

حذف آلاینده‌های پساب صنعت خمیر و کاغذ با جاذب‌های زیستی و بررسی عامل‌های موثر

سید مهدی خوش فطرت^{۱*} و علی توکيه^۲

۱. استادیار گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، بروجرد، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، بروجرد، ایران.

دریافت: بهمن ۱۴۰۳ بازنگری: اسفند ۱۴۰۳ پذیرش: اسفند ۱۴۰۳



DOI: 10.30495/JACR1.1403.1197141

چکیده

آلودگی پساب‌های صنایع کاغذ با آلاینده‌های متنوع شیمیایی و زیستی یک چالش زیست‌محیطی مهم است. در این پژوهش، باگاس به‌عنوان جاذب زیستی انتخاب و پس از مشخصه‌یابی آن با طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، امکان حذف آلاینده‌های موجود در پساب صنعت خمیر و کاغذسازی با آن مطالعه شد. پژوهش در محیط آزمایشگاه انجام و عامل‌های موثر در حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) پساب مانند pH، دما و غلظت و زمان تماس جاذب بررسی شدند. نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان داد که جاذب زیستی باگاس در غلظت‌های بالاتر و زمان‌های طولانی‌تر تماس، به‌طور معنی‌داری کارایی حذف COD و سایر آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، pH نقشی موثر داشت. آزمایش‌های بسیار نشان داد که ۵ گرم باگاس در لیتر با زمان تماس ۳۰ دقیقه و در pH برابر ۸/۹ بهترین کارایی را در حذف COD (۷۸/۶ درصد) داشت. این بازدهی در مقایسه با سایر جاذب‌های مورد مطالعه، یعنی پیت (حدود ۴۵ درصد) و الیاف خاص (حدود ۵۲ درصد)، به‌طور چشمگیری بالاتر بود. نتیجه‌های این پژوهش می‌تواند به بهبود فناوری‌های تصفیه پساب و استفاده از مواد طبیعی در فرایندهای زیست‌محیطی کمک کند.

واژه‌های کلیدی: صنعت خمیر و کاغذ، آلاینده‌ها، باگاس، بر جذب، اکسیژن‌خواهی شیمیایی.

مقدمه

رنگ‌ها، رادیونوکلئیدها، پلاستیک‌ها، نانوذره‌ها و عامل‌های بیماری‌زا اشاره کرد [۱ تا ۳]. این آلاینده‌ها موجب تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب می‌شوند و در نتیجه کیفیت آب را کاهش می‌دهند. سالانه با سنتز ترکیب‌های جدید، تنوع و تعداد این آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. چنین آلاینده‌هایی سمی هستند و در صورت تجاوز از غلظت مجاز، بر موجودات زنده

از آلاینده‌های مهم تولیدشده در صنایع می‌توان به آلاینده‌های متفاوتی مانند علف‌کش‌ها، فنل‌ها، فسفات، نیترات‌ها، مواد آلی، مواد مغذی، فراورده‌های دارویی و مراقبت شخصی، مواد پلی و پرفلوئوروآلکیل، بیوسیدها، فلزهای سنگین،

حذف آلاینده‌های پساب صنعت خمیر و کاغذ با جاذب‌های زیستی...

تأثیر منفی می‌گذارند [۴]. برای مثال، حدود ۴۰ درصد از دریاچه‌ها و رودخانه‌های کره زمین با فلزهای سنگین آلوده شده‌اند که می‌تواند به دلیل فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و خانگی باشد. فلزهای سنگین زیست‌تخریب‌پذیر نیستند و تمایل به تجمع زیستی دارند [۵]. این فلزها پایدار هستند و می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر اندامگان‌های متفاوت زیستی تأثیر بگذارند. بسیاری از یون‌های فلزهای سنگین سمی یا سرطان‌زا هستند و حتی در غلظت‌های بسیار کم، می‌توانند موجب آسیب به اندامگان‌های بسیاری مانند ریه‌ها، کلیه‌ها، کبد، پروستات، مری، معده و پوست شوند [۶]. همچنین، می‌توانند موجب اختلالات و بیماری‌های عصبی مانند بیماری‌های آلزایمر و پارکینسون شوند. بنابراین، حذف این آلاینده‌ها از پساب بسیار مهم است. روش‌های زیادی برای تصفیه آلاینده‌های آبی مانند جذب، تبادل یونی، رسوب، جداسازی غشایی، تبدیل الکتروشیمیایی و تجزیه زیستی به‌کارگرفته شده است [۷]. روش‌های متداول مانند تبادل یونی و حذف الکتروشیمیایی، معایب بسیاری از جمله حذف ناقص، نیاز به انرژی بالا و تولید لجن سمی را نشان می‌دهند [۸]. بنابراین، نیاز است راه‌حل‌های مؤثر و سازگار با محیط‌زیست توسعه یابد. فرایند «برجذب» به دلیل انعطاف‌پذیری، هزینه کم، عملکرد بالا، بازسازی کارآمد و سازگاری با محیط‌زیست به‌طور گسترده‌ای به‌کارگرفته شده است [۹]. به‌طور کلی، تمرکز بر استفاده از مواد طبیعی و تجدیدپذیر به‌عنوان جاذب در فرایند جذب است. در این زمینه، جاذب‌های زیستی به دلیل فراوانی و ماهیت غیرسمی توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۱۰].

تفاله نیشکر (باگاس) و مواد جانبی به‌دست‌آمده از آن (خاکستر و پیت) به گونه مؤثری می‌توانند آلودگی‌های پساب صنعت خمیر و کاغذ را برطرف کنند. سومیانونتاناکون^۱ و همکارانش در سال ۲۰۲۳، کربن فعال ساخته‌شده از باگاس نیشکر را با اکسایش نیتریک اسید، اصلاح و ظرفیت آن را برای

حذف سرب ارزیابی کردند [۱۱]. نتیجه‌های تجربی نشان داد که اصلاح با نیتریک اسید موجب افزایش گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن (یعنی هیدروکسیل، کربوکسیل، کربونیل و استر) بر سطوح جاذب می‌شود. وجود گروه‌های عاملی سطحی ظرفیت جذب نمونه‌ها را برای حذف یون فلزهای سنگین مانند Pb^{2+} از محلول آبی تحت تأثیر قرار داد.

به‌طور خلاصه، کربن فعال اصلاح‌شده از باگاس نیشکر یک جاذب جدید، مفید و ارزان، با ظرفیت حذف کارآمد یون‌های محلول‌های آبی است [۱۱]. نانوبلورهای سلولز و نانوبلورهای سلولز اصلاح‌شده با سوکسینیک انیدرید از خمیر باگاس سودا تحت عامل‌های متفاوت برای حذف یون‌های فلزهای سنگین Cd^{2+} و Pb^{2+} از محلول‌های آبی توسط اشرفی بیرگانی و همکارانش در سال ۲۰۲۲ استفاده شد. نتیجه‌ها نشان داد که هر دو نوع جاذب اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده ظرفیت جذب بالاتری برای یون‌های سرب نسبت به یون‌های کادمیم داشتند.

سلولز زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه باگاس نیشکر به‌عنوان جاذب برای حذف آلاینده‌های رنگی بلور ویولت و متیلن‌بلو نیز بررسی شده است [۱۲]. النعیم و همکارانش در سال ۲۰۲۲، تأثیر عامل‌های متفاوت مانند زمان تماس، مقدار جاذب، غلظت رنگ، دما و pH را بر مقدار جذب آلاینده‌های رنگی بررسی کردند. نتیجه‌ها نشان داد که مدل لانگمویر برای مطالعه رفتار تعادلی جذب رنگ‌های بلور ویولت و متیلن‌بلو با جاذب یادشده مناسب است. پیشنهاد شد که سازوکارهای شیمیایی ممکن است بر حذف رنگ‌های بلور ویولت و متیلن‌بلو تأثیر بگذارد.

بنابراین، در این پژوهش، امکان حذف آلاینده‌های موجود در پساب صنعت خمیر و کاغذسازی با جاذب‌های زیستی و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی بررسی شد. در این راستا، سلولز زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه باگاس نیشکر یک ماده مؤثر، سازگار با محیط‌زیست و کم هزینه [۱۳]، به‌عنوان جاذب استفاده شد. همچنین، تأثیر عامل‌هایی مانند مقدار جاذب، pH، زمان تماس

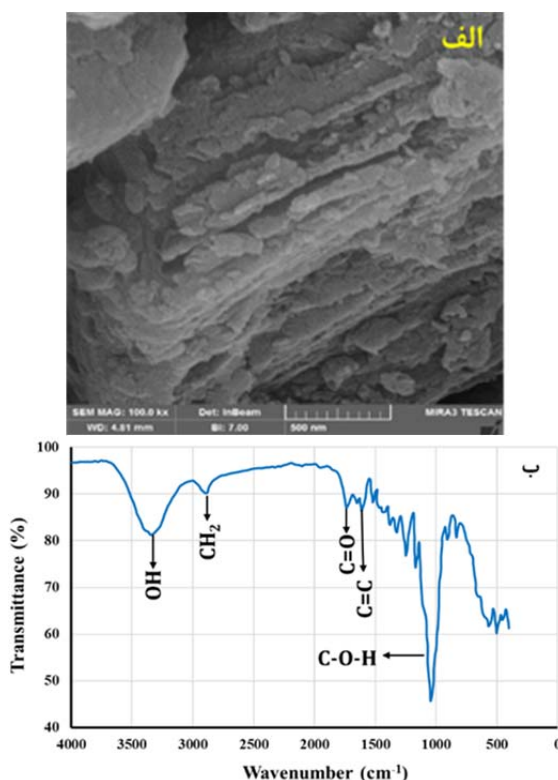
1. Somyanonthanakun

تکرار شدند تا دقت و اعتبار نتیجه‌ها تضمین شود.

نتیجه‌ها و بحث

مشخصه‌یابی باگاس مورد استفاده

برای توصیف ریخت شناسی باگاس مورد استفاده میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) به کار گرفته شد. تصویر FESEM مربوط به باگاس (شکل ۱-الف) نشان می‌دهد که این ترکیب شامل لایه‌های پیوسته‌ای است که ممکن است با لیگنین و همی سلولز تشکیل شده باشد.



شکل ۱ تصویر FESEM (الف) و طیف FTIR (ب) جاذب باگاس

طیف FTIR در شکل ۱-ب برای جاذب باگاس، نشان‌دهنده حضور گروه‌های عاملی متفاوت است که در فرایند جذب آلاینده‌ها در آب نقش دارند. نوار پهن مشاهده‌شده در ۳۳۳۴ cm⁻¹ به ارتعاش کششی گروه هیدروکسیل (OH) در باگاس

بر مقدار حذف آلاینده‌ها بررسی شد تا شرایط بهینه برای دستیابی به بیشینه کارایی در حذف آلاینده‌ها تعیین شود. هم-دماهای جذب برای درک بهتر سازوکارهای حذف آلاینده‌ها نیز مطالعه شد.

کارهای تجربی

مواد و دستگاه‌ها

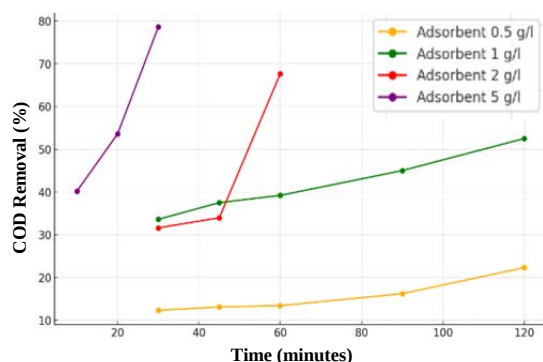
باگاس، پیت و الیاف خاص مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه قند پارس تهیه شدند. مواد شیمیایی شامل سدیم هیدروکسید و هیدروکلریدریک اسید برای تنظیم pH، از شرکت قطران شیمی تهیه شدند. پساب کارخانه کاغذ پارس برای بررسی کارایی جاذب مورد نظر، استفاده شد. تحلیل ویژگی‌های ریخت‌شناختی با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل S4160 ساخت شرکت هیتاچی ژاپن انجام شد. طیف‌های فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) با طیف‌سنج Shimadzu مدل Spectrum GX ثبت شدند. برای اندازه‌گیری مقدار اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) از دستگاه طیف‌سنج Hach مدل DR 1900 ساخت آمریکا استفاده شد.

روش پژوهش

این پژوهش به صورت آزمایشگاهی و با هدف ارزیابی کارایی جاذب‌های زیستی (پیت، الیاف خاص، باگاس) در حذف آلاینده‌های پساب کارخانه کاغذ پارس انجام گرفت. عامل‌ها و سطوح پژوهش در این مطالعه برپایه بررسی تأثیر عامل‌های متفاوت مانند مقدار جاذب، pH و زمان تماس بر مقدار حذف آلاینده‌ها انتخاب شدند. در این راستا، مقدار حذف COD که به طور کلی نشان‌دهنده کارایی جاذب‌ها در جذب آلاینده‌ها است، اندازه‌گیری شد. این عامل‌ها به طور ویژه، برپایه نتیجه‌های تجربی و نیاز به یافتن شرایط عملیاتی مناسب برای دستیابی به بیشینه کارایی در حذف آلاینده‌ها از پساب‌های صنعت خمیر و کاغذسازی، انتخاب شدند. نمونه‌برداری تصادفی از پساب در شرایط فعال کارخانه صورت گرفت. همه آزمایش‌ها سه بار

حذف آلاینده‌های پساب صنعت خمیر و کاغذ با جاذب‌های زیستی...

جاذب در لیتر در زمان ۶۰ دقیقه به درصد حذف ۶۷/۷ درصد می‌رسد که نشان‌دهنده کارایی بالاتر نسبت به غلظت‌های پایین‌تر است. در نهایت، ۵ گرم جاذب در لیتر بالاترین کارایی حذف را نشان می‌دهد و حتی در زمان کوتاه ۳۰ دقیقه به بیشینه درصد حذف ۷۸/۶ دست می‌یابد. این نتیجه‌ها نشان می‌دهند که افزایش مقدار جاذب و زمان تماس، به‌طور مؤثری کارایی حذف COD را بهبود می‌بخشد، به‌گونه‌ای که مقدارهای بالاتر جاذب به حذف مؤثرتر آلاینده‌ها منجر می‌شود. به‌طور کلی، نتیجه‌ها نشان می‌دهند که با افزایش مقدار جاذب‌ها، مقدار حذف آلاینده‌ها بهبود یافته است. این بهبود به دلیل افزایش تعداد مکان‌های فعال برای جذب آلاینده‌ها و افزایش تماس آلاینده‌ها با جاذب‌ها است.



شکل ۲ کارایی جاذب با مقدارهای متفاوت برای حذف COD در زمان‌های متفاوت

تأثیر pH بر کارایی جاذب‌ها

برای تحلیل تأثیر pH بر کارایی جاذب‌ها در کاهش COD، تغییرهای pH در هر غلظت جاذب به صورت مستقل و با میانگین درصد حذف COD در زمان‌های متفاوت مقایسه شد. برپایه شکل ۳، با مقدار ۰/۵ گرم جاذب در لیتر، مشاهده می‌شود که با افزایش pH از ۸ به ۹/۵، درصد حذف COD از ۱۷/۵۳ به ۳۳/۳۳ درصد (در زمان ۱۲۰ دقیقه) افزایش یافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که در این غلظت، pH بالاتر موجب

مربوط است. در 2880 cm^{-1} ، نواری مشاهده می‌شود که به کشش‌های متقارن و نامتقارن گروه CH_2 - مربوط است. همچنین، وجود نوارهایی در 1740 cm^{-1} و 1610 cm^{-1} به ترتیب نشان‌دهنده ارتعاش کششی گروه کربونیل (C=O) و گروه آلکن (C=C) است. نوار با شدت زیاد مربوط به ارتعاش کششی گروه کربوکسیلیک اسید (C-OH) در 1053 cm^{-1} ، نشان‌دهنده احتمال حضور ترکیبات اسیدی در باگاس است.

ارزیابی داده‌های آزمایشگاهی (حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD^1))

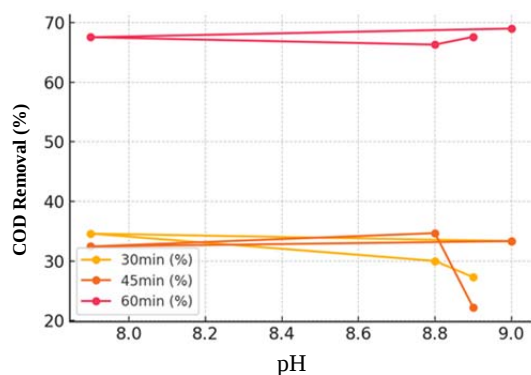
تأثیر عامل‌های متفاوت شامل pH، زمان تماس و مقدار جاذب‌ها بر درصد حذف COD و روندهای جذب مناسب‌ترین جاذب با مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ بررسی شد.

اثر غلظت جاذب

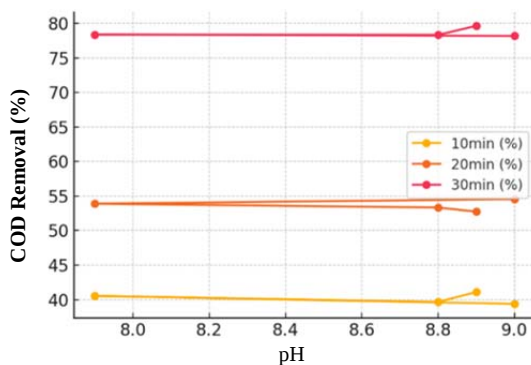
به‌طور کلی، نتیجه‌ها نشان داد که جاذب با غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر کمترین کارایی را داشت و با افزایش غلظت به ۱، ۲، و ۵ گرم بر لیتر، کارایی حذف به‌طور چشمگیری افزایش یافت (شکل ۲). همچنین، مشاهده شد که در همه غلظت‌ها، با افزایش زمان تماس، مقدار حذف COD افزایش یافت، هرچند که این افزایش در زمان‌های پایانی و با نزدیک شدن جاذب به حالت اشباع، کمتر شد. بهترین عملکرد مربوط به غلظت ۵ گرم بر لیتر و زمان تماس ۳۰ دقیقه بود که توانست حدود ۷۸/۶ درصد از COD را حذف کند. این نتیجه‌ها تأیید می‌کند که مقدار بالاتر جاذب و زمان تماس طولانی‌تر می‌تواند به کارایی بهتر در حذف آلاینده‌ها منجر شود. در غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر، کمترین کارایی مشاهده می‌شود و درصد حذف COD در طول زمان به تدریج افزایش می‌یابد، ولی نسبت به سایر غلظت‌ها درصد حذف پایین‌تری دارد. با ۱ گرم جاذب در لیتر، با افزایش زمان تماس، کارایی حذف بهبود یافته و درصد حذف بیشتری نسبت به غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر مشاهده می‌شود. با ۲ گرم

1. Chemical oxygen demand (COD)

برای مقدار ۲ گرم جاذب در لیتر، تا pH برابر با ۸/۸ تغییرات چشمگیری در درصد حذف COD مشاهده نمی‌شود. هرچند که با افزایش pH به ۸/۹ به‌ویژه در زمان‌های کمتر تغییر حذف COD به‌نسبت محسوس است (شکل ۵). این روند برای مقدار ۵ گرم جاذب در لیتر نیز رخ داد (شکل ۶).



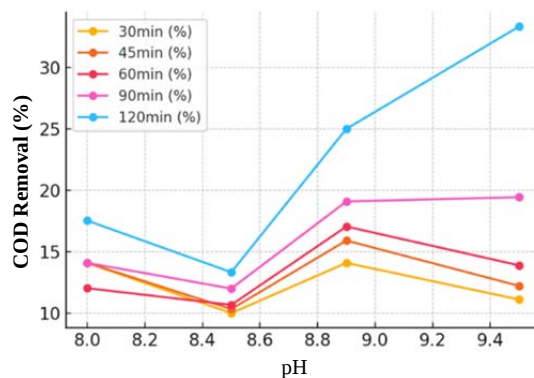
شکل ۵ تاثیر pH بر کارایی حذف با مقدار ۲ گرم جاذب در لیتر



شکل ۶ تاثیر pH بر کارایی حذف با مقدار ۵ گرم جاذب در لیتر

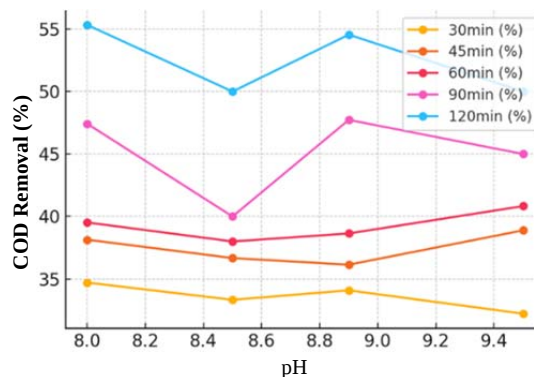
با توجه به داده‌های موجود، بهترین گستره pH برای حذف آلاینده‌ها به‌نظر می‌رسد که بین ۸/۸ تا ۹/۵ باشد، زیرا در این گستره، جاذب‌ها کارایی بهتری در کاهش COD داشته‌اند.

افزایش کارایی حذف آلاینده‌ها شده است. همچنین، در pH بالاتر (بین ۸/۹ تا ۹/۵) کارایی بهتری را در حذف COD نشان داده است.



شکل ۳ تاثیر pH بر کارایی حذف با مقدار ۰/۵ گرم جاذب در لیتر

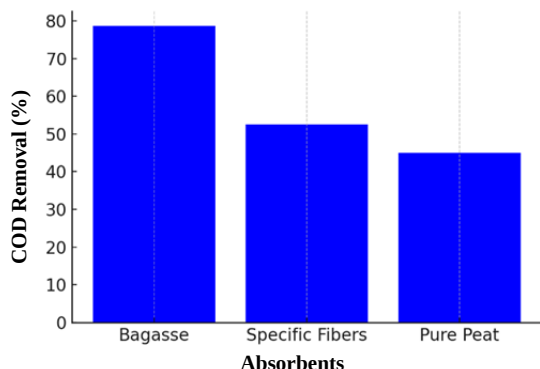
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با مقدار ۱ گرم جاذب در لیتر و تغییر pH در گستره ۸ تا ۹/۵، در زمان ۱۲۰ دقیقه، درصد حذف COD از ۵۵/۳۳ درصد در pH برابر با ۸ به ۵۴/۵۵ درصد در pH برابر با ۸/۹ تغییر کرده است. این نتیجه‌ها نشان می‌دهد که افزایش pH تا حدودی کارایی حذف را کاهش داده است، ولی تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود.



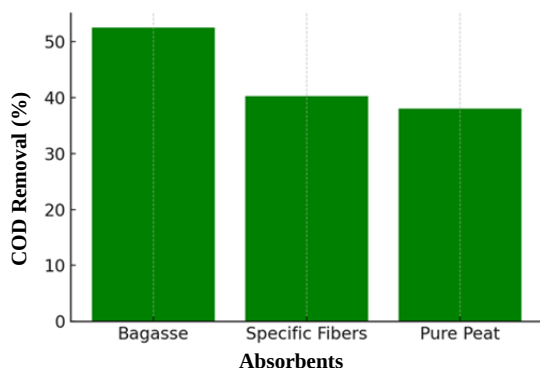
شکل ۴ تاثیر pH بر کارایی حذف با مقدار ۱ گرم جاذب در لیتر

حذف آلاینده‌های پساب صنعت خمیر و کاغذ با جاذب‌های زیستی...

تأثیر زمان تماس



شکل ۷ مقایسه کارایی جاذب‌ها در حذف COD با مقدار ۵ گرم جاذب در لیتر در زمان تماس ۳۰ دقیقه



شکل ۸ مقایسه کارایی جاذب‌ها در حذف COD با مقدار ۱ گرم جاذب در لیتر در زمان تماس ۱۲۰ دقیقه

تحلیل جامع داده‌ها برای شناسایی شرایط بهینه

برپایه داده‌های به‌دست‌آمده، شرایط مناسب برای حذف آلاینده‌های موجود در پساب خروجی کارخانه کاغذ پارس با جاذب‌های زیستی (پیت، الیاف خاص، و باگاس) شناسایی شد. بهترین شرایط برای حذف COD با توجه به سه عامل کلیدی یعنی مقدار جاذب، pH، و زمان تماس تعیین شد. در این مطالعه، مشخص شد که ۵ گرم جاذب در لیتر، بیشترین کارایی را در حذف COD داشته است. در این غلظت و با زمان تماس ۳۰ دقیقه، درصد حذف COD به ۷۸/۶ درصد رسید که این مقدار در مقایسه با غلظت‌های پایین‌تر به‌طور چشمگیری بیشتر بود. این نتیجه‌ها نشان داد که افزایش مقدار جاذب منجر به

برپایه داده‌های به‌دست‌آمده با افزایش زمان تماس، مقدار حذف COD به‌طور کلی افزایش یافت که نشان‌دهنده بهبود کارایی جاذب‌ها در جذب آلاینده‌ها بود. برای مثال، برای ۵ گرم جاذب در لیتر، در زمان ۱۰ دقیقه، درصد حذف COD برابر با ۴۰/۲ درصد بود. با افزایش زمان تماس به ۲۰ دقیقه، درصد حذف COD به ۵۳/۶ درصد رسید. در زمان ۳۰ دقیقه، درصد حذف COD به ۷۸/۶ درصد افزایش یافت، که بالاترین مقدار حذف در این غلظت و این دوره زمانی بود. این روند نشان می‌دهد که زمان تماس بیشتر، فرصت بیشتری را برای واکنش‌های شیمیایی و جذب مؤثر آلاینده‌ها فراهم می‌کند و به جاذب اجازه می‌دهد تا آلاینده‌های بیشتری را جذب کند. بنابراین، زمان تماس یک عامل کلیدی در بهبود کارایی جذب جاذب‌ها است.

مقایسه جاذب‌های متفاوت (پیت، الیاف و باگاس)

با بررسی نتیجه‌های به‌دست‌آمده برای جاذب‌های متفاوت (باگاس، الیاف خاص و پیت خالص) در شرایط متفاوت غلظت و زمان تماس، مشاهده شد که عملکرد جاذب‌ها به‌طور چشمگیری با تغییر این دو عامل متفاوت بود. در غلظت‌های بالاتر و زمان‌های تماس طولانی‌تر، کارایی حذف COD افزایش یافت. کارایی جاذب‌های یادشده با مقدار ۵ گرم جاذب در لیتر و در زمان تماس ۳۰ دقیقه در شکل ۷ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، باگاس بهترین عملکرد را در حذف COD نشان داده است (۷۸/۶ درصد). این نشان می‌دهد که باگاس، به‌دلیل ویژگی‌های سطحی و قابلیت جذب بالا، توانسته است در شرایط یادشده نسبت به دو جاذب دیگر، کارایی بهتری داشته باشد. روند یادشده برای کارایی جاذب‌های یادشده با مقدار ۱ گرم جاذب در لیتر و مدت تماس ۱۲۰ دقیقه نیز مشاهده شد (شکل ۸).

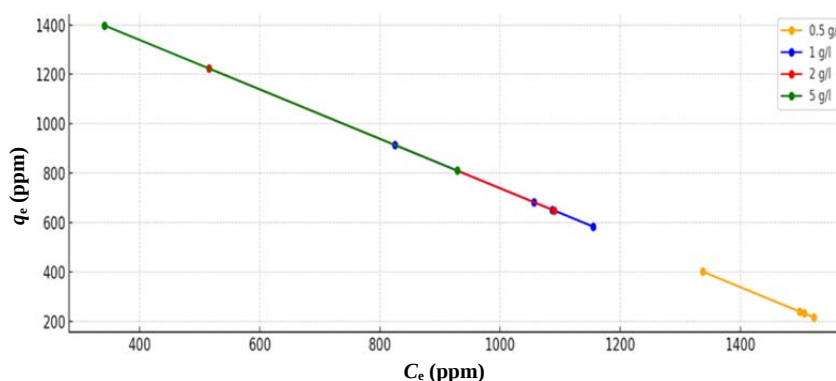
آلاینده‌ها از محیط‌های آبی فراهم می‌کنند. در این پژوهش، هم‌دماهای لانگمویر و فرن‌دلیچ به‌عنوان مدل‌های متداول، بررسی شدند.

هم‌دما لانگمویر

مدل هم‌دما لانگمویر بر پایه سه فرضیه اصلی بنا شده است: (۱) سطح جاذب یکنواخت است و تمام مکان‌های جاذب انرژی یکسانی دارند. (۲) جاذب مولکول‌ها به‌صورت یک لایه رخ می‌دهد و مولکول‌های جاذب‌شده با یکدیگر تداخل ندارند. (۳) ظرفیت جاذب جاذب محدود است و پس از رسیدن به بیشینه ظرفیت، افزایش غلظت مولکول‌ها تأثیری بر مقدار جاذب ندارد. معادله هم‌دما لانگمویر به‌صورت زیر است:

$$\frac{K_e C_e}{K_e C_e + 1} = \frac{q_e}{q_{\max}} \quad (1)$$

که در آن q_e مقدار ماده جاذب‌شده، $q_{\max}$ بیشینه ظرفیت جاذب، K_e ثابت هم‌دما و C_e غلظت تعادلی است. شکل ۹، نشان‌دهنده مقدار جاذب (q_e) در برابر غلظت تعادلی (C_e) برای مقدارهای متفاوت جاذب باگاس (۰/۵، ۱، ۲ و ۵ گرم در لیتر) است.



شکل ۹ هم‌دما لانگمویر فرایند حذف

افزایش تعداد مکان‌های فعال برای جذب آلاینده‌ها شد و کارایی حذف را بهبود بخشید. همچنین، بررسی تأثیر pH بر کارایی حذف نشان داد که pH بین ۸/۸ تا ۹/۵ مناسب‌ترین گستره برای جذب بهتر آلاینده‌ها بود. زمان تماس نیز به‌عنوان یکی از عامل‌های مؤثر بر کارایی حذف آلاینده‌ها بررسی و مشخص شد که با افزایش زمان تماس از ۱۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه، میزان حذف آلاینده‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافت. به‌طور خلاصه، شرایط بهینه برای حذف بیشترین مقدار COD با جاذب‌های زیستی شامل ۵ گرم جاذب در لیتر، گستره pH بین ۸/۸ تا ۹/۵ و زمان تماس ۳۰ دقیقه بود. در این شرایط، جاذب‌ها، به‌ویژه باگاس، بیشترین کارایی را در حذف آلاینده‌ها داشت. این نتیجه‌ها به پژوهشگران و مدیران محیط‌زیست کمک می‌کند تا در طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های تصفیه پساب از این شرایط بهینه استفاده کنند و بهبود چشمگیری در کیفیت پساب خروجی به‌دست آورند.

هم‌دماهای جاذب

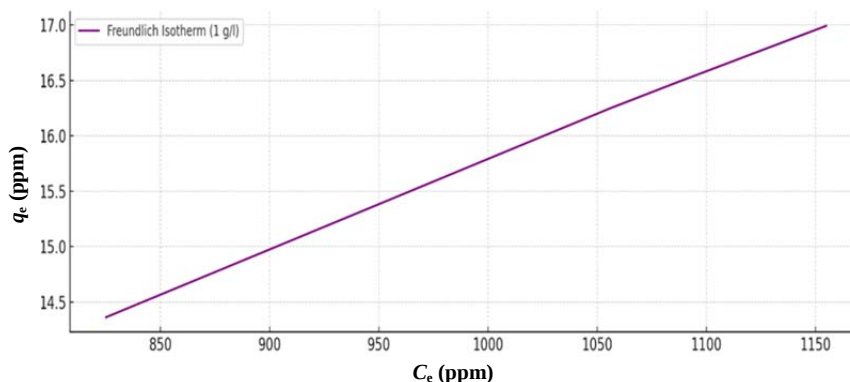
هم‌دماهای جاذب به‌عنوان مدل‌هایی برای توصیف تعادل جذب مواد در سطح جاذب‌ها به‌کارگرفته می‌شوند. این هم‌دماها اطلاعات مفیدی را در مورد کارایی و ظرفیت جاذب‌ها در حذف

حذف آلاینده‌های پساب صنعت خمیر و کاغذ با جاذب‌های زیستی...

آزمایش باشد که این جاذب را به گزینه‌ای مؤثر برای حذف آلاینده‌ها تبدیل کرده است.

هم‌دمای فروندلیچ

مدل هم‌دمای فروندلیچ یک مدل تجربی است که برای توصیف جذب بر روی جاذب‌های غیرهمگن به‌کارگرفته می‌شود. شکل ۱۰ مقدار جذب را برای یک مقدار ویژه (۱ گرم در لیتر) برپایه مدل فروندلیچ نشان می‌دهد. نظریه‌های مربوط به ثابت K_F و نمای n به‌صورت فرضی برای این نمودار در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰ هم‌دمای فروندلیچ فرایند حذف

بطور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد جاذب مورد مطالعه با ترکیب سازوکارهای جذب شیمیایی (برپایه مدل لانگمویر) و فیزیکی (برپایه مدل فروندلیچ)، از ظرفیت جذب بالا و میل ترکیبی قابل توجه برخوردار است. این ویژگی‌های یگانه، کارایی بالای جاذب را در حذف آلاینده‌ها تأیید می‌کند و آن را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای عملی تصفیه تبدیل می‌کند.

مقایسه درصد حذف COD با جاذب‌های مورد مطالعه در این پژوهش و پژوهش‌های دیگر

نتایج برآزش داده‌ها با مدل لانگمویر نشان می‌دهد که جاذب مورد مطالعه ظرفیت جذب بالایی (q_e برابر با ۰/۹۸ ppm) دارد که کارایی آن را نسبت به دیگر جاذب‌ها برتر می‌سازد. ثابت تعادل جذب (K_e برابر با $۵/۲ \text{ L ppm}^{-1}$) بیانگر تمایل شدید جاذب به آلاینده و تشکیل پیوندهای قوی است که به احتمال ماهیت شیمیایی دارند و فرایند جذب را گرمازا می‌کند. این نتایج، که با مطالعات مشابه همخوانی دارد، نشان می‌دهد جذب به‌صورت تک‌لایه‌ای و بر سطحی همگن رخ داده است. بهبود عامل‌های جذب در مقایسه با پژوهش‌های پیشین می‌تواند ناشی از اصلاحات ساختاری جاذب یا بهینه‌سازی شرایط

نتیجه برآزش داده‌ها با مدل فروندلیچ ($۰/۵۸ (\frac{\text{mg g}^{-1}}{(\text{ppm})^{1/n}})$) نشان‌دهنده جذب مطلوب و فیزیکی آلاینده‌ها بر سطحی غیرهمگن است. مقدار بالای K_F بیانگر ظرفیت جذب بالا و $n > 1$ مؤید سهولت فرایند جذب است. این نتایج بیانگر کارایی برتر جاذب مورد مطالعه نسبت به پژوهش‌های مشابه است که به احتمال ناشی از ویژگی‌های یگانه جاذب و شرایط بهینه‌سازی شده آزمایش است. رفتار گرمازای سامانه و همخوانی نتایج با مدل فروندلیچ، کارایی این جاذب را در حذف آلاینده‌ها تأیید می‌کند.

حذف COD نسبت به سایر جاذب‌ها نشان داده است. بنابراین، باگاس می‌تواند در حذف آلاینده‌ها از پساب‌های صنعتی موثر باشد.

در جدول ۱ مقایسه‌ای از مقدار حذف COD در این پژوهش و مطالعه‌های پیشین ارائه شده است. همان‌گونه که از این جدول مشاهده می‌شود، جاذب باگاس با مقادارها و زمان‌های متفاوت تماس به‌طور چشمگیری کارایی بهتری در

جدول ۱ مقایسه درصد حذف COD باگاس با جاذب‌های دیگر

جاذب مورد استفاده	غلظت جاذب (گرم در لیتر)	pH	زمان تماس (دقیقه)	درصد حذف COD	مرجع
یاگاس	۵	۸٫۸-۹	۳۰	۷۸٫۶	پژوهش حاضر
کربن فعال یاگاس	۰٫۵	۷	۳۰	۳۱٫۲	[۱۱]
نانوبلور سلولز	۱	۸	۱۲۰	۴۵٫۰	[۱۲]
سلولز زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه یاگاس	۱	۸	۶۰	۵۴٫۰	[۱۳]

عنوان یکی از عامل‌های مهم در فرایند جذب نقش داشت. افزایش زمان تماس موجب افزایش فرصت برای جذب بیشتر آلاینده‌ها شد. غلظت جاذب یکی دیگر از عامل‌های مؤثر بر مقدار جذب آلاینده‌ها بود. در این پژوهش مشخص شد که افزایش مقدار جاذب به نحو معنی‌داری موجب کاهش غلظت آلاینده‌ها شد. مقدار ۵ گرم جاذب در لیتر، بیشترین کارایی را در حذف COD، داشت. در این غلظت و با زمان تماس ۳۰ دقیقه، درصد حذف COD به ۷۸٫۶ درصد رسید که این مقدار در مقایسه با مدارهای پایین‌تر به‌طور چشمگیری بیشتر بود. مقایسه کارایی این جاذب با جاذب‌های زیستی استفاده‌شده در پژوهش‌های دیگر نشان داد که باگاس به‌طور چشمگیری از کارایی بالاتری برخوردار است. در مجموع، این روش پژوهش امکان بررسی دقیق و علمی تأثیر جاذب‌های زیستی در تصفیه پساب صنعتی را فراهم آورد.

نتیجه‌گیری

استفاده از باگاس به‌عنوان جاذب زیستی به‌دلیل ساختار متخلخل آن و قابلیت جذب بالا، در بسیاری از مطالعه‌ها به‌عنوان یک روش مؤثر برای کاهش آلاینده‌های آلی و معدنی مطرح شده است. ساختار سلولزی باگاس موجب می‌شود تا فلزهای سنگین و ترکیب‌های آلی به‌خوبی جذب شوند و به کاهش آلودگی آب کمک کنند. پیت، به‌عنوان ماده‌ای زیستی، به‌دلیل ویژگی‌های یگانه مانند سطح بالای جذب و قابلیت بالا در نگهداری مواد آلاینده، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که استفاده از جاذب‌های زیستی مانند باگاس و پیت، در حذف آلاینده‌های موجود در پساب صنعت خمیر و کاغذ مؤثر است. pH یکی از عامل‌های کلیدی در کارایی جذب بود. تنظیم pH موجب بهبود چشمگیر کارایی جذب آلاینده‌ها شد. زمان تماس نیز به-

مراجع

- [1] Srihanam P, Prapasri A, Janthar M, Leangtanom P, Thongsomboon W. Efficient dye removal using manganese oxide-modified nanocellulosic films from sugarcane bagasse. International Journal of

Biological Macromolecules. 2024;280:135910. doi: [org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135910](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135910)

- [2] Al-Hazmi HE, Luczak J, Habibzadeh S, Hasanin MS, Mohammadi A, Esmaeili A, et al. Polysaccharide nanocomposites in wastewater

- treatment: A review. *Chemosphere*. 2024;347:140578. doi: **org/10.1016/j.chemosphere.2023.140578**
- [3] Bhatt A, Sahu N, Dada AC, Prajapati SK, Arora P. Assessing sustainability of microalgae-based wastewater treatment: Environmental considerations and impacts on human health. *Journal of Environmental Management*. 2024;354:120435. doi: **org/10.1016/j.jenvman.2024.120435**
- [4] Ye S, Chen Y, Yao X, Zhang J. Simultaneous removal of organic pollutants and heavy metals in wastewater by photoelectrocatalysis: A review. *Chemosphere*. 2021;273:128503. doi: **org/10.1016/j.chemosphere.2020.128503**
- [5] Shoma K, Kansha Y. Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31(39):51064-51097. doi: **org/10.1007/s11356-024-34584-0**
- [6] Ramírez-Coronel AA, Mohammadi MJ, Sh Majdi H, Zabibah RS, Teherian M, Prosetio DB, et al. Hospital wastewater treatment methods and its impact on human health and environments. *Reviews on Environmental Health*. 2024; 39(3):423-434. doi: **org/10.1515/reveh-2022-0216**
- [7] Kallawar, GA, Bhanvase BA. A review on existing and emerging approaches for textile wastewater treatments: Challenges and future perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31(2):1748-1789. doi: **org/10.1007/s11356-023-31175-3**
- [8] Zamora-Ledezma C, Negrete-Bolagay D, Figueroa F, Zamora-Ledezma E, Ni M, Alexis F, et al. Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology & Innovation*. 2021;22:101504. doi: **org/10.1016/j.eti.2021.101504**
- [9] Salehi E, Shams S. A review of renewable biosorbents for pollutant removal by adsorption process. *Advanced and Intelligent Materials Mechanics Journal*. 2022;2(3):257-298. doi: **org/10.52547/masm.2.3.257**
- [10] Rajendran S, Priya AK, Senthil Kumar P, Hoang TKA, Sekar K, Chong KY, et al. A critical and recent developments on adsorption technique for removal of heavy metals from wastewater-A review. *Chemosphere*. 2022;303:135146. doi: **org/10.1016/j.chemosphere.2022.135146**
- [11] Somyanonthanakun W, Ahmed R, Krongtong V, Thongmee S. Studies on the adsorption of Pb(II) from aqueous solutions using sugarcane bagasse-based modified activated carbon with nitric acid: Kinetic, isotherm and desorption. *Chemical Physics Impact*. 2023;6:100181. doi: **org/10.1016/j.chphi.2023.100181**
- [12] Ashrafi Birgani S, Talaeipour M, Hemmasi A, Bazyar B, Larijani K. Removal of heavy metal ions using cellulose nanocrystals and succinic anhydride-modified cellulose nanocrystals prepared from bleached soda bagasse pulp. *BioResources*. 2022;17(3):4886. doi: **org/10.15376/biores.17.3.4886-4904**
- [13] Omer AS, El Naeem GA, Abd-Elhamid AI, Farahat OOA, El-Bardan AA, Soliman HMA, et al. Adsorption of crystal violet and methylene blue dyes using a cellulose-based adsorbent from sugarcane bagasse: Characterization, kinetic and isotherm studies. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:3241-54. doi: **org/10.1016/j.jmrt.2022.06.045**

Removal of pollutants from pulp and paper industry wastewater using biosorbents and evaluation of effective parameters

S.M. Khoshfetrat^{1,*}, A. Tokiyeh²

1. Assistant Prof. of Department of Chemistry, Faculty of Science, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

2. MSc. Student of Department of Chemistry, Faculty of Science, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

Abstract: The contamination of paper industry effluents with diverse chemical and biological pollutants represents a significant environmental challenge. In this study, bagasse was investigated as a biosorbent for pollutant removal from pulp and paper industry wastewater. The adsorbent was characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and field emission scanning electron microscopy (FESEM) prior to application. The laboratory-scale study examined critical parameters affecting chemical oxygen demand (COD) removal, including pH, adsorbent concentration, and contact time. Additionally, pH played a crucial role. Multiple tests revealed that bagasse achieved optimal COD removal efficiency (78.6%) at an adsorbent concentration of 5 g/l, a contact time of 30 minutes, and a pH of 9.8. This performance was notably superior to that of other tested adsorbents, namely peat (~45%) and specialty fibers (~52%). The findings of this study can contribute to advancing wastewater treatment technologies and promoting the use of natural materials in environmental processes.

Keywords: Pulp and paper industry, Pollutants, Bagasse, Adsorption, Chemical oxygen demand.