, tingkat penghilangan cenderung lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi yang lebih rendah. Fenomena itu menunjukkan bahwa kemampuan *hydrochar* menyerap mulai mendekati batas maksimalnya. Saat hampir semua situs aktif diisi, menambah jumlah molekul *enrofloxacin* tidak lagi

meningkatkan jumlah molekul yang bisa menempel, melainkan hanya meningkatkan konsentrasi sisa dalam larutan. Selain dipengaruhi oleh jumlah situs aktif, penurunan efisiensi pada konsentrasi tinggi juga bisa terjadi karena semakin bertambahnya persaingan antar molekul *enrofloxacin* untuk mengisi pori-pori pada *hydrochar*. Semakin pekat larutan tersebut, semakin tinggi kemungkinan molekul-molekulnya mengendap di permukaan adsorben, sehingga proses penyebaran molekul ke dalam pori-pori adsorben menjadi kurang efektif.

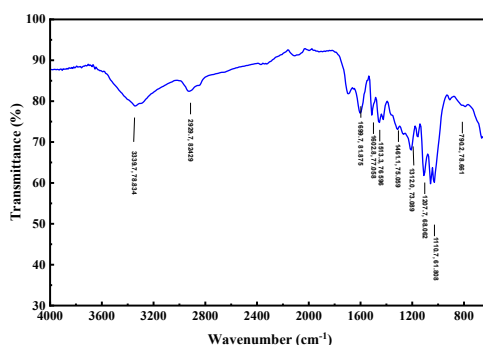


Gambar 7. Grafik konsentrasi awal *enrofloxacin*

Berdasarkan gambar di atas terlihat bahwa kurva pada konsentrasi 5 mg/L berada di atas kurva konsentrasi lainnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa *hydrochar* memiliki kemampuan adsorpsi yang paling baik pada konsentrasi awal yang lebih rendah. Semakin tinggi konsentrasi awal *enrofloxacin*, kurva persentase removal cenderung berada pada nilai yang lebih rendah karena jumlah molekul yang harus diserap melebihi kapasitas adsorben [18]. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi awal 5 mg/L merupakan kondisi optimum dalam penelitian ini karena menghasilkan persentase removal tertinggi. Hal tersebut menunjukkan bahwa *hydrochar* serbuk kayu sengon lebih efektif digunakan pada limbah dengan konsentrasi *enrofloxacin* yang relatif rendah hingga sedang.

Karakterisasi Gugus Fungsi dengan FTIR

Karakterisasi gugus fungsi pada *hydrochar* serbuk kayu sengon dilakukan dengan menggunakan alat *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Analisis ini bertujuan untuk menemukan kelompok fungsi yang ada di permukaan *hydrochar* setelah melalui proses *hydrothermal carbonization* (HTC). Gugus fungsi yang terbentuk memainkan peran penting dalam menentukan kemampuan adsorben untuk berinteraksi dengan molekul *enrofloxacin* saat proses adsorpsi berlangsung [19]. Hasil analisis FTIR *hydrochar* serbuk kayu sengon disajikan pada gambar di bawah ini :



Gambar 8. Spektrum FTIR *hydrochar* serbuk kayu sengon.

Berdasarkan gambar diatas terlihat beberapa puncak serapan utama yang menunjukkan keberadaan gugus fungsi penyusun *hydrochar*. Puncak serapan yang muncul pada bilangan gelombang 3397,78 cm⁻¹ menunjukkan adanya vibrasi regangan gugus hidroksil (O–H). Gugus hidroksil ini berasal dari komponen lignoselulosa seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang masih tersisa setelah proses karbonisasi. Keberadaan gugus O–H menunjukkan bahwa *hydrochar* masih memiliki gugus aktif yang mampu membentuk ikatan hidrogen dengan molekul *enrofloxacin* sehingga dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi. Puncak serapan pada 2929,78 cm⁻¹ menunjukkan vibrasi regangan ikatan C–H alifatik yang berasal dari gugus metil (-CH₃) dan metilen (-CH₂) [11]. Munculnya puncak tersebut mengindikasikan bahwa sebagian struktur organik biomassa masih dipertahankan selama proses hidrotermal. Hal ini menunjukkan bahwa karbonisasi yang terjadi belum menghilangkan seluruh rantai alifatik penyusun biomassa. Selanjutnya, puncak pada 1699,78 cm⁻¹ mengindikasikan adanya gugus karbonil (C=O) yang umumnya berasal dari gugus asam karboksilat, aldehid, maupun keton.

Gugus karbonil merupakan salah satu gugus oksigen yang bersifat aktif dan dapat meningkatkan afinitas permukaan *hydrochar* terhadap senyawa organik melalui interaksi dipol maupun pembentukan ikatan hidrogen [12]. Puncak serapan pada 1602,38 cm⁻¹ menunjukkan adanya vibrasi ikatan C=C aromatik yang berasal dari

struktur lignin. Keberadaan gugus aromatik ini menunjukkan bahwa selama proses *hydrothermal carbonization* terjadi pembentukan struktur karbon aromatik yang lebih stabil. Struktur aromatik tersebut diketahui berkontribusi terhadap mekanisme adsorpsi melalui interaksi π - π antara permukaan *hydrochar* dan cincin aromatik yang terdapat pada molekul *enrofloxacin*.

Pada daerah $1461,37\text{ cm}^{-1}$ dan $1375,70\text{ cm}^{-1}$ masih terlihat puncak serapan yang berkaitan dengan deformasi gugus CH_2 dan C-H . Puncak ini menunjukkan bahwa sebagian komponen lignoselulosa masih tersisa pada *hydrochar*. Meskipun hemiselulosa mengalami degradasi selama proses hidrotermal, beberapa gugus organik masih tetap bertahan sehingga dapat berfungsi sebagai situs aktif adsorpsi.

Selain itu, puncak pada $1312,07\text{ cm}^{-1}$, $1207,37\text{ cm}^{-1}$, dan $1110,76\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan keberadaan gugus C-O dan C-O-C yang berasal dari selulosa maupun lignin. Gugus-gugus tersebut merupakan gugus yang mengandung oksigen sehingga mampu meningkatkan sifat hidrofilik permukaan *hydrochar*. Keberadaan gugus ini juga memberikan lebih banyak lokasi aktif untuk berinteraksi dengan molekul *enrofloxacin* selama proses adsorpsi berlangsung [12].

Puncak terakhir yang terlihat pada $790,28\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi C-H aromatik di luar bidang (*out-of-plane bending*). Puncak ini mengindikasikan terbentuknya struktur cincin aromatik sebagai hasil karbonisasi biomassa. Struktur aromatik tersebut memberikan kestabilan pada material karbon sekaligus mendukung proses adsorpsi melalui interaksi hidrofobik dan π - π . Secara keseluruhan, hasil analisis FTIR pada Gambar 4.X menunjukkan bahwa *hydrochar* serbuk kayu sengon memiliki gugus fungsi utama berupa hidroksil (O-H), karbonil (C=O), aromatik (C=C), serta gugus C-O dan C-O-C . Keberadaan gugus-gugus tersebut menunjukkan bahwa *hydrochar* hasil proses *hydrothermal carbonization* memiliki permukaan yang masih kaya akan gugus aktif sehingga berpotensi digunakan sebagai adsorben untuk menghilangkan *enrofloxacin* dari larutan. Gugus-gugus aktif tersebut memungkinkan terjadinya mekanisme adsorpsi melalui pembentukan ikatan hidrogen, interaksi elektrostatik, serta interaksi π - π antara adsorben dan molekul antibiotik.

Secara umum, proses penyerapan *enrofloxacin* oleh *hydrochar* kemungkinan besar terjadi karena kombinasi antara penyerapan fisik dan penyerapan kimia. Gugus hidroksil (O-H) dan karbonil (C=O) berperan dalam pembentukan ikatan hidrogen dengan gugus fungsional *enrofloxacin*, sedangkan struktur karbon aromatik (C=C) mengizinkan terjadinya interaksi π - π antara permukaan *hydrochar* dan cincin aromatik *enrofloxacin*. Selain itu, gugus C-O dan C-O-C membuat permukaan lebih mudah menyerap air dan memberikan tempat tambahan untuk proses penyerapan berlangsung. Pada kondisi pH yang ideal, interaksi listrik antara permukaan *hydrochar* dan molekul *enrofloxacin* menjadi lebih kuat, sehingga meningkatkan kemampuan adsorben dalam menyerap adsorbat. Kerja sama antar mekanisme tersebut menjelaskan mengapa *hydrochar* serbuk kayu sengon memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menghilangkan *enrofloxacin* dari larutan.

Keterbatasan Penelitian dan Saran

Penelitian ini masih terbatas karena hanya menggunakan satu jenis bahan baku, yaitu serbuk kayu sengon (*Paraserianthes falcataria*), untuk membuat *hydrochar* dan hanya menggunakan satu jenis antibiotik, yaitu *enrofloxacin*, sebagai zat yang diadsorpsi. Maka dari itu, hasil penelitian ini belum bisa diterapkan pada biomassa atau senyawa antibiotik lainnya yang memiliki sifat berbeda. Selain itu, uji adsorpsi dilakukan dengan menggunakan larutan sintesis dalam skala laboratorium, sehingga belum sepenuhnya mencerminkan kondisi limbah industri atau limbah peternakan yang sebenarnya, yang biasanya mengandung campuran berbagai senyawa organik dan anorganik. Penelitian lebih lanjut sebaiknya mengevaluasi *hydrochar* dari berbagai jenis biomassa, menguji kemampuan adsorpsi terhadap antibiotik lainnya, serta melakukan uji coba pada limbah nyata agar kemampuan *hydrochar* sebagai adsorben dalam pengolahan air limbah dapat dinilai secara lebih lengkap dan menyeluruh.

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *hydrochar* serbuk kayu sengon yang disintesis menggunakan metode *hydrothermal carbonization* pada suhu 200°C selama 10 jam memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi limbah antibiotik *enrofloxacin* dari larutan. Karakterisasi menggunakan FTIR menunjukkan bahwa *hydrochar* memiliki gugus fungsi hidroksil (O-H), karbonil (C=O), aromatik (C=C), serta gugus C-O dan C-O-C yang berperan sebagai situs aktif dalam proses adsorpsi melalui mekanisme ikatan hidrogen, interaksi elektrostatik, dan interaksi π - π . Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran partikel memengaruhi efektivitas adsorpsi, di mana *hydrochar* berukuran 160 mesh memberikan efisiensi penyisihan yang paling tinggi dibandingkan ukuran partikel lainnya. Selain itu, waktu kontak juga berpengaruh terhadap proses adsorpsi. Persentase *removal* meningkat seiring bertambahnya waktu kontak dan mencapai kondisi optimum pada menit ke-30 dengan nilai *removal* sebesar 48,69%. Variasi pH menunjukkan bahwa kondisi netral (pH 7) merupakan kondisi optimum karena menghasilkan efisiensi adsorpsi tertinggi. Pada variasi konsentrasi awal *enrofloxacin*, konsentrasi 5 mg/L memberikan persentase penyisihan terbesar, sedangkan peningkatan konsentrasi menyebabkan penurunan efisiensi akibat keterbatasan jumlah situs aktif pada permukaan *hydrochar*.

Peningkatan dosis adsorben mampu meningkatkan efektivitas adsorpsi hingga mencapai kondisi optimum, kemudian peningkatan efisiensi menjadi tidak lagi signifikan karena sebagian besar situs aktif telah terisi dan mulai terjadi kejenuhan adsorben. Hasil uji triplo menunjukkan bahwa proses adsorpsi memiliki tingkat presisi yang baik dengan hasil pengulangan yang relatif konsisten. Hal tersebut menunjukkan bahwa metode penelitian yang digunakan mampu menghasilkan data yang dapat dipercaya. Secara keseluruhan, *hydrochar* serbuk kayu sengon memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai adsorben alternatif yang ramah lingkungan dalam menyisihkan *enrofloxacin* dari larutan, sehingga berpeluang dikembangkan sebagai material pengolahan limbah cair yang efektif, ekonomis, dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] K. P. 2 G. W. 2 and A. W. Łukasz Grabowski 1, Lidia Gaffke 2, “*Enrofloxacin — The Ruthless Killer of Eukaryotic Cells or the Last Hope in the Fight against Bacterial Infections ?*,” 2022.
- [2] D. G.-G. 1 María Jesús Serrano 1 et al., “*Antibacterial Residue Excretion via Urine as an Indicator for Therapeutical Treatment Choice and Farm Waste Treatment*,” 2021.
- [3] M. Shen et al., “*Occurrence, Bioaccumulation, Metabolism and Ecotoxicity of Fluoroquinolones in the Aquatic Environment: A Review*,” hal. 1–22, 2023.
- [4] R. B. G.- Angelica Cruz-Cruz1,#, Andrea Rivas-Sanchez1,#, Guillermo Gallareta-Olivares1,#, 2 González1, 2, María Fernanda Cárdenas-Alcaide1, 2, Hafiz M. N. Iqbal1, dan 2, Roberto Parra-Saldívar1, “*Carbon-based materials: adsorptive removal of antibiotics from water*,” 2023, doi: 10.20517/wecn.2022.19.
- [5] M. E. 1 Jelena Petrović 1,*, M. S. 1, A. J. 1 and J. J. P. 2, J. D. 1, Marija Koprivica 1, dan 1, “*Hydrothermal Carbonization of Waste Biomass: A Review of Hydrochar Preparation and Environmental Application*,” 2024.
- [6] T. M. Vu, M. Phuong, dan H. Van, “*RSC Advances Biomass-derived hydrochar and activated carbon in pharmaceutical pollution mitigation*,” hal. 43053–43084, 2025, doi: 10.1039/d5ra04857e.
- [7] K. I. and T. I. and akanori I. 1 Mohammed Aliyu1 Mohammed Aliyu1*, Kazunori Iwabuchi2, “*Production of solid biofuel via hydrothermal carbonization of wood shavings: influence of biomass-to-water ratio and carbonization temperature on the fuel characteristics of dried hydrochar*,” vol. 00012, hal. 1–10, 2025.
- [8] C. De Francesco, G. T. and A. I., Thomas Gasperini *, Daniele Duca *, dan Department, “*Hydrothermal Carbonization of Residual Biomass from Agricultural and Agro-Industrial Sector*,” 2024.
- [9] D. D. and G. H. * Sucharita Samanta, Somnath Chowdhury, “*RSC Advances The biosorptive uptake of enrofl oxacin from synthetically produced contaminated water by*,” *RSC Adv.*, vol. 10, no. January, hal. 1204–1218, 2020, doi: 10.1039/C9RA08995K.
- [10] doi: 10.1016/j. hazadv. 2025. 100666. [1] S. Kar, T. Mandal, dan G. Halder, “*Journal of Hazardous Materials Advances Deciphering enrofloxacin sorption by activated N-biochar: Equilibrium, kinetics, life cycle cost and DNA-toxicity study*,” *J. Hazard. Mater. Adv.*, vol. 19, no. February, hal., “*Journal of Hazardous Materials Advances Deciphering enrofloxacin sorption by activated N-biochar: Equilibrium, kinetics, life cycle cost and DNA-toxicity study*,” *J. Hazard. Mater. Adv.*, vol. 19, no. February, hal. 100666, 2025, doi: 10.1016/j.hazadv.2025.100666.
- [11] 2 and Jiawei Chen1 Jingqi Wu1, 2, Tongshuai Wang1, 2, 3, Shijia Li1, 2, Wei Tang1, 2, Shuhan Yu1, 2, Zilong Zhao1, “*A green method to improve adsorption capacity of hydrochar by ball - milling: enhanced norfloxacin adsorption performance and mechanistic insight*,” *Carbon Res.*, 2024, doi: 10.1007/s44246-024-00145-w.
- [12] and Y. Y. 2 Takuji Matsumoto 1 dan 1, “*Power Forecasting Models Using Multidimensional Tensor*,” 2021.
- [13] Y. S. 1 and M. D. 1 Qiwen Zheng 1, 2, 3, Hui Zhao 1, 2, 3,* dan 1, “*Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen in Spring in*,” hal. 1–13, 2023.
- [14] M. C. Y. * and T. Silva dan Environmental, “*The Ability of a Bacterial Strain to Remove a Phenolic Structure as an Approach to Pulp and Paper Mill Wastewater Treatment: Optimization by Experimental Design*,” 2022.
- [15] T. Edition dan Editors, “*Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*,” 2012.
- [16] and D. C. U. 2 Ebru Alakavuk 1 dan 1, “*Urban Open Therapy Gardens in EU Cities Mission: Izmir Union Park Proposal*,” hal. 1–19, 2023.
- [17] D. C. Xiaoyu Zhanga, Jian Lub, *, Guodong Zhanga, “*Biochar prepared by fish feces residue: properties and its application for removing antibiotics in aquaculture tail water*,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 280, hal. 290–296, 2022, doi: 10.5004/dwt.2022.29016.
- [18] doi: 10.1016/j. mex. 2023. 102180. [1] A. B. ł owiec b Paschal Enyinnaya Ohale a, Chinenye Adaobi

- Igwegbe a , b , * , Kingsley O. Iwuzor c , d , * , Ebuka Chizitere Emenike c , Christopher Chiedozi Obi a , e, “*MethodsX A review of the adsorption method for norfloxacin reduction from aqu*,” *MethodsX A review of the adsorption method for norfloxacin reduction from aqueous media*,” vol. 10, no. April, 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102180.
- [19] H. W. & L. W. Shixin Yang, Chuangye Yang, Xin Hu, Zhuhong Ding, Ranran Zhou, “*Aqueous norfloxacin removal by novel biochar adsorbent prepared through ethanol-combined ball milling*,” *Environ. Pollut. Bioavailab.*, vol. 36, no. 1, 2024, doi: 10.1080/26395940.2024.2311675.