

Production of Biosorbents from Citrus Wastes for Adsorption of Pollutants and Salt from Wastewaters

H. Ghorbani Jafarbigloo¹, A. Chackoshian Khorasani^{2*}

1, 2- Ph. D Student and Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

* (Corresponding Author Email: chakoshian@um.ac.ir)

Received: 28-04-2024

Revised: 06-07-2024

Accepted: 03-08-2024

Available Online: 19-12-2024

تولید جاذب‌های زیستی از ضایعات مرکبات برای جذب آلاینده‌ها و نمک از فاضلاب‌ها

هانیه قربانی جعفریگلو^۱، علیرضا چکشیان خراسانی^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

* (رایانامه نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: chakoshian@um.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳

Abstract

One of the most important environmental issues in the world, and especially in Iran, is the accumulation of solid waste because its amount in the gross domestic product and national income is worrying. Solid wastes such as citrus wastes have no economic value and are considered useless. Therefore, it is necessary to use these wastes by providing a suitable method to valorize them. On the other hand, the wastewater of many industries contains a wide range of organic and mineral pollutants. Its cost-effective treatment is necessary to solve the water crisis. The adsorption method using cheap and available biosorbents is one of the most efficient methods for removing pollutants from industrial wastewater. Thus, using citrus wastes and improving their adsorption properties with the physical and chemical treatments, carbonization, and a combination of these methods simultaneously solves the problem of citrus wastes and industrial wastewater. In this review study, different adsorbents obtained from citrus wastes along with their production methods are investigated, and their adsorption behavior is expressed based on isotherm, kinetic, and thermodynamic models. Also, adsorbent regeneration, economic evaluation, and suggestions for the development of this approach are provided.

Keywords: Citrus, Biosorbent, Surface Adsorption, Wastewater, Desalination.

چکیده

یکی از مهمترین مباحث محیط‌زیستی در سطح جهان و به‌ویژه ایران، انباشت ضایعات جامد است زیرا حجم ضایعات تولید ناخالص داخلی و درآمد ملی نگران‌کننده است. ضایعات جامد مانند ضایعات مرکبات ارزش اقتصادی ندارند و غیرقابل مصرف تلقی می‌شوند. بنابراین، استفاده از این ضایعات با ارائه روشی مناسب برای تبدیل آن‌ها به موادی با ارزش افزوده ضروری است. از طرفی، فاضلاب‌های بسیاری از صنایع، حاوی طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی و معدنی است که تصفیه مقرون‌به‌صرفه آن‌ها برای حل بحران آب ضروری است. روش جذب سطحی با استفاده از جاذب‌های زیستی ارزان قیمت و در دسترس یکی از کارآمدترین روش‌های حذف آلاینده‌ها از فاضلاب‌های صنعتی است. بنابراین، استفاده از ضایعات مرکبات و بهبود خواص جذب آن‌ها با کمک تیمارهای فیزیکی و شیمیایی، کربنه‌کردن، و یا ترکیبی از این روش‌ها، سبب حل هم‌زمان معضل ضایعات مرکبات و فاضلاب‌های صنعتی می‌شود. در این مطالعه مروری، جاذب‌های مختلف به‌دست آمده از ضایعات مرکبات به همراه روش‌های تولید آن‌ها بررسی و رفتار جذب آن‌ها براساس مدل‌های ایزوترم، سینتیک و ترمودینامیک بیان می‌شود. همچنین، روش‌های بازیابی جاذب‌ها، ارزیابی اقتصادی و پیشنهادهایی برای توسعه این رویکرد ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مرکبات، جاذب زیستی، جذب سطحی، فاضلاب، نمک‌زدایی.

زیستی است (Mahato و همکاران، ۲۰۲۰). در کل، صنعتی شدن و شهرنشینی، کاهش آب‌های زیرزمینی، و مدیریت نامناسب منابع، منجر به کمبود آب آشامیدنی شده است. از طرفی، ضایعات جامد تولید شده از فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی، و خانگی به‌طور مداوم در حال افزایش هستند که جمع‌آوری و دفع بی‌رویه آن‌ها باعث آلودگی خاک، آب یا هوا و ایجاد خطراتی برای سلامت انسان و محیط‌زیست می‌شود.

این مطالعه با هدف ارائه رویکردی برای حل هم‌زمان معضل انباشت ضایعات زیستی و فاضلاب‌های صنعتی، به مرور پژوهش‌های انجام شده بر روی ضایعات مرکبات استفاده شده در تولید جاذب برای حذف آلاینده‌ها و نمک‌زدایی از فاضلاب‌ها می‌پردازد. در این پژوهش، جاذب‌های زیستی تهیه شده از ضایعات مرکبات، برای نمک‌زدایی، حذف مواد آلی و معدنی از فاضلاب‌ها بررسی شدند. همچنین، روش‌های تولید جاذب با استفاده از تیمار فیزیکی و شیمیایی، کربنه کردن، یا ترکیبی از این روش‌ها مورد مطالعه قرار گرفتند. رفتار جذب براساس مدل‌های ایزوترم، سینتیک، و ترمودینامیک بررسی شد. در نهایت، با ارائه روش‌های بازیابی جاذب و جنبه‌های اقتصادی، دورنگامی برای توسعه صنعتی رویکرد مورد مطالعه ارائه شد.

تصفیه آب

• آلاینده‌های آب و روش‌های جداسازی

آلودگی آب یکی از تهدیدکننده‌ترین مشکلات در سطح جهان است زیرا ذخایر آب شیرین با رنگ‌ها و سایر فاضلاب‌های سمی تخلیه شده توسط فعالیت‌های صنعتی آلوده می‌شوند (Samrot و همکاران، ۲۰۲۲). اکثر فاضلاب‌های طبیعی حاوی میکروارگانیزم‌ها و مواد مغذی هستند که واکنش‌های بیوشیمیایی را آغاز می‌کنند. از دیدگاه شیمیایی، فاضلاب‌ها از اجزای آلی و معدنی مانند کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، چربی‌ها و گریس‌ها، سورفکتانت‌ها، آفت‌کش‌ها، فنل‌ها و ... تشکیل می‌شوند (Gupta و Sharma، ۲۰۱۴). شاخص‌هایی مانند BOD^۱ و COD^۲ برای اندازه‌گیری مقدار بار آلی موجود در آب بررسی می‌شوند. آنالیز اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) برای اندازه‌گیری مصرف اکسیژن در حین تجزیه مواد آلی و اکسیداسیون مواد معدنی، از طریق عوامل اکسیدکننده مانند دی کرومات پتاسیم در زمان کوتاه استفاده می‌شود. از سوی دیگر، آنالیز BOD روش استاندارد برای تعیین غلظت اکسیژن مورد نیاز میکروارگانیزم‌ها برای تجزیه مواد آلی است که در مدت حداقل ۵ روز اتفاق می‌افتد. در کل، آنالیز COD و BOD به‌عنوان دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری برای تعیین مقدار مواد آلی قابل اکسیداسیون با استفاده از فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی مطرح است (Aguilar-Torrejón و همکاران، ۲۰۲۳). توسعه یک روش تصفیه آب کارآمد و امکان‌پذیر برای حذف آلاینده‌های فلزات

فرآیندهای صنعتی و برخی از فعالیت‌های انسانی، مقدار زیادی ضایعات را در قالب مواد آلاینده مانند فلزات سنگین، رنگ‌ها، کودها، مواد شیمیایی فعال دارویی، فاضلاب‌های تولیدی در صنایع باتری و ... تولید می‌کنند. هنگامی که این مواد بدون تصفیه، به آب‌های زیرزمینی یا سطحی تخلیه می‌شوند، نه تنها باعث آلودگی و آسیب به اکوسیستم می‌شوند، بلکه اثرات سمی بر سلامت انسان، حیوانات، و محصولات غذایی نیز دارند (Mahato و همکاران، ۲۰۲۱).

تلاش‌های قابل توجهی توسط پژوهشگران و صنعتگران در توسعه فرآیندهای تصفیه فاضلاب صورت گرفته است. تقاضای آب شیرین امروزه به‌طور قابل توجهی بیشتر از قبل است. براساس گزارش شورای جهانی آب (WWC)^۱، تقریباً ۳/۹ میلیارد نفر روی کره زمین باید تا سال ۲۰۳۰ در مناطق کم آب زندگی کنند. سازمان جهانی بهداشت (WHO)^۲ پیش‌بینی می‌کند که در حال حاضر ۲/۱ میلیارد انسان از آب آشامیدنی سالم و تازه برخوردار نیستند (Rana و همکاران، ۲۰۲۱). ساماندهی آب آشامیدنی به یک نگرانی مهم برای دولت‌ها و هم برای مردم تبدیل شده است. به‌طور کلی، دو دسته منابع آبی وجود دارد، که عبارتند از: منابع آب معمولی (دریاچه‌ها، آب‌های زیرزمینی، و رودخانه‌ها) و منابع آبی نامتعارف (آب دریا، آب‌های شور و ...). (Rana و همکاران، ۲۰۲۱). منابع آبی نامتعارف به آن دسته از آب‌هایی گفته می‌شود، که از آن‌ها به‌صورت معمول نمی‌توان استفاده کرد. کاهش بارندگی، برداشت زیاد از منابع آب شیرین و تداخل آن با منابع آب شور، استفاده از آب‌های نامتعارف را به‌عنوان راه‌حلی مناسب برای تامین آب شیرین برای جامعه ضروری کرده است. زیرا ۹۷/۵٪ از کل ذخیره آب روی زمین (۱/۴ میلیارد کیلومتر مکعب) شور است. آب شور و آب دریا نمی‌تواند مستقیماً توسط انسان استفاده شود زیرا حاوی مقدار زیادی نمک محلول است، در نتیجه قبل از مصرف باید تصفیه یا نمک‌زدایی شود (Rana و همکاران، ۲۰۲۱).

مرکبات یکی از محصولات کشاورزی است که میزان تولید بسیاری در سرتاسر جهان دارد و می‌توان آن را در مناطق نیمه گرمسیری در هر دو نیمکره جنوبی و شمالی کشت کرد. پوست و پالپ مرکبات ۴۰ تا ۶۰ درصد از وزن کل مرکبات را تشکیل می‌دهند. تولید جهانی مرکبات $10^6 \times 202$ تن در سال است که منجر به تولید صنعتی بیش از $10^6 \times 23$ تن ضایعات مرکبات (CPW)^۳ می‌شود (عمدتاً پوست، پالپ، دانه و ...). استراتژی‌های مدیریت CPW (به عنوان مثال دفن زباله، سوزاندن) از نظر تأثیرات محیط‌زیستی و کارایی انرژی مشکل‌ساز هستند (Karanicola و همکاران، ۲۰۲۱). در نتیجه، نیاز روزافزون برای تبدیل محصولات جانبی و مازاد کشاورزی به محصولات جدید و مقرون‌به‌صرفه وجود دارد. افزودن ارزش به بقایای فرآوری مرکبات و به‌ویژه میوه‌های کامل که از بازارهای آزاد دور ریخته می‌شوند، نیازمند توسعه مدل‌های جدید پالایشگاه

سنگین، رنگ‌ها، داروها، و ترکیبات معدنی ضروری است (Wu و همکاران، ۲۰۲۲). در حال حاضر روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی، و بیولوژیکی برای حذف یا کاهش آلاینده‌های آب و حذف فلزات سنگین از اجسام مختلف محیطی استفاده می‌شوند که عبارتند از: جذب سطحی، رسوب شیمیایی اتم‌ها/ یون‌های فلزی، تبادل یونی، تبدیل ردوکس، اسمز معکوس، انعقاد، شناورسازی، الکترودیالیز، اولترافیلتراسیون با استفاده از غشای مناسب، اکسیداسیون شیمیایی، گندزدایی یا ضدعفونی. در برخی از این روش‌ها محدودیت‌هایی وجود دارد. به‌عنوان مثال، حذف ناقص، شرایط عملیاتی پیچیده و تولید لجن سمی که سبب نگرانی بیشتری برای دفع می‌شود. اخیراً، قوانین سخت‌گیرانه حفاظت از محیط‌زیست و سیاست‌های دولتی/ اداری برای تشویق آگاهی عمومی نسبت به مسائل محیط‌زیستی، پژوهشگران را در سراسر جهان به ابداع روش‌های کارآمد ترغیب کرده است. تجمع فلزات سنگین و رنگ‌ها در فاضلاب یک تهدید محیط‌زیستی پایدار با پیامدهای مخاطرات جدی است که همه موجودات زنده را تحت تأثیر قرار می‌دهد و حذف آن‌ها به یک چالش محیطی تبدیل شده است (El Malti و همکاران، ۲۰۲۲). تعداد قابل توجهی از رنگ‌ها به دلیل ساختار شیمیایی پیچیده و زیست تخریب پذیری ضعیف که منجر به تخریب جوامع آبی و همچنین ایجاد بیماری‌های مختلف مانند اختلالات سرطان‌زا، جهش‌زا و آسیب به اندام‌های انسان می‌شود، به بسیاری از روش‌های تصفیه رایج مقاوم هستند. اصلاح سیستم‌های آبی آلوده به رنگ هنوز به‌عنوان یک چالش بزرگ در نظر گرفته می‌شود که می‌توان با بهره‌برداری و اتخاذ روش‌های کاربردی جدید بر آن غلبه کرد (Khorasani و Shojaosadati، ۲۰۱۹a). از بین روش‌های فوق، روش جذب سطحی توسط جاذب‌های زیستی به‌عنوان یکی از ارزان‌ترین، کارآمدترین و راحت‌ترین روش‌ها نشان داده شده است (Mahato و همکاران، ۲۰۲۱). جذب سطحی فرآیندی است که طی آن برخی از اجزای فاز سیال به سطح یک جاذب سطحی جامد منتقل می‌شوند و یک لایه نازک مولکولی یا اتمی از ماده جذب شونده روی جاذب ایجاد می‌کند. با انتخاب جاذب مناسب در فرآیند جذب سطحی می‌توان کمک مطلوبی به عملکرد جذب و جداسازی آلاینده‌ها از فازهای گاز و مایع نمود. اخیراً توجه زیادی به تهیه جاذب‌های کم‌هزینه، زیست‌شناختی و محیط‌زیستی ایمن شده است (Aichour و Zaghouane-Boudiaf، ۲۰۲۰). اگرچه، هزینه‌های جداسازی و بازیابی جاذب‌ها بزرگترین مانع برای استفاده از این روش است. از این رو، فناوری‌های بازیابی و جداسازی کارآمد و مقرون‌به‌صرفه باید توسعه داده شوند تا امکان استفاده از روش جذب در مقیاس بزرگ فراهم شود (Czarnota و همکاران، ۲۰۱۹).

• نمک‌زدایی

نمک‌زدایی از آب به‌طور کلی به دو روش حرارتی و غشایی تقسیم‌بندی می‌شود که هر دو روش به انرژی نیاز دارند. فناوری

غشایی شامل اسمز معکوس^۶، یون‌زدایی خازنی^۷، نانوفیلتراسیون^۸، الکترودیالیز^۹ و الکترودیالیز معکوس^{۱۰} است؛ و فناوری حرارتی شامل تقطیر خورشیدی^{۱۱}، تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای (MSF)^{۱۲}، تقطیر چند مرحله‌ای (MED)^{۱۳}، و تقطیر فشرده‌سازی بخار (VCD)^{۱۴} است (Bharadwaj و همکاران، ۲۰۰۸). نمک‌زدایی یک فرآیند فنی است که به‌طور کلی برای استخراج آب شیرین از آب دریا استفاده می‌شود و اولین بار توسط نیروی دریایی سلطنتی در قرن هجدهم برای افزایش استقلال ناوبری بدون ذخیره آب خالص بیشتر در کشتی‌ها معرفی شد. با این حال، اولین واحد نمک‌زدایی در سال ۱۸۸۵ در اسکاتلند تأسیس شد و Weir Westgarth تنها شرکتی بود که واحدهای نمک‌زدایی را تا جنگ جهانی دوم تأمین می‌کرد (Rana و همکاران، ۲۰۲۱). پژوهش‌های اخیر در راستای تولید جاذب‌های خورشیدی برای تبخیر آب و شیرین‌سازی آب شور انجام شده است. کربنیزه کردن گونه‌های گیاهی از جمله بامبو، ذرت، ساقه ذرت، پوسته نارگیل، هویج، و باقیمانده میوه (گیلاس، انگور، پرتقال، و سیب) برای تهیه مواد فتوترمال به‌منظور نمک‌زدایی خورشیدی انجام شد. در این پژوهش با افزایش غلظت کربن در ساختار ماده، جذب خورشیدی و سرعت تبخیر بهبود یافت. علاوه بر این، گونه‌های گیاهی مورد استفاده به‌عنوان جاذب‌های گرمایی و خورشیدی شناور، آب را با کمک میکروکانال‌های طبیعی تبخیر می‌کنند. این مواد گیاهی نه تنها کارایی را بهبود می‌بخشند، بلکه مزایای اقتصادی و محیط‌زیستی نیز دارند (Arunkumar و همکاران، ۲۰۲۲).

جاذب‌های زیستی

به‌منظور حذف آلاینده‌های آب، روش جذب سطحی به‌طور مداوم مورد پژوهش و اجرا قرار می‌گیرد. جاذب‌های متعددی تا به امروز برای حذف آلاینده‌ها از پساب و فاضلاب گزارش شدند. برخی از آن‌ها اکسیدگرافن، آلومینا، ژئولیت، هیدروژل‌ها، آئروژل‌ها، کربن فعال، بیوجار، زغال سنگ نارس، ضایعات لیگنوسولوزی و کشاورزی، MCM-41 و MCA، خاک رس پلیمری، خاک‌های هیومیک، نانوجاذب، SiO_2 مزوحفره، جاذب زیستی و غیره هستند (Yadav و همکاران، ۲۰۲۲؛ Osman و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال، هزینه تولید جاذب‌های مصنوعی بسیار بالا است، که استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند. این امر باعث افزایش تقاضا برای جاذب‌های زیستی شده است. در شکل (۱) مواد مختلفی مانند زیست توده‌های چوبی و علفی، ضایعات کشاورزی مانند بقایای محصول و جنگل، و ضایعات حیوانی (مانند فلس ماهی، استخوان شتر، پوسته خرچنگ و میگو، پوست تخم‌مرغ و پر مرغ) به‌عنوان جاذب زیستی مشاهده می‌شود. عوامل مؤثری مانند سازگاری با محیط‌زیست، هزینه و منبع زیست توده در انتخاب جاذب زیستی در نظر گرفته می‌شوند (Osman و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر جاذب‌های زیستی رایج، پژوهش‌های

مختلفی برای تولید جاذب‌های زیستی کامپوزیتی با کاربردهای خاص نیز انجام شده است. نانوکامپوزیت پکتین/ نانوالیاف لیگنوسولوز/ نانوالیاف کیتین به‌عنوان یک جاذب زیستی کارآمد برای جذب کلسترول و نمک‌های صفراوی بررسی شد (Khorasani و همکاران، ۲۰۲۱). کامپوزیت مغناطیسی پکتین-کلرلا ولگاریس (MPC-50)^{۱۵} با ترکیبی از ۵۰٪ پکتین و ۵۰٪ کلرلا ولگاریس برای جذب ۹ رنگ مختلف (متیلن بلو^{۱۶}، متیل قرمز^{۱۷}، متیل اورانژ^{۱۸}، تولویدین بلو^{۱۹}، کریستال ویولت^{۲۰}، سافرانین^{۲۱}، بروموتیمول آبی^{۲۲}، بروموفنل^{۲۳}، مالاشیت سبز^{۲۴} و مخلوط آن‌ها) از محلول آبی با ظرفیت جذب بالا تهیه شد (Shojaosadati و Khorasani، ۲۰۱۹a). مخلوط بهینه کدو سبز-زنجیبیل-کلرلا ولگاریس به‌عنوان یک جاذب خوراکی برای جذب گلوزک، کلسترول، و نمک صفراوی برای بهبود میکروفلور روده‌ای و کاهش خطرات بیماری‌های روده‌ای استفاده شد (Khorasani و Shojaosadati، ۲۰۱۹b).



شکل ۱- طبقه‌بندی جاذب‌های زیستی رایج (Osman و همکاران، ۲۰۲۳)

اخیراً جاذب‌های زیستی به دلیل ظرفیت جذب بالا، هزینه پایین، تجدیدپذیر بودن، تولید لجن کم، در دسترس بودن، ماهیت غیر سمی و دوستدار محیط‌زیست، توجه پژوهشگران را در فرآیند تصفیه فاضلاب در مقایسه با سایر روش‌های گران قیمت به خود جلب کرده‌اند. جذب آلاینده‌ها روی جاذب زیستی به دلیل وجود چندین گروه عاملی فعال مانند COOH ، NH_2 و OH در سطح آن‌ها مؤثرتر است (Adewuyi، ۲۰۲۰؛ Yadav و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات مختلفی در زمینه حذف آلاینده‌های آب مبتنی بر جاذب زیستی گزارش شده است که به آن‌ها پرداخته می‌شود. از پوست برنج به‌عنوان جاذب زیستی برای جذب یون‌های مس، کادمیم، و سرب (به ترتیب با میزان جذب ۱۰/۹، ۱۶/۷ و ۵۷/۱ میلی‌گرم بر گرم)؛ از کرین فعال برای جذب یون‌های مس و سرب (به ترتیب با میزان جذب ۱۳/۸ و ۱۰۹/۳۰ میلی‌گرم بر گرم)؛ از پوست موز برای جذب

یون‌های مس، کادمیم، و سرب (به ترتیب با میزان جذب ۵۲/۳۶، ۳۴/۱۳ و ۲۵/۹۱ میلی‌گرم بر گرم)؛ از باگاس نیشکر اصلاح شده برای جذب یون‌های مس، کادمیم، و سرب (به ترتیب با میزان جذب ۶۹/۴، ۱۰۶/۴ و ۲۲۲/۲ میلی‌گرم بر گرم)؛ از پوست درخت کاج اصلاح شده برای جذب یون‌های مس، کادمیم، و سرب (به ترتیب با میزان جذب ۱۱/۳، ۵/۷ و ۶/۷ میلی‌گرم بر گرم) استفاده شد (Inagaki و همکاران، ۲۰۱۳). ضایعات گل زعفران، ضایعات گوجه‌فرنگی، کاه گندم، بیوچار کاه گندم، و بیوچار کاه گندم آسیاب شده برای جذب یون سرب (به ترتیب با میزان جذب ۴۵/۶۲، ۱۵۲، ۴۶/۳۳، ۱۱۹/۵۵ و ۱۳۴/۶۸ میلی‌گرم بر گرم)؛ پوست موز، پوست خیار، و پوست سیب‌زمینی برای جذب رنگ متیلن بلو (به ترتیب با میزان جذب ۲۱۱/۹، ۱۷۹/۹ و ۱۰۷/۲ میلی‌گرم بر گرم) بررسی شدند (Yadav و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، چوب ذرت، ضایعات گل آفتابگردان، پوست بادام زمینی، برگ‌های فیکوس، دانه سویا، کاه جو، پوست فندق، پوست بادام، برگ درخت خرما، و تفاله چغندر قند برای جذب یون‌های سرب و کادمیم به کار گرفته شدند (Dinh و همکاران، ۲۰۲۱). از طرفی، بیوچار به‌دست آمده از سلولز پوست گردو برای جذب ید از محلول آبی استفاده شد که میزان جذب ۵۵۵/۶۳ میلی‌گرم بر گرم را نشان داد (Khorasani و Satvati، ۲۰۲۴). در مجموع، در میان بسیاری از جاذب‌های ارزان قیمت زیستی مطالعه شده، ضایعات مرکبات می‌تواند یکی از گزینه‌های مناسب، برای تولید جاذب‌های زیستی تصفیه کننده آب به حساب می‌آیند.

بررسی رفتار جاذب

• ایزوترم جذب

مدل‌سازی ایزوترم یک روش کاربردی برای بررسی رفتار جذب بین جاذب‌ها و آلاینده‌ها در یک محیط تعادلی است. مدل‌های ایزوترم منجر به درک رفتار جذب، و در نتیجه طراحی جاذب مناسب با آلاینده می‌شود. علاوه بر این، مدل‌سازی ایزوترم می‌تواند بینشی در مورد مکانیسم حذف آلاینده‌ها و حداکثر ظرفیت جذب ارائه دهد. ایزوترم‌های جذب زمانی ارائه می‌شوند یک جاذب و یک ماده جذب شونده برای مدت زمان کافی در دمای ثابت بایکدیگر به تعادل برسند. ایزوترم جذب برای طراحی، بهینه‌سازی، و عیب‌یابی آزمایش‌های جذب بسیار مهم است. مدل‌های ایزوترم جذب متعددی در طول سال‌های گذشته برای بررسی همبستگی تعادل ترمودینامیکی بین آلاینده‌ها و جاذب‌ها در دماهای ثابت به کار گرفته شدند. به دلیل برخی محدودیت‌های مدل، همه مدل‌های ایزوترم نمی‌توانند برای بیان داده‌ها و توضیح روش جذب آلاینده مناسب باشند. بعضی از ایزوترم‌های جذب عبارتند از ایزوترم لانگمویر^{۲۵}، ایزوترم فروندلیچ^{۲۶}، سیپس^{۲۷}، ایزوترم دوینین-رادوشکویچ^{۲۸}، ایزوترم تمکین^{۲۹}، و ایزوترم برونر، امت و تلر (BET)^{۳۰} (Osman و همکاران، ۲۰۲۳). متداولترین

ایزوترم جهت مدل سازی فرایند جذب سطحی، معادلات لانگمویر و فروندلیچ هستند که به طور گسترده به کار می روند. معادلات ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ به ترتیب در رابطه های (۱) و (۲) بیان می شود (Satvati و Khorasani, ۲۰۲۴):

$$q_e = (q_m C_e) / (K_f + C_e) \quad (1)$$

$$q_e = K_f C_e^n \quad (2)$$

که در اینجا، q_e (mg/g) میزان ماده جذب شده بر روی سطح جاذب، q_m (mg/g) حداکثر میزان ماده جذب شده بر واحد جرم جاذب، C_e (mg/L) غلظت تعادلی ماده جذب شده، K_f و K_e (mg/L) به ترتیب ثابت معادله ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ بیانگر قدرت اتصال میان سطح جاذب و مولکول های جذب شونده، و n شدت جذب است.

• سینتیک جذب

مدل های سینتیک به بیان عملکرد و درک همبستگی های جاذب-آلاینده کمک می کنند. مدلهایی مانند مدل های الویچ^{۳۱}، آوامی^{۳۲}، بانگهام^{۳۳}، و مدل های انتشار لایه^{۳۴}، بهترین مدل های کاربردی شبه مرتبه اول^{۳۵} و شبه مرتبه دوم^{۳۶} هستند. مدل سینتیک یک فرآیند براساس حذف آلاینده های مختلف از محلول های آلوده، بیان کننده دوره تعادل، مرتبه واکنش، و سمت واکنش است که رفتار و نرخ جذب آلاینده را نشان می دهد. به طور کلی، روش جذب زیستی که اساساً به زمان متکی است را می توان با مدل های سینتیک مختلف مانند شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم، مدل وبر و موریس، مدل بوید، مدل بانگهام و مدل الویچ بررسی کرد (Osman و همکاران، ۲۰۲۳). دو مدل سینتیک شبه مرتبه اول لاگ رگرن^{۳۷} و مدل سینتیک شبه مرتبه دوم برای توصیف سینتیک جذب مواد آلاینده روی جاذب به ترتیب در رابطه های (۳) و (۴) ارائه شده است (Satvati و Khorasani, ۲۰۲۴):

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

$$q_t = (q_e^2 k_2 t) / (1 + q_e k_2 t) \quad (4)$$

که در اینجا، k_1 (h⁻¹) و k_2 (g/mg.h) به ترتیب ثابت سرعت مدل های سینتیک شبه مرتبه اول لاگ رگرن و شبه مرتبه دوم هستند. q_t (mg/g) ظرفیت جذب در زمان t (h) و q_e (mg/g) ظرفیت جذب در زمان تعادل است.

• ترمودینامیک جذب

ترمودینامیک جذب بینشی در مورد تغییرات انرژی مرتبط با مکانیسم جذب فراهم می کند، که برای توضیح رفتار جذب براساس کمیت های ترمودینامیکی، ΔG° ، ΔH° و ΔS° ارائه می شود. شرح این توابع ترمودینامیکی به شرح زیر است: انرژی آزاد گیبس (ΔG°) برای شناسایی خود به خودی سیستم ضروری است. هنگامی که ΔG° منفی است، جذب خود به خودی است، در حالی که $\Delta G^\circ > 0$ نشان دهنده غیر خود به خودی بودن است. به طور کلی، سیستم های آلاینده-جاذب خود به خودی هستند. از این رو، انرژی آزاد گیبس تعیین کننده دمای مناسب برای انجام جذب است. تغییر انتالپی

(ΔH°)، انرژی به دست آمده یا انرژی مصرف شده در طی فرآیند جذب را نشان می دهد. اگر تغییر انتالپی بیشتر از صفر باشد، جذب گرماگیر است، در حالی که وقتی کمتر از صفر شود جذب گرمازا است. بیشتر واکنش ها گرمازا هستند. تغییر انتروپی (ΔS°) تصادفی بودن و میزان بی نظمی در فرآیند را تعیین می کند. محاسبه دقیق مقادیر ترمودینامیکی برای تعیین جزئیات بیشتر در مورد ماهیت روش جذب آلاینده ضروری است (گرماگیر/ گرمازا/ خود به خودی و ... (Osman و همکاران، ۲۰۲۳). تغییر انرژی آزاد گیبس (ΔG)، انتالپی (ΔH)، و انتروپی (ΔS) برای توصیف ترمودینامیک جذب مواد آلاینده روی جاذب استفاده می شود که در رابطه (۵) بیان شده است (Satvati و Khorasani, ۲۰۲۴):

$$\Delta G = -RT \ln K_D = \Delta H - T \Delta S \quad (5)$$

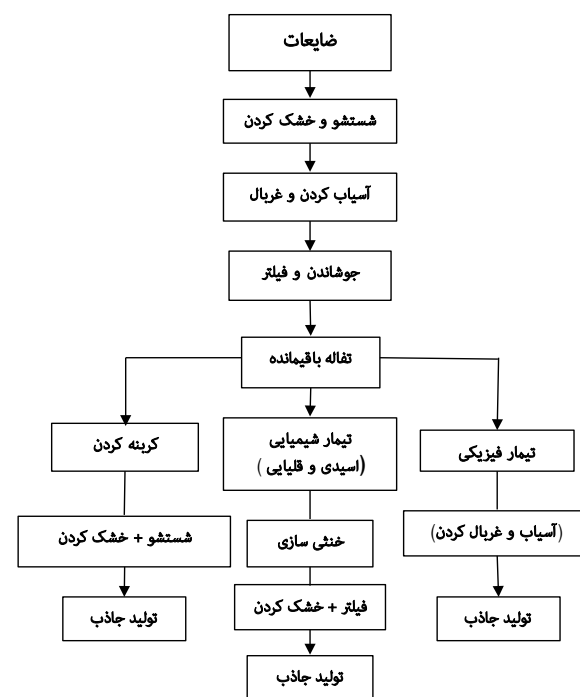
که در آن، ΔG (J/mol) تغییر انرژی آزاد گیبس، ΔH (J/mol) انتالپی و ΔS (J/mol.K) انتروپی است. R (J/mol.K) ثابت گاز است. T (K) دما و K_D ضریب توزیع ($K_D = C_{ea}/C_e$) است. C_{ea} (mg/L) و C_e (mg/L) به ترتیب غلظت های تعادلی آلاینده روی جاذب و رومانند هستند.

جاذب های زیستی حاصل از مرکبات برای تصفیه آب

• روش های تولید جاذب های زیستی

تولید مرکبات سالانه بیش از ۱۱۵ میلیون تن است که باعث فراوانی این نوع میوه در جهان می شود (Zaghouane و Aichour, ۲۰۲۰). Boudiaf (۲۰۲۰). با این حال سالانه حدود ۲ میلیون تن ضایعات مرکبات تولید می شود (Joglekar و همکاران، ۲۰۲۱). در حال حاضر یکی از مهمترین نگرانی های محیط زیستی، افزایش ضایعات کشاورزی است که می توانند به محصولات با ارزش تبدیل شوند (Khorasani و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین، نیاز روزافزون برای تبدیل محصولات جانبی و مازاد کشاورزی به محصولات جدید با ارزش افزوده وجود دارد. تبدیل ضایعات مرکبات به جاذب های زیستی کم هزینه، اهداف متعددی را مانند حذف آلاینده ها از محلول های آبی و کاهش موثر آلودگی محیط زیست دنبال می کند. پوست مرکبات پس از استخراج اسانس و سایر مواد بیوشیمیایی ارزشمند، دیگر کاربرد عملی ندارد و از این رو یک منبع ارزشمند تجاری و قابل دسترس برای تولید مواد جاذب محسوب می شود. جاذب های حاصل از ضایعات مرکبات را می توان با روش های مختلفی از جمله فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی، و ترموشیمیایی توسعه داد. هزینه تقریبی برای تهیه جاذب حاصل از زیست توده لیگنوسلولزی تقریباً ۴۸ دلار در هر تن است که به طور قابل توجهی کمتر از جایگزین های تجاری مثل کربن فعال (۱۵۰۰-۴۰۰ دلار در تن) است. بر خلاف مواد کربنی مانند کربن فعال و زغال زیستی، جاذب های زیستی، نیاز کمی به انرژی دارند زیرا به فرآیند پیرولیز در دمای بالا نیاز ندارند (Mahato و همکاران، ۲۰۲۰).

انواع جاذب‌های زیستی به‌دست آمده از ضایعات مرکبات را می‌توان بر اساس روش تولید طبقه‌بندی کرد: (۱) استفاده مستقیم از پوست، (۲) پوست پروتونه شده، (۳) پکتین پوست، (۴) پوست فاقد پکتین، (۵) ضایعات کربنه شده، (۶) ضایعات اصلاح شده شیمیایی، و (۷) ضایعات اصلاح شده بیوشیمیایی یا آنزیمی (Mahato و همکاران، ۲۰۲۱). تولید جاذب‌های زیستی به طور خلاصه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- تولید جاذب زیستی از ضایعات مرکبات با روش‌های فیزیکی، شیمیایی، و کربنه کردن

۱- جاذب‌های زیستی حاصل از روش فیزیکی

این دسته از جاذب‌ها با تیمار فیزیکی یا مکانیکی ضایعات مرکبات به‌دست می‌آیند. در این روش، ابتدا زیست توده (ضایعات مرکبات) برای حذف آلودگی، با آب مقطر یا آب دیونیزه ۳ تا ۵ بار شسته می‌شود. سپس، ضایعات شستشو شده تحت خشک کردن قرار

جدول ۱- جذب سطحی آلاینده‌ها از محلول آبی توسط جاذب‌های حاصل از روش فیزیکی

منبع	ترمودینامیک	مدل سینتیکی	ایزوترم	BET (m ² /gr)	آلاینده	میزان جذب (میلی‌گرم جذب شونده بر گرم جاذب)	روش تولید	ضایعات
Sivaraj و همکاران، ۲۰۰۱)	-	شبه مرتبه اول لاگرن	لانگمویر	-	رنگ اسید ویولت ۱۷ ^{۳۸}	۱۹/۸۸	پودر کردن	پوست پرتقال
Saeed و همکاران، ۲۰۱۰)	گرواگیر	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	رنگ کریستال ویولت	۲۵۴/۱۶	پودر کردن	پوست گریپ فروت
Bhatti و همکاران، ۲۰۱۲)	گرمازاو غیر خودی به خودی	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	رنگ متیلن بلو	۹۶/۴	پودر کردن	باگاس پرتقال

می‌گیرند، تا زمانی که به وزن ثابتی برسند. سپس، در معرض آسیاب و الک کردن برای رسیدن به اندازه ذرات مورد نظر (تقریباً نیم تا یک میلی‌متر) قرار گرفته و برای مطالعات جذب آماده می‌شوند (Mahato و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات انجام شده در راستای استفاده از این دسته جاذب‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. باتوجه به جدول (۱)، برای جذب رنگ متیلن بلو با روش فیزیکی از باگاس پرتقال، پوست لیمو شیرین، پوست پرتقال، پوست مرکبات و پوست دارابی استفاده شد. میزان جذب متیلن بلو با پوست دارابی < پوست لیمو شیرین < باگاس پرتقال < پوست مرکبات < پوست پرتقال بود.

برای جذب رنگ ریمازول برلیانت بلو از پوست لیمو و پوست پرتقال استفاده شد که میزان جذب برای این رنگ با پوست پرتقال بیشتر بود. برای جذب یون کادمیم از برگ لیمو، پوست دارابی، پوست گریپ فروت و پوست مرکبات استفاده شد. میزان جذب این یون با پوست مرکبات < پوست گریپ فروت < برگ لیمو < پوست دارابی بود. برای جذب یون سرب از برگ لیمو، پوست دارابی، پوست نارنگی، و پوست پرتقال استفاده شد. میزان جذب این یون با پوست پرتقال < پوست نارنگی < پوست دارابی < برگ لیمو بود.

برای جذب یون نیکل از برگ لیمو، پوست گریپ فروت، پوست لیمو شیرین و پوست پرتقال استفاده شد. میزان جذب با پوست گریپ فروت < پوست پرتقال < پوست لیمو شیرین < برگ لیمو بود. برای جذب یون مس از برگ لیمو، تفاله نارنج، پوست پرتقال و پوست مرکبات استفاده شد. میزان جذب این یون با پوست پرتقال < پوست مرکبات < برگ لیمو < تفاله نارنج بود.

برای جذب یون روی از برگ لیمو، و پوست پرتقال استفاده شد که میزان جذب با پوست پرتقال بیشتر از برگ لیمو بود. باتوجه به نتایج، روش فیزیکی نتایج قابل قبولی را نشان داد. پوست پرتقال برای جذب یون‌های فلزی از ظرفیت جذب بالایی برخوردار است. علاوه بر این، میزان جذب رنگ‌ها نسبت به میزان جذب یون‌های فلزی با استفاده از این ضایعات بیشتر است. بنابراین، می‌توان گفت روش‌های فیزیکی برای تولید جاذب زیستی به دلیل ماهیت سازگار با محیط‌زیست ترجیح داده می‌شود.

منبع	ترمودینامیک	مدل سینتیکی	ایزوترم	BET (m ² /gr)	آلاینده	میزان جذب (میلی گرم جذب شونده بر گرم جاذب)	روش تولید	ضایعات
Rahmat) و (همکاران، ۲۰۱۶)	-	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	رنگ ریمازول برلیانت بلو آر ^{۳۹}	۹/۵۸	پودر کردن	پوست لیمو
Shakoor) و (Nasar، ۲۰۱۶)	گرماگیر و خود به خودی با افزایش آنتروپی	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	رنگ متیلن بلو	۲۲۷/۳	پودر کردن	پوست لیموشیرین
Sowmya) و Lakshmi (Munilakshmi، ۲۰۱۶)	-	شبه مرتبه دوم	فرونلیچ	-	رنگ دایرکت بلو ۴۰ ۷۷	۹/۴۳	پودر کردن	برگ پرتقال
Muniraj) و (همکاران، ۲۰۲۰)	-	-	لانگمویر	-	کادمیم، سرب، نیکل، روی و مس	به ترتیب برابر با: ۱۲/۸۲۰، ۲۳/۸۱۰، ۱۷/۸۵۷، ۱۱/۳۶۴ و ۳۱/۲۵۰	پودر کردن	برگ لیمو
Januário) و (همکاران، ۲۰۲۲)	گرماگیر، خود به خودی، و برگشت پذیر	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	رنگ سافرانین اورانژ ۴۱	۳۹۲	پودر کردن	پوست ماندارین (نارنگی)
Naveed) و (همکاران، ۲۰۱۶)	گرماگیر	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	منگنز (II)	۴۱/۱۶	پودر کردن	تفاله گریپ فروت
Dinh) و (همکاران، ۲۰۲۱)	مطلوب و خود به خودی	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	سرب (II) و کادمیم (II)	۱۳/۳۵ و ۴۷/۱۸	پودر کردن	پوست دارابی
Torab-) و Mostaedi (همکاران، ۲۰۱۳)	گرماگیر، خود به خودی و مطلوب	شبه مرتبه دوم	فرونلیچ	-	کادمیم (II) و نیکل (II)	۴۶/۱۳ و ۴۲/۰۹	پودر کردن	پوست گریپ فروت
Shukla Singh) (۲۰۱۷)	گرمازا و خود به خودی	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	نیکل (II)	۲۷/۷۸	پودر کردن	پوست لیموشیرین
Namasivayam) و همکاران، (۱۹۹۶)	-	شبه مرتبه اول	لانگمویر و فرونلیچ	-	رنگ کنگو رد ^{۴۲} رنگ پروسیون اورانژ ^{۴۳}	۲۲/۴۴ ۱/۳	پودر کردن	پوست پرتقال
Annadurai) و (همکاران، ۲۰۰۲)	-	شبه مرتبه اول لاگرگن	لانگمویر	-	رنگ رودامین بی ^{۴۴}	۳/۲۲	پودر کردن	پوست پرتقال
					رنگ اسید اورانژ ^{۴۵} یا متیل اورانژ	۲۰/۵		
					رنگ بیسیک بلو ^{۴۶} یا متیلن بلو	۱۸/۶		
					رنگ بیسیک ویولت ^{۴۷} ۱۰ پارودامین	۱۴/۳		
Ashraf) (همکاران، ۲۰۱۱)	-	-	فرونلیچ	-	رنگ دایرکت رد ^{۴۸} یا کنگو رد	۱۴	پودر کردن	پوست نارنگی
					رنگ متیل ویولت ^{۴۹}	۱۱/۵		
Ashraf) (همکاران، ۲۰۱۱)	-	-	فرونلیچ	-	کاتیون ها (کلسیم و منیزیم)	۲۷/۴۶	پودر کردن	پوست نارنگی

منبع	ترمودینامیک	مدل سینتیکی	ایزوترم	BET (m ² /gr)	آلاینده	میزان جذب (میلی گرم جذب شونده بر گرم جاذب)	روش تولید	ضایعات
Gondhalekar و (Shukla, ۲۰۱۴)	-	شبه مرتبه دوم	لانگمویر، فروندلیچ و سیس	-	اورانیوم (VI)	۷۵/۳۳	پودر کردن	پوست لیموشیرین
Khaskheli و (همکاران، ۲۰۱۱)	گرماگیر و خود به خودی	موریس ویر، شبه مرتبه دوم و الویچ	فروندلیچ، لانگمویر، دوبینین ردوشکوویچ و فلوری-هاگینز	-	آرسنیک ^{۵۰}	۳۷/۷۶	پودر کردن	پوست پرتقال
Serin و Gönen) (۲۰۱۲)	گرمازا	شبه مرتبه دوم	لانگمویر و فروندلیچ	-	نیکل (II)	۲۹/۰۴	پودر کردن	پوست پرتقال
(Sattar, ۲۰۱۳)	گرمازا	-	فروندلیچ	-	کبالت (III)	-	پودر کردن	نارنج
Pavan) و (همکاران، ۲۰۰۸)	-	شبه مرتبه اول	لانگمویر	-	یون های سرب	۱۱۲/۱	پودر کردن	پوست پونکان (نارنگی)
Hameed) و (همکاران، ۲۰۰۸)	-	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	رنگ متیلن بلو	۳۴۴/۸۳	پودر کردن	پوست دارابی
Mafra) و (همکاران، ۲۰۱۳)	گرماگیر و خود به خودی	-	لانگمویر و فروندلیچ	-	رنگ ریمازول برلیانت بلو	۱۱/۶۲	پودر کردن	پوست پرتقال
Khormaei) و (همکاران، ۲۰۰۷)	-	شبه مرتبه دوم	لانگمویر و فروندلیچ	-	مس	۲۱/۷	پودر کردن	تفاله نارنج
FENG) و (GUO, ۲۰۱۲)	-	-	لانگمویر	-	یون های مس، سرب و روی	به ترتیب برابر با: ۱۱۳/۵، ۴۴/۲۸ و ۲۱/۲۵	پودر کردن	پوست پرتقال
El Malti) و (همکاران، ۲۰۲۲)	-	-	لانگمویر و فروندلیچ	۱/۹۰	یون های مس، کادمیم و رنگ متیلن بلو	به ترتیب برابر با: ۵۶/۸۱ و ۸۰، ۴۰	پودر کردن	پوست مرکبات

۲- جاذب های زیستی حاصل از روش شیمیایی

اصلاح شیمیایی جاذب های زیستی با هدف افزایش ظرفیت جذب از طریق ایجاد گروه های عاملی فعال با استفاده از واکنش های شیمیایی انجام می شود. این روش به افزایش پایداری شیمیایی و خواص مکانیکی جاذب کمک می کند و درعین حال از تخلیه آلاینده ها به سیستم جذب جلوگیری می کند. عملیات شیمیایی از طریق چندین روش مختلف انجام می شود. برخی از روش های شناخته شده عبارتند از: (الف) پروتونه کردن (با استفاده از اسیدهای معدنی مانند HCl، H₂SO₄، HNO₃)، (ب) صابون سازی قلیایی (با استفاده از NaOH، Ca(OH)₂، CaCl₂)، (ج) مسدود کردن گروه های عاملی با استفاده از معرف های شیمیایی، و (د) تیمار با هیدروژن پراکسید (H₂O₂). پروتونه کردن با پردازش ضایعات با اسیدهایی مانند HCl یا HNO₃ انجام می شود. برای این کار، مواد به صورت معلق در اسید و به مدت ۶-۸ ساعت تیمار می شوند. ضایعات تیمار شده با آب شسته تا pH خنثی شود و سپس خشک می شود تا وزن ثابت به دست

آید. پروتونه کردن برای حذف کاتیون های اضافی مانند Ca²⁺ یا Na⁺ موجود در سطح ماده زیستی که در فرآیند جذب فلز اختلال ایجاد می کند، استفاده می شود. این کاتیون ها با پروتون ها جایگزین می شوند که با کاهش رقابت بین یون های K⁺، Na⁺ و Ca²⁺ با فلزات سنگین مانند As²⁺، Se²⁺، Zn²⁺، Pb²⁺، Hg²⁺، Cd²⁺ و ... اتصال فلزات سنگین را افزایش می دهند. جایگزینی یون های Ca²⁺ و Na⁺ توسط پروتون ها باعث افزایش جذب یون های فلزات سنگین مورد نظر و حذف آن ها از فاضلاب شده است (Mahato و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات انجام شده در راستای استفاده از این دسته جاذب ها در جدول (۲) ارائه شده است.

باتوجه به جدول (۲)، برای جذب یون سرب با روش شیمیایی از پوست مرکبات، پوست پرتقال، پوست ماندارین، و لیموشیرین استفاده شد. میزان جذب یون سرب با پوست مرکبات (پروتونه شده) < پوست ماندارین (تیمار با هیدروکلریک اسید) < پوست پرتقال (تیمار با سدیم هیدروکسید و کلسیم کلرید) < لیموشیرین

(اصلاح با هگزامتیلن دی ایزوسیانات) < پوست پرتقال (پروتونه با نیتریک اسید) < پوست پرتقال (تیمار با سدیم هیدروکسید و اسید سیتریک) < پوست پرتقال (پروتونه) بود.

برای جذب یون مس از پوست پرتقال، پوست ماندارین، تفاله نارنج، و پوست دارابی استفاده شد. میزان جذب یون مس با پوست ماندارین (تیمار با هیدروکلریک اسید) < پوست پرتقال (تیمار با سدیم هیدروکسید و کلسیم کلرید) < تفاله نارنج (تیمار قلیایی با سدیم هیدروکسید) < پوست دارابی (پکتین زدایی) < پوست پرتقال (پروتونه) بود.

برای جذب یون کادمیم از پوست پرتقال، پوست ماندارین و گریپ فروت استفاده شد. میزان جذب یون کادمیم با پوست ماندارین (تیمار با هیدروکلریک اسید) < پوست پرتقال (پروتونه با نیتریک

اسید) < گریپ فروت (پروتونه با سولفوریک اسید) < پوست پرتقال (پروتونه کردن) بود.

برای جذب یون روی از پوست پرتقال استفاده شد. میزان جذب روی با پوست پرتقال (تیمار با سدیم هیدروکسید و کلسیم کلرید) < پوست پرتقال (پروتونه با نیتریک اسید) بود.

باتوجه به نتایج جدول، می توان گفت ضایعات تیمار شده شیمیایی، برای جذب رنگ ها، در بعضی موارد از میزان جذب کمتری برخوردار است اما برای جذب یون های فلزی در اکثر موارد میزان جذب بیشتری نسبت به روش فیزیکی دارد که میزان جذب علاوه بر نوع ضایعات، به نوع ماده شیمیایی تیمار کننده بستگی دارد. بنابراین، فعال سازی شیمیایی برای تولید جاذب زیستی به دلیل سطح بالاتر و ریزحفره ها ترجیح داده می شود.

جدول ۲- جذب سطحی آلاینده ها از محلول آبی توسط جاذب های حاصل از روش شیمیایی

منبع	ترمودینامیک	مدل سینتیکی	ایزوترم	BET (m ² /gr)	آلاینده	میزان جذب (میلی گرم جذب شونده بر گرم جاذب)	روش تولید	ضایعات
Schiewer و (Balaria, ۲۰۰۹)	-	شبه مرتبه دوم یا سوم	لانگمویر	-	یون سرب	۴۰۰	پروتونه شده	پوست مرکبات
Mahmoud و (همکاران، ۲۰۱۷)	گرماگیر	شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم	لانگمویر و فروندلیچ	-	رنگ های کنگورد و متیل اورانژ	۱۰ و ۲۶	هیدروژل بر پایه پوست پرتقال و N-vinyl-2-pyrrolidone	پوست پرتقال
Lasheen و (همکاران، ۲۰۱۲)	گرماگیر	شبه مرتبه دوم	فروندلیچ و لانگمویر	-	سرب، مس و کادمیم	به ترتیب برابر با: ۱۳/۷ و ۱۵/۲۷، ۷۳/۵۳	پروتونه کردن	پوست پرتقال
Chatterjee و Schiewer. (۲۰۱۴a)	-	-	-	-	سرب، کادمیم و روی	به ترتیب برابر با: ۸۵، ۲۰ و ۴۴	پروتونه با نیتریک اسید	پوست پرتقال
De Souza و (همکاران، ۲۰۱۲)	گرماگیر و خود به خودی	شبه مرتبه دوم	لانگمویر و فروندلیچ	-	سرب	۵۵/۵۲	بدون تیمار شیمیایی	پوست پرتقال
Shukla و Singh (۲۰۱۶)	گرمازا	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	یون کبالت	۲۰/۸۳ و ۳۵/۷۱	تیمار نشده	پوست لیمو
Rosales و (همکاران، ۲۰۱۶)	-	شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	مخلوط رنگ و کروم (VI)	۳۹/۰۶۲۸ و ۳۷/۴۲۷	تیمار با هیدروژن پراکسید	پوست گریپ فروت
Patiño-Saldivar و همکاران، (۲۰۲۱)	-	مدل الویچ	فروندلیچ	-	کروم (III)	۵۳/۱۵	تیمار با آب	پوست پرتقال
Inagaki و (همکاران، ۲۰۱۳)	گرمازا	شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم	لانگمویر و فروندلیچ	-	یون های مس، کادمیم و سرب	به ترتیب برابر با: ۱۳۱/۵، ۳۲۲/۶ و ۳۹/۷۴	تیمار با هیدروکلریک اسید	پوست ماندارین
Bayo و (همکاران، ۲۰۱۲)	گرمازا و خود به خودی	شبه مرتبه دوم	فروندلیچ	-	کادمیم	۱۶/۶۷	پروتونه با سولفوریک اسید	گریپ فروت

ضایعات	روش تولید	میزان جذب (میلی گرم جذب شونده بر گرم جاذب)	آلاینده	BET (m ² /gr)	ایزوترم	مدل سینتیکی	ترمودینامیک	منبع
لیمو شیرین	اصلاح با هگزامتیلن دی ایزوسیانات ^{۵۱}	۲۵۰ و ۲۰۰	رنگ متیلن بلو و سرب (II) از محلول آبی	-	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	گرماگیر و خود به خودی	Yadav و همکاران، (۲۰۲۲)
تفله نارنج	تیمار قلیایی با سدیم هیدروکسید	۵۲/۰۸	مس	-	لانگمویر و فروندلیچ	شبه مرتبه دوم	-	Khormaei و همکاران، (۲۰۰۷)
ضایعات پرتقال	عامل دار کردن با فلزات (III) La، (III) Ce و (III) Fe	به ترتیب برابر با: ۱۳/۸۴، ۱۳/۹۴ و ۱۳/۶۳	فسفات	-	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	-	Biswas و همکاران، (۲۰۰۷)
پوست پرتقال	اصلاح با سدیم هیدروکسید و کلسیم کلرید	به ترتیب برابر با: ۲۰۹/۸، ۷۰/۷۳ و ۵۶/۱۸	یون های مس، سرب و روی	-	لانگمویر	-	-	FENG و GUO، (۲۰۱۲)
پوست دارابی	پکتین زدایی (پوست بدون پکتین)	۲۱/۱	مس	-	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	گرمازا و خود به خودی	Tasaso، (۲۰۱۴)
پوست پرتقال	پروتونه کردن، پکتین زدایی، و اسید پکتیک استخراج شده از پوست بدون پکتین	اسید پکتیک پوست < پوست پروتونه شده < پوست خام < پوست بدون پکتین	کادمیم	-	لانگمویر و فروندلیچ	شبه مرتبه اول	-	Schiewer و Iqbal، (۲۰۱۰)
پوست نارنگی	تیمار نشده تیمار با محلول فرمالدئید ۲۰٪ تیمار با اوره ۱۰٪	۵/۹۰ ۱۴/۷۹ ۷۱/۰۷	رنگ ایندیگو کارمین ^{۵۲}	-	لانگمویر	-	-	Rehman و همکاران، (۲۰۱۴)
پوست پرتقال	تیمار با نیتریک اسید	۴۴/۹۶	کادمیم	-	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	-	Chatterjee و Schiewer، (۲۰۱۱)

۳- جاذب های زیستی حاصل از روش کربنه کردن

محبوب ترین جاذب برای فرآیند جذب، کربن فعال است. با این حال، استفاده از آن هنوز محدود است زیرا از نظر هزینه عملیاتی گران است. فناوری های پیشرفته، می تواند پژوهشگران را قادر سازد تا برای تولید جاذب های ارزان، کارآمد و در دسترس، بر هزینه های فرآیند غلبه کنند. مطالعات متعددی برای به دست آوردن کربن های فعال کم هزینه از ضایعات کشاورزی، مانند پوست گندم، پوست برنج، ضایعات چای، ضایعات پنبه، پوست موز، پوست پرتقال، ضایعات مرکبات و ... برای حذف فلزات سنگین و سایر ترکیب های خطرناک از فاضلاب گزارش شده است. اگرچه، پتانسیل جذب اکثر این جاذب های ارزان محدود است. بنابراین، سطح جاذب ها را باید برای افزایش فعالیت آن تغییر داد (Mahato و همکاران، ۲۰۲۱). در روش کربونه کردن، ابتدا پوست های خشک شده ضایعات مرکبات در معرض دمای بسیار بالا (تقریباً ۷۷۳ کلوین) قرار می گیرند و به دنبال آن معمولاً اکسیداسیون اسیدی انجام می شود. یک گاز بی اثر، مانند N₂، برای جلوگیری از آتش سوزی یا اکسیداسیون شدید استفاده می شود. در جاذب نهایی، گروه های عاملی با بار مثبت یا

منفی موجود در سطح جاذب (ضایعات مرکبات)، اتصال به آلاینده را با جذب الکترواستاتیکی تسهیل می کنند (Mahato و همکاران، ۲۰۲۱). پژوهش های انجام شده در راستای استفاده از این دسته جاذب ها در جدول (۳) ارائه شده است.

باتوجه به جدول (۳)، برای جذب یون مس با روش کربونه کردن از ضایعات مرکبات، پوست مرکبات و پوست پرتقال استفاده شد. میزان جذب یون مس با پوست مرکبات (فعال سازی با هیدروژن پراکسید) < ضایعات مرکبات (فعال سازی با CO₂) < پوست پرتقال (پیرولیز) بود. برای جذب رنگ متیلن بلو از پوست نارنج، پوست دارابی، پوست لیموشیرین، پوست گریپ فروت، و پوست مرکبات استفاده شد. میزان جذب رنگ متیلن بلو با پوست لیموشیرین (فعال سازی با سولفوریک اسید) < پوست دارابی (تیمار با سدیم هیدروکسید و با استفاده از مایکروویو) < پوست نارنج (پیرولیز) < پوست نارنج (فعال سازی با روی کلرید) < پوست نارنج (فعال سازی با فسفریک اسید) < پوست گریپ فروت (فعال سازی با فسفریک اسید) < پوست مرکبات (فعال سازی با هیدروژن پراکسید) بود. برای جذب یون سرب از پوست پرتقال و برگ های لیموشیرین

استفاده شد. میزان جذب این یون با برگ‌های لیموشیرین (پیرولیز) < پست پرتقال (پیرولیز) بود. برای جذب یون کادمیم از پست پرتقال و پست مرکبات استفاده شد. میزان جذب این یون با پست مرکبات (فعال‌سازی با هیدروژن پراکسید) < پست پرتقال (پیرولیز) بود. برای جذب یون نیکل از پست پرتقال و برگ‌های لیموشیرین استفاده شد. میزان جذب یون نیکل با برگ‌های لیموشیرین (پیرولیز) < پست پرتقال (پیرولیز) بود. برای جذب یون کبالت از پست لیمو و برگ‌های لیموشیرین استفاده شد. میزان جذب یون کبالت با برگ‌های لیموشیرین (پیرولیز) < پست لیمو (پیرولیز بدون ماده فعال‌کننده) بود. باتوجه‌به جدول (۳)، می‌توان نتیجه گرفت که با کربونه کردن ضایعات، میزان جذب برای یون‌های فلزی و رنگ‌ها افزایش پیدا

می‌کند. در روش کربونه کردن، نوع ضایعات و نوع ماده فعال‌کننده در میزان جذب تاثیر دارد. در این بخش، میزان جذب یون فلزی (کبالت، نیکل، و سرب) و رنگ با ضایعات لیموشیرین، تقریباً بیشتر است. همچنین فعال‌سازی با ماده فعال‌کننده باعث افزایش بیشتر جذب می‌شود. بنابراین، تولید جاذب زیستی از طریق فعال‌سازی حرارتی به دلیل اثرات قابل توجه، هزینه کم، حجم منافذ بهینه و ریز تخلخل‌ها برای جذب آلاینده ترجیح داده می‌شود. تحقیقات نشان داده است که مواد کربنی مشتق شده از زیست‌توده، خواص جذب مایکروویو عالی را از خود نشان می‌دهند، و آن‌ها را برای کاربردهای مختلف ایده آل می‌کنند. پس مناسب‌ترین روش برای تولید جاذب زیستی از ضایعات مرکبات، کربونه کردن برای ایجاد کربن فعال است که ظرفیت جذب برای تصفیه آب را به دلیل بهبود ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و مقرون‌به‌صرفه بودن افزایش می‌دهد.

جدول ۳- جذب سطحی آلاینده‌ها از محلول آبی توسط جاذب‌های حاصل از روش کربنه کردن

منبع	ترمودینامیک	مدل سینتیکی	ایزوترم	BET (m ² /gr)	آلاینده	میزان جذب (میلی‌گرم جذب شونده بر گرم جاذب)	روش تولید	ضایعات
Da Silva) و همکاران، (۲۰۲۲)	-	شبه مرتبه دوم	-	۲۱۲/۴	یون مس (II)	۲۸/۲	فعال سازی با CO ₂	ضایعات مرکبات (پوست پرتقال، ماندراين، لیموترش و لیمو شیرین)
Verma) و همکاران، (۲۰۱۹)	As (III) ماهیت گرمازا و As(V) گرماگیر، خود به خودی	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	۲۰۶/۸	آرسنیک (III) و (V) ^{۵۳}	۲ و ۰/۷۱۴	فعال سازی با آهن	پوست لیموشیرین
Roy) و همکاران، (۲۰۲۲)	-	مرتبه دوم	لانگمویر	-	رنگ متیلن بلو	۱۳۹/۷	پیرولیز	پوست نارنج
Foo) و Hameed، (۲۰۱۱)	-	-	لانگمویر	۱۳۳۵	رنگ‌های متیلن بلو و اسید بلو ^{۵۴}	۴۴۴/۴۵ و ۵۰۱/۱	تیمار با سدیم هیدروکسید و با استفاده از مایکروویو	پوست دارابی
Santos) و همکاران، (۲۰۱۵)	-	-	لانگمویر	-	یون‌های سرب، کادمیم، مس، نیکل، روی و آلومینیوم	به ترتیب برابر با: ۹/۸۰۳، ۵۰/۵۰۵، ۱۵/۷۲۲، ۱۳/۸۱۲، ۵/۱۶۲ و ۰/۵۱۲۸	پیرولیز	پوست پرتقال
Bhatnagar) و همکاران، (۲۰۱۰)	گرمازا و خود به خودی	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	یون کبالت	۲۵/۶۴	پیرولیز بدون ماده فعال‌کننده	پوست لیمو

منبع	ترمودینامیک	مدل سینتیکی	ایزوترم	BET (m ² /gr)	آلاینده	میزان جذب (میلی گرم جذب شونده بر گرم جاذب)	روش تولید	ضایعات
Dutta و همکاران، (۲۰۱۱)	-	-	-	۵۲۶	رنگ متیلن بلو	۲۵/۵۱۰	فعال سازی با فسفریک اسید (H ₃ PO ₄)	پوست گریپ فروت
Khaled و همکاران، (۲۰۰۹)	-	شبه مرتبه دوم و انتشار درون ذرات	لانگمویر، فروندلیچ، کوبل-کورینگان ^{۵۶} ، تمکین، دویینین-رادوشکویچ و معادلات ایزوترم تعمیم یافته ^{۵۷}	-	رنگ دایرکت یلو ۱۲ ^{۵۵}	۷۵/۷۶	فعال سازی با سولفوریک اسید (H ₂ SO ₄)	پوست پرتقال
Rani و Chaudhary، (۲۰۲۲)	-	شبه مرتبه دوم	فروندلیچ برای رنگ متیلن بلو و تمکین برای رنگ کریستال ویولت	-	رنگ های متیلن بلو و کریستال ویولت	۱۱۴۹/۴۲ و ۷۴۰/۷۴	فعال سازی با سولفوریک اسید	پوست لیموشیرین
Kam و Lee، (۲۰۱۸)	-	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	آنتی بیوتیک تری متوپریم ^{۵۸} (TMP)	۱۴۴/۹	پیرولیز	پوست مرکبات
Aboli و همکاران، (۲۰۲۰)	گرمازا و خود به خودی	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	۷/۲	یون های سرب، کبالت و نیکل	۶۰/۶۰، ۶۹/۸۲ و ۵۸/۱۴	پیرولیز	برگ های لیموشیرین
Gunay و Gurer و همکاران، (۲۰۲۱)	گرماگیر و خود به خودی	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	۱۲۵۶/۷	رنگ متیلن بلو	۱۰۸/۹	فعال سازی با روی کلرید (ZnCl ₂)	پوست نارنج
				۶۴۷/۳	رنگ متیلن بلو	۹۰/۵۸	فعال سازی با فسفریک اسید	پوست نارنج
Rajasekhar و همکاران، (۲۰۰۹)	-	-	فروندلیچ و لانگمویر	-	رنگ های متیلن بلو و کنگورد	-	پیرولیز	پوست نارنج
El Nemr و همکاران، (۲۰۰۹)	-	شبه مرتبه دوم	لانگمویر، تمکین و دویینین-رادوشکویچ	-	رنگ دایرکت بلو ۸۶ ^{۵۹}	۳۳/۷۸	فعال سازی با سولفوریک اسید	پوست پرتقال
				-	رنگ دایرکت بلو	۱۰۷/۵۳		
El Malti و همکاران، (۲۰۲۲)	-	-	لانگمویر و فروندلیچ	۹۶	یون های مس، کادمیم و رنگ متیلن بلو	به ترتیب برابر با: ۲۶/۸۸، ۳۸/۹۰ و ۱۱/۳۶	فعال سازی با هیدروژن پراکسید (H ₂ O ₂)	پوست مرکبات
Babu و همکاران، (۲۰۱۱)	-	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	-	رنگ راکتیو رد ^{۶۰}	پوست دارابی، بالنگ و لیمو به ترتیب برابر با: ۲۰۴، ۱۹۶، ۲۱۵	اکسیداسیون با نیتریک اسید (HNO ₃)	پوست دارابی، بالنگ و لیمو
Bhatnagar و همکاران، (۲۰۰۹)	-	شبه مرتبه اول	لانگمویر	-	رنگ های متیل اورانژ و کنگورد	۳۴/۵ و ۵۰/۳	پیرولیز بدون ماده فعال کننده	پوست لیمو
Bello و همکاران، (۲۰۱۵)	گرماگیر و خود به خودی	شبه مرتبه دوم	لانگمویر	۱۳۵۷/۴۱	رنگ مالاشیت گرین	۱۷۷/۴۳	فعال سازی با پتاسیم هیدروکسید (KOH)	پوست دارابی

۴- جاذب‌های زیستی کامپوزیتی

از ضایعات کشاورزی (مانند پوست گندم، پوست برنج، و پوست انواع مرکبات و میوه‌های خشک) می‌توان برای تهیه کامپوزیت‌های پلیمری با کاربرد تجاری استفاده کرد. کامپوزیت‌ها، پلاستیک‌ها، و سرامیک‌ها قویترین مواد مهندسی در چند دهه اخیر هستند. اما امروزه استفاده از کامپوزیت الیاف طبیعی به تدریج مورد توجه صنعت و بخش دانشگاهی قرار گرفته است (Rao و Bhambure، ۲۰۱۹). هدف از ارائه این بخش، استفاده موثر از ضایعات مرکبات در تولید زیست کامپوزیت‌هایی است که به‌عنوان جاذب زیستی در تصفیه آب مطرح شدند (Joglekar و همکاران، ۲۰۲۱). زیست

کامپوزیت‌ها می‌توانند جایگزین زیست محیطی مناسبی برای کربن، شیشه، و کامپوزیت‌های الیاف مصنوعی باشند (Bharath و Basavarajappa، ۲۰۱۶). معمولا کامپوزیت‌های زیستی از یک ساختار رزینی (ماتریس) و الیاف طبیعی (تقویت‌کننده) ایجاد می‌شوند. علاوه بر این، الیاف زیستی، اجزای اصلی زیست کامپوزیت‌ها هستند که از منشاء زیستی مشتق می‌شوند. الیاف معمولا سلولزی هستند که از منابع مختلف در طبیعت به دست می‌آیند که بزرگترین منبع آن‌ها گیاهانند (Joglekar و همکاران، ۲۰۲۱). پژوهش‌های انجام شده در راستای استفاده از این دسته جاذب‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- جذب سطحی آلاینده‌ها از محلول آبی توسط جاذب‌های کامپوزیتی

ضایعات	روش تولید	میزان جذب (میلی‌گرم جذب شونده بر گرم جاذب)	آلاینده	BET (m ² /gr)	ایزوترم	مدل سینتیکی	ترمودینامیک	منبع
	پروتونه کردن	۳۱						
پوست مرکبات	پروتونه کردن و کامپوزیت با آلزینات	۴۳	کادمیم	-	لانگمویر و فروندلیچ	شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم	-	Chatterjee و Schiewer (۲۰۱۴b)
	کامپوزیت با آگار	۳۶						
	کامپوزیت با آلزینات	۳۵						
	پوست مرکبات	۱۱۶/۲						
پوست مرکبات	دانه‌های ژل آلزینات کلسیم	۷۲/۱	سلنیوم (IV)	-	فروندلیچ	شبه مرتبه دوم	-	Dev و همکاران (۲۰۲۰)
	دانه‌های کامپوزیت از پوست‌های مرکبات و آلزینات کلسیم	۱۱۱/۹						
	اصلاح شده با استیک اسید به صورت پودری	۱۸۷/۷۷ و ۲۰۰/۱						
پوست مرکبات	پوست مرکبات فعال شده / دانه‌های کامپوزیت آلزینات	۸۸۱/۵۶ و ۹۲۳/۰۷	متیلن بلو و کریستال ویولت	-	لانگمویر	شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم	گرمازا و خود به خودی	Aichour و Zaghouane-Boudiaf (۲۰۲۰)
	کامپوزیت با آلزینات سدیم و سپس تیمار با استیک اسید	۲۳۲/۵۶ و ۷۵/۱۹						
پرتقال شیرین			راکتیو بلو (۱۹ و ۴۹) ^{۶۱}	۳/۵۴	فروندلیچ، لانگمویر و تمکین	شبه مرتبه دوم	گرمازا	Asgher و Bhatti (۲۰۱۲)

باتوجه به جدول (۴)، روش کامپوزیت‌کردن به دلیل کارایی، مقرون به‌صرفه بودن، و توانایی حذف رنگ‌ها، فلزات سنگین و مواد شیمیایی سمی از آب‌های آلوده، بهترین روش برای تولید جاذب زیستی از ضایعات مرکبات است. به‌طور کلی هدف از بررسی و مقایسه روش‌های تولید جاذب، انتخاب روشی مناسب بر مبنای نوع ضایعات، نوع آلاینده‌های مورد نظر، و منابع مالی و انرژی در دسترس است. باتوجه به پژوهش‌های انجام شده، ضایعات مرکبات پتانسیل

خوبی برای حذف آلاینده‌های مختلف از آب، پساب، و فاضلاب‌ها دارند. باتوجه به روش‌های ارائه شده، جاذب‌های پروتونه شده (تیمار شیمیایی) کارایی بهتری نسبت به جاذب‌های زیستی حاصل از تیمار فیزیکی دارند. جاذب‌های زیستی تیمار شده شیمیایی پایداری شیمیایی و مکانیکی بیشتری در محیط‌های آبی دارند. علاوه بر این، تیمارهای شیمیایی به بهبود خواص سطح با گروه‌های عاملی اضافی یا مکان‌های جذب فعال کمک می‌کنند و ظرفیت

جذب را افزایش می‌دهند. از طرفی، فعال‌سازی ترموشیمیایی باعث ایجاد مواد کربن فعال می‌شود که تخلخل بیشتری برای تسهیل جذب فیزیکی همراه با جذب شیمیایی نشان می‌دهند. همچنین، امروزه جاذب‌های زیستی با خواص مغناطیسی برای فرآیند تصفیه آب و فاضلاب بیشتر مورد توجه هستند؛ زیرا به دلیل ماهیت مغناطیسی می‌توان آن را به راحتی جدا کرد و بیش از یک بار از آن استفاده کرد (Verma و همکاران، ۲۰۱۹).

• نمک‌زدایی

استفاده از ضایعات مرکبات برای نمک‌زدایی در مقایسه با جاذب‌های مصنوعی، مقرون به صرفه‌تر و سازگارتر با محیط‌زیست است که این امر به پایداری آن‌ها می‌افزاید و ضایعات را کاهش می‌دهد. در این بخش به نمک‌زدایی از آب با رویکردهای مختلف براساس ضایعات مرکبات پرداخته می‌شود.

تولید مولد بخار خورشیدی (برای تولید بخار کارآمد) با استفاده از کربن متخلخل حاصل از پوست‌های لیموشیرین (ضایعات غذایی) و اسفنج پلی‌وینیل‌الکل در نمک‌زدایی خورشیدی از آب دریا بررسی شد. مولد بخار خورشیدی به‌طور رضایت بخشی نور خورشید را جذب و گرمای موضعی را در فصل مشترک آب و هوا ایجاد کرد. این مولد توانست بخار را با سرعت $1/386$ کیلوگرم بر متر مربع در ساعت تولید نماید، که راندمان فتوترمال $90/8\%$ را نشان داد. کربن متخلخل حاصل از زیست توده در اسفنج پلی‌وینیل‌الکل گنجانده شد تا یک مولد بخار خورشیدی کم‌هزینه، سبز و پایدار به دست آید (Wilson و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهشی دیگر، کربن فعال به‌دست آمده از پوست لیموشیرین برای آماده‌سازی الکترودهای اسفنجی متخلخل در دیونیزاسیون خازنی الکترو (CDI)^{۶۲} برای نمک‌زدایی آب استفاده شد. این بررسی، عملکرد فوق‌العاده کربن فعال را به‌عنوان یک ماده الکتروود بسیار پایدار و کم‌هزینه برای ابرخازن‌ها و کاربردهای نمک‌زدایی آب تأیید کرد و حداکثر ظرفیت الکترو جذب کربن فعال مشتق شده از پوست لیمو شیرین برای نمک‌زدایی آب $22/8$ میلی‌گرم بر گرم بود (Ahirrao و همکاران، ۲۰۱۹). در گزارش Xie و همکاران (۲۰۱۸)، مواد کربنی به‌دست آمده از پوست مرکبات به روش سنتز هیدروترمال با فعال‌کننده $ZnCl_2$ بررسی شد. کربن فعال شده به‌عنوان آند در سلول دیونیزاسیون خازنی (CDI) برای نمک‌زدایی به‌کار برده شد. این آند با مقدار بالای نمک‌زدایی (16 میلی‌گرم بر گرم) و سرعت بالای جذب نمک ($0/67$ میلی‌گرم بر گرم در دقیقه)، مطلوب است. این پژوهش روشی آسان، کم‌هزینه، و سازگار با محیط‌زیست برای تهیه کربن متخلخل حاصل از ضایعات میوه با مقدار کم (1% جرم) فعال‌کننده برای دیونیزاسیون خازنی با کارایی بالا ارائه می‌دهد. الکتروود حاصل دارای بازده و نمک‌زدایی بالا پس از 35 سیکل است.

Attallah و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند، ارزیابی نانوذرات مغناطیسی پوشش داده شده با پکتین (از پوست مرکبات یا سیب) در کاربردهای نمک‌زدایی آب با فرآیند اسمز رو به جلو (FO) با انرژی کم انجام شد. در این سیستم از یک غشای FO به عنوان غشای نیمه تراوا برای دفع نمک‌ها، و نانوذرات مغناطیسی پکتین پوشیده شده برای تحریک مولکول‌های آب در سراسر غشای FO استفاده شد. نتایج نشان دادند که آبدوستی نانوذرات فشار اسمزی بالایی برای کشیدن آب تمیز در سراسر غشای FO به همراه دفع نمک در محدوده 95 تا 97 درصد ایجاد می‌کند (Attallah و همکاران، ۲۰۱۸؛ Tayel و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، برای نمک‌زدایی آب به بررسی کربن متخلخل به‌دست آمده (از طریق روش فعال‌سازی شیمیایی با KOH و دمای فعال‌سازی بالا) از پوست‌های گریپ فروت برای الکترودهای دیونیزاسیون خازنی پرداختند که بازده حذف نمک بالا (95%) و ظرفیت الکترو جذب $5/74$ میلی‌گرم بر گرم هنگام اعمال ولتاژ 2 ولت ایجاد شد. این نتایج نشان دادند که پوست‌های گریپ فروت می‌توانند الکترودهای CDI امیدوارکننده‌ای برای نمک‌زدایی آب با شوری کم باشند (Elisadiki و همکاران، ۲۰۱۹).

بازیابی جاذب

قابلیت استفاده مجدد از جاذب مهم است. این شامل حذف مواد جذب شده از سطح جاذب زیستی پس از استفاده است و جاذب زیستی باید تقریباً به شکل اولیه خود برگردد. تعداد چرخه‌هایی که در آن جاذب‌های زیستی می‌توانند مجدداً استفاده شوند، در تعیین ارزش اقتصادی و پایداری آن‌ها بسیار مؤثر است. یکی از دستاوردهای کلیدی جاذب‌های زیستی، بازیابی آن‌ها پس از استفاده است. برای یک جاذب زیستی کافی نیست که به تنهایی عملکرد بالایی از خود نشان دهد، بلکه قابلیت استفاده مجدد نیز به همان اندازه ضروری است. بنابراین، فرایند واجذب و بازیابی فرآیندهای اساسی هستند که هنگام انتخاب جاذب زیستی باید بررسی شوند (Adewuyi، ۲۰۲۰). یک جاذب با کیفیت را می‌توان بازیافت و بازیابی کرد و هزینه تولید آن را تا حد زیادی کاهش داد. بازیابی جاذب‌های استفاده شده را می‌توان به طور مکرر انجام داد. با این وجود، ظرفیت جذب جاذب بازیابی شده کمتر از جاذب اولیه است. واجذب آلاینده را می‌توان با استفاده از روش بازیابی مناسب افزایش داد. چندین روش شامل جداسازی مغناطیسی، فیلتراسیون، بازیابی حرارتی، قابلیت استفاده مجدد از حلال، عملیات مایکروویو، ترمیم مایع فوق بحرانی، روش اکسیداسیون پیشرفته، استفاده از شوینده‌ها و روش میکروبی برای بازیابی جاذب‌های اشباع استفاده می‌شود (Adewuyi، ۲۰۲۰؛ Osman و همکاران، ۲۰۲۳).

تمامی اجزاء یک محصول کشاورزی بهره مناسب و کامل را ببرد. طرح تبدیل ضایعات کشاورزی به محصولات مدتی است که در حال انجام است. با این حال، برخی از معایب، مانند فناوری محدود مربوط به استفاده از محصولات زراعی-کشاورزی نیز وجود دارد. در آینده، پیشنهادها برای انرژی‌های سبز، اقتصادی و تجدیدپذیر باید شامل افزایش استفاده از ضایعات کشاورزی باشد. با بهره‌گیری مناسب از علم بیوتکنولوژی در مورد ضایعات کشاورزی، می‌توان به‌منظور حذف آن‌ها و تبدیل آن‌ها به فرآورده‌های سودمند اقدام کرد (Abdullah و همکاران، ۲۰۲۱). در این میان، تولید سالانه مرکبات در کشور ایران در حدود ۴/۵ میلیون تن است که ۴۰ درصد مرکبات تولیدی کشور دورریز می‌شود. مرکبات یکی از بزرگترین محصولات میوه‌ای است که در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری روی کره زمین رشد می‌کند. مناطق مناسب برای تولید مرکبات در ایران به سه منطقه شامل: مناطق شمالی (مازندران، گیلان و گلستان)، مناطق مرکزی (فارس، کرمان، کرمانشاه، ایلام، کهگیلویه و بویراحمد و خراسان جنوبی)، و مناطق جنوبی (هرمزگان، بوشهر و سیستان بلوچستان) تقسیم می‌شوند. ایران در بین کشورهای تولیدکننده مرکبات در رتبه هفتم قرار دارد و استان‌های گیلان و مازندران بیشترین سهم در تولید مرکبات را دارند و پس از آن استان‌هایی نظیر فارس، کرمان، و هرمزگان از دیگر تولیدکنندگان مهم مرکبات هستند. در جدول (۵) میزان تولید و درصد ضایعات چند محصول باغی (مرکبات) ارائه شده است.

جدول ۵- میزان تولید و درصد ضایعات مرکبات در ایران (میرمجیدی هشتجین و همکاران، ۱۳۹۵)

نوع محصول (میلیون تن)	میزان تولید	حدود ضایعات (%)
پرتقال	۱/۹۳	۳۰
لیموترش	۰/۴۸	۲۶
نارنگی	۰/۷	۳۱
لیموشیرین	۰/۵۱	۲۶

باتوجه به جدول (۵)، میزان ضایعات مرکبات بالا است. بنابراین، استفاده از این ضایعات باعث کاهش آن‌ها و کاهش آلودگی محیط‌زیست می‌شود. به‌طور متناوب، این ضایعات می‌توانند به جاذب‌های زیستی برای حذف مواد شیمیایی مضر و سمی از فاضلاب‌های صنعتی تبدیل شوند. همچنین، اطلاعات و ارقام نشان می‌دهند میزان آبی که در بخش ضایعات محصولات باغی از دست می‌رود معادل ۳/۹ میلیارد مترمکعب بوده و درحالی‌که حتی برای برخی مناطق تامین یک متر مکعب آب بسیار اهمیت دارد و حیاتی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که قسمت عمده ضایعات مرکبات در ایران و کشورهای در حال توسعه مربوط

تخمین هزینه جذب زیستی و تولید جاذب زیستی کار آسانی نیست و اغلب گزارش نمی‌شود. تصفیه فرآیند، حمل و نقل، مصرف انرژی، تعمیر و نگهداری، بهینه‌سازی فرآیند، بازسازی، واجذب و ... عواملی هستند که هنگام تخمین زدن مورد توجه قرار می‌گیرند. این به ماهیت آب یا فاضلابی که باید تصفیه شود و همچنین حجم آن بستگی دارد. با این حال، هزینه‌های سرمایه‌ای و هزینه‌های جاری به نوع و اندازه تصفیه‌خانه بستگی دارد. بهتر است از ضایعات مرکبات به‌عنوان ماده اولیه برای تولید جاذب زیستی استفاده شود تا هزینه فرآیند به حداقل برسد. ضایعات تولید شده از محصولات مزرعه، ضایعات خانگی و صنعتی مانند ضایعات باکتریایی صنایع تخمیر، ضایعات قارچی صنایع تبدیلی مواد غذایی و لجن سایر صنایع تبدیلی در تولید جاذب زیستی قابل استفاده هستند. دفع زباله یک مشکل اساسی است. بنابراین، استفاده از این زباله‌ها برای تولید جاذب زیستی مشکل محیط‌زیستی را حل می‌کند و درعین حال به کاهش هزینه تولید جاذب‌های زیستی برای تصفیه آب کمک می‌کند. یکی از عواملی که هزینه تولید را افزایش می‌دهد، پیش تصفیه است. برخی از این مواد قبل از پردازش نیاز به پیش تصفیه دارند و پیش تصفیه اضافی ممکن است هزینه تولید را افزایش دهد. با این حال، مهم است که یک پیش تصفیه موثر اما ارزان و قابل استفاده لحاظ شود. برای به حداقل رساندن هزینه، اطمینان از نزدیک بودن مرکز تصفیه به منبع زباله، حیاتی است. هزینه‌های تولید از جاذبی به جاذب دیگر بسته به ساختار آن، متفاوت باشد. هزینه جذب زیستی نیز به ظرفیت و رفتار جاذب زیستی مورد استفاده بستگی دارد. هر چه مصرف انرژی بیشتر باشد، هزینه تولید نیز بیشتر می‌شود. فرآیند جذب زیستی در مقایسه با روش‌های دیگر مانند اسمز معکوس، الکترودیالیز، اکسیداسیون پیشرفته و روش‌های الکتروترمال که حدود ۴۵۰ دلار آمریکا در هر میلیون لیتر هزینه دارند، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر است. بسته به نوع جاذب زیستی، هزینه تصفیه آب به ازای هر میلیون لیتر از ۱۰ تا ۲۰۰ دلار آمریکا تخمین زده می‌شود (Adewuyi, ۲۰۲۰).

ظرفیت بومی‌سازی

در حال حاضر سالانه و به طور متوسط حدود ۱۰۰ میلیون تن انواع محصولات کشاورزی در ایران تولید می‌شود که تقریباً ۱۶/۵ میلیون تن آن به‌صورت ضایعات از چرخه مصرف به‌عنوان ضایعات دور ریخته می‌شود (میرمجیدی هشتجین و همکاران، ۱۳۹۵). در ایران، تقریباً نیمی از محصولات کشاورزی بدون اینکه به مصرف برسد، در مراحل مختلف از بین می‌روند و صنایع تبدیلی موجود در ایران به آن حد از رشد نرسیده که بتواند از

نتیجه‌گیری

باتوجه به مطالعات انجام شده، تولید جاذب‌های زیستی از طریق روش‌های فیزیکی، شیمیایی، کربنه‌کردن، و ترکیبی از این روش‌ها مزایای متمایزی دارد. فعال‌سازی فیزیکی، سطح ویژه کمتری با درصد منافذ بالایی ایجاد می‌کند که جاذب را برای کاربردهای خاص مناسب می‌کند. از سوی دیگر، فعال‌سازی شیمیایی، منجر به افزایش سطح با افزایش ریزحفره‌ها می‌شود و قابلیت جذب آلاینده را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، تهیه جاذب‌های زیستی از طریق فعال‌سازی حرارتی در دمای بالا، اثرات قابل‌توجهی بر روی ظرفیت جذب جاذب‌های ارزان با حجم منافذ بهینه دارد. جاذب‌های زیستی تولید شده از طریق روش‌های کربنه‌کردن به دلیل ایجاد ساختارهای منحصر به فرد ترجیح داده می‌شوند زیرا جذب آلاینده را با هزینه کم و عملکرد بالا ممکن می‌سازد. بنابراین، ترکیبی از روش‌های فیزیکی و شیمیایی در تولید جاذب‌های زیستی می‌تواند رویکرد مناسبی برای توسعه جاذب‌های متخلخل باشد که برای نیازهای مختلف مفید هستند. با استفاده ترکیبی از این روش‌ها، ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی جاذب‌های زیستی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش کارایی در حذف آلاینده‌های معدنی و آلی از فاضلاب می‌شود. این پژوهش نشان داد حل هم‌زمان معضل انباشت ضایعات مرکبات و تصفیه فاضلاب‌های صنعتی قابل انجام است. اگرچه، هزینه‌های جداسازی و بازیابی جاذب‌ها می‌تواند یکی از بزرگترین موانع برای استفاده از جاذب‌ها باشد، اما ضایعات مرکبات چون ارزان قیمت هستند نیازی به بازیابی جاذب‌های حاصل از آن‌ها نیست. از طرفی، بررسی‌ها نشان داد ضایعات مرکبات به‌عنوان مواد اولیه سازنده جاذب‌های گرمایی و خورشیدی شناور برای نمک‌زدایی در مقایسه با جاذب‌های مصنوعی، نه تنها کارایی را بهبود بخشیدند، بلکه مزایای اقتصادی و محیط‌زیستی نیز داشتند. همچنین، فرآیند جذب زیستی با جاذب‌های زیستی در مقایسه با روش‌های دیگر از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر هستند. بنابراین، در میان بسیاری از جاذب‌های زیستی ارزان قیمت مطالعه شده، ضایعات مرکبات یکی از گزینه‌های مناسب، برای تولید جاذب‌های زیستی تصفیه کننده آب و فاضلاب هستند.

پیشنهادها

بررسی‌های این پژوهش روی جاذب‌های مختلف حاصل از ضایعات مرکبات نشان داد که استفاده از ضایعات مرکبات برای جذب آلاینده‌های مختلف مانند رنگ‌ها، سم‌ها، داروها، یون‌های فلزی، و نمک از محیط‌های آبی از نظر اقتصادی و محیط‌زیستی امکان‌پذیر است و در صورت اجرا در مقیاس صنعتی، تأثیر مثبت

به مراحل برداشت و پس از برداشت است. همچنین، مابقی ضایعات از کارخانه‌های تولید آمپوه و ... در ایران سرچشمه می‌گیرد که در اکثر استان‌های کشور از جمله تهران، البرز، خراسان رضوی، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، فارس، مازندران، اصفهان، گلستان، قزوین، خوزستان، قم، و گیلان تأسیس شده‌اند. این ضایعات اثرات منفی قابل ملاحظه‌ای بر رشد و توسعه کشور دارد. متأسفانه یکی از ضعف‌هایی که در بخش صنایع تبدیلی ضایعات کشاورزی وجود دارد این است که پایشی در زمینه فعالیت و عدم فعالیت صنایع وجود نداشته است و باعث شده است که باوجود تولید بالای ضایعات مرکبات (از بخش‌های مختلف مثل کشت، برداشت، حمل و نقل، نگهداری، و تفاله‌های حاصل از کارخانجات)، به حداقل استفاده از این ضایعات اکتفا شود. فرآوری مرکبات انواع مختلفی از پسماندهای جامد و مایع را تولید می‌کند. از محصولات جانبی مرکبات می‌توان به‌عنوان منبع غنی از ترکیبات با ارزش افزوده، برای تولید سوخت‌های زیستی گازی (بیومتان)، سوخت‌های زیستی مایع (بیودیزل و بیواتانول)، و جاذب برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی استفاده کرد. همچنین، می‌توان از آن‌ها در بخش‌های غذایی، آرایشی و بهداشتی، دارویی، در تولید خوراک بهینه دام و کودهای خاص زیستی استفاده کرد.

صنایع تولیدکننده انواع فاضلاب صنعتی در بیشتر استان‌های ایران وجود دارد که شامل، صنایع معدنی، صنایع دارویی و بهداشتی، صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، صنایع فولاد و آهن، صنایع غذایی، کشتارگاه‌ها، صنایع نساجی، صنایع کاغذ و مقوا، صنایع چاپ و رنگرزی، صنایع باتری‌سازی و ... است. انواع فاضلاب‌های صنعتی به جهت اینکه حاوی مواد سمی، واکنش‌پذیر، رنگ‌ها، فلزات سنگین، و مواد سرطان‌زا هستند، بدون اعمال فرایندهای تصفیه امکان تخلیه به آب‌های سطحی را ندارند و اثرات بسیار مخربی بر محیط‌زیست خواهند گذاشت. در ایران (در اکثر مناطق)، باتوجه به حجم بالای ضایعات مرکبات، می‌توان از این ضایعات با روشی آسان (فیزیکی، شیمیایی و کربونه کردن یا ترکیبی از این روش‌ها)، برای تولید جاذب زیستی استفاده کرد. بنابراین، از جاذب‌های زیستی حاصل از ضایعات مرکبات می‌توان برای تصفیه فاضلاب‌های حاصل از صنایع مختلف که در ایران وجود دارد استفاده کرد. استفاده از روش جذب سطحی با استفاده از جاذب‌های زیستی (ضایعات مرکبات) نسبت به روش‌های دیگر، مقرون به‌صرفه، آسان و موثر در حذف بسیاری از آلاینده‌ها به‌ویژه رنگ‌ها و فلزات است. از این رویکرد می‌توان در ایران، باتوجه به حجم بالای ضایعات مرکبات، برای حذف آلاینده‌های آلی و معدنی موجود در فاضلاب‌های صنعتی استفاده کرد. تولید جاذب زیستی از ضایعات مرکبات می‌تواند موجب توسعه صنعت آب و فاضلاب در ایران شود.

16-Methylene Blue	17-Methyl Red
18-Methyl Orange	19-Toluidine Blue O
20-Crystal Violet	21-Safranin O
22-Bromothymol Blue	23-Bromophenol
24-Malachite Green	25-Langmuir isotherm
26-Freundlich isotherm	27-Sips
28-Dubinín-Radushkevich isotherm	
29-Temkin isotherm	
30-Brunauer, Emmett, and Teller isotherm	
31-Elovich	32-Avrami
33-Bangham	
34-Layer diffusion models	
35-Pseudo-First-Order	
36-Pseudo-Second-Order	
37-Lagergren pseudo-first order	38-Acid Violet 17
39-Remazol Brilliant Blue R	40-Direct Blue 77
41-Safranin Orange	42-Congo Red
43-Procion Orange	44-Rhodamine B
45-Acid Orange 52	46-Basic Blue 9
47-Basic Violet 10	48-Direct Red 28
49-Methyl Violet	50-Arsenic
51-Hexamethylene diisocyanate	
52-Indigo Carmine	53-Arsenic (III) and (V)
54-Acid Blue	55-Direct Yellow 12
56-Koble-Corrigan	
57-Generalized isotherm equations	
58-Trimethoprim	59-Direct Blue 86
60-Reactive Red 2	61-Reactive Blue 19 & 49
62-Capacitive Deionization (CDI) Cell	

منابع

- میرمجیدی هشتجین، عادل، فامیل مومن، رضا، و گودرزی، فرزاد. (۱۳۹۵). کاهش ضایعات محصولات کشاورزی راهبرد اصلی در ارتقاء امنیت غذایی. کرج، ایران.
- Aboli, E., Jafari, D., & Esmaeili, H. (2020). Heavy metal ions (lead, cobalt, and nickel) biosorption from aqueous solution onto activated carbon prepared from Citrus limetta leaves. *Carbon letters*, 30, 683-698. doi.org/10.1007/s42823-020-00141-1
- Abdullah, N. A., Rani, M. S. A., Mohammad, M., Sainorudin, M. H., Asim, N., Yaakob, Z., Razali, H., & Emdadi, Z. (2021). Nanocellulose from agricultural waste as an emerging nanotechnology material for nanotechnology applications—an overview. *Polimery*, 66(3). doi.org/10.14314/polimery.2021.3.1

محیط زیستی را به همراه دارد. به منظور توسعه عملی استفاده از جاذب‌های زیستی حاصل از مرکبات برای تصفیه آب، چالش‌هایی وجود دارد که پیشنهاد می‌شود در کارهای پژوهشی آینده مورد توجه قرار گیرند:

- بسیاری از مطالعات به منظور استفاده از جاذب‌ها برای حذف یک آلاینده خاص از فاضلاب مصنوعی انجام شدند که برای کاربردهای واقعی غیر عملی است. بنابراین، پژوهش‌های آینده باید استفاده از فاضلاب‌های واقعی حاوی مخلوطی از آلاینده‌ها را برای ارزیابی جاذب‌ها بررسی نمایند.
- در بیشتر پژوهش‌ها جذب زیستی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد که باید برای به دست آوردن عملکرد کامل جذب زیستی، بررسی کافی در مقیاس نیمه صنعتی و صنعتی لحاظ شود.
- توسعه فناوری‌های مقرون به صرفه برای واجذب آلاینده‌ها از جاذب‌های استفاده شده و بازیابی آن‌ها باید بررسی شوند.
- سطح بسیاری از جاذب‌ها را برای افزایش ظرفیت جذب می‌توان تغییر داد. بنابراین، باید روش‌های اصلاح سطح جدیدی مبتنی بر فناوری‌های نو مانند پلاسمای سرد را بررسی کرد.
- پژوهش‌های بیشتری برای اطمینان از ایمنی و اثرات زیست محیطی ضایعات مرکبات مورد نیاز است.
- ارزیابی فنی-اقتصادی کلید گمشده توسعه این رویکرد است که اغلب، در پژوهش‌های مختلف ارائه نمی‌شود. بنابراین، برای اثبات کارایی این رویکرد باید در پژوهش‌های آینده ارزیابی اقتصادی برای جاذب‌های تولیدی و میزان صرفه جویی اقتصادی ناشی از این رویکرد در تصفیه فاضلاب ارائه شود.

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی دانشگاه فردوسی مشهد برگرفته شده از طرح پژوهشی با کد ۶۱۶۷۹ انجام شده است. به این وسیله، نویسندگان از دانشگاه فردوسی مشهد قدردانی می‌کنند.

پی‌نوشت‌ها

- 1-World Water Council
- 2-World Health Organization
- 3-Citrus peel waste
- 4-Biochemical Oxygen Demand
- 5-Chemical Oxygen Demand
- 6-Reverse Osmosis
- 7-Capacitive deionization
- 8-Nanofiltration
- 9-Electrodialysis
- 10-Electrodialysis Reversal
- 11-Solar distillation
- 12-Multi-Stage Flash Distillation
- 13-Multi-Effect Distillation
- 14-Vapour Compression Distillation
- 15-Magnetic pectin-Chlorella vulgaris

- Babu, C. S., Chakrapani, C. C., & Rao, K. S. (2011). Equilibrium and kinetic studies of reactive red 2 dye adsorption onto prepared activated carbons. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 3(1), 428-439.
- Bayo, J., Esteban, G., & Castillo, J. (2012). The use of native and protonated grapefruit biomass (*Citrus paradisi* L.) for cadmium (II) biosorption: equilibrium and kinetic modelling. *Environmental Technology*, 33(7), 761-772. doi.org/10.1080/09593330.2011.592227
- Bello, O. S., Ahmad, M. A., & Semire, B. (2015). Scavenging malachite green dye from aqueous solutions using pomelo (*Citrus grandis*) peels: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, 56(2), 521-535. doi.org/10.1080/19443994.2014.940387
- Bharadwaj, R., Singh, D., & Mahapatra, A. (2008). Seawater desalination technologies. *International Journal of Nuclear Desalination*, 3(2), 151-159. doi.org/10.1504/IJND.2008.020222
- Bhatti, H. N., Akhtar, N., & Saleem, N. (2012). Adsorptive removal of methylene blue by low-cost *Citrus sinensis* bagasse: equilibrium, kinetic and thermodynamic characterization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37, 9-18. doi.org/10.1007/s13369-011-0158-1
- Bhatnagar, A., Kumar, E., Minocha, A. K., Jeon, B. H., Song, H., & Seo, Y. C. (2009). Removal of anionic dyes from water using *Citrus limonum* (lemon) peel: equilibrium studies and kinetic modeling. *Separation Science and Technology*, 44(2), 316-334. doi.org/10.1080/01496390802437461
- Bhatnagar, A., Minocha, A. K., & Sillanpää, M. (2010). Adsorptive removal of cobalt from aqueous solution by utilizing lemon peel as biosorbent. *Biochemical Engineering Journal*, 48(2), 181-186. doi.org/10.1016/j.bej.2009.10.005
- Bhambure, S., & Rao, A. S. (2019). A Review on Bio Composites in Industrial Applications. In *Proceedings 2019: Conference on Technologies for Future Cities (CTFC)*. Veermata Jijabai Technological Institute (VJTI) - Department of Mechanical Engineering, New Panvel. Maharashtra, India. doi.org/10.2139/ssrn.3346958
- Bharath, K. N., & Basavarajappa, S. (2016). Applications of biocomposite materials based on natural fibers from renewable resources: a review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(2), 123-133. doi.org/10.1515/secm-2014-0088
- Adewuyi, A. (2020). Chemically modified biosorbents and their role in the removal of emerging pharmaceutical-waste in the water system. *Water*, 12, 1551. doi.org/10.3390/w12061551
- Aguilar-Torrejón, J. A., Balderas-Hernández, P., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C. E., Rodríguez-Torres, I., & Torres-Blancas, T. (2023). Relationship, importance, and development of analytical techniques: COD, BOD, and TOC in water—An overview through time. *SN Applied Sciences*, 5(4), 118. doi.org/10.1007/s42452-023-05318-7
- Ahirrao, D. J., Tambat, S., Pandit, A. B., & Jha, N. (2019). Sweet-lime-peels-derived activated-carbon-based electrode for highly efficient supercapacitor and flow-through water desalination. *ChemistrySelect*, 4(9), 2610-2625. doi.org/10.1002/slct.201803417
- Aichour, A., & Zaghouane-Boudiaf, H. (2020). Single and competitive adsorption studies of two cationic dyes from aqueous mediums onto cellulose-based modified citrus peels/calcium alginate composite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 1227-1236. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.277
- Annadurai, G., Juang, R. S., & Lee, D. J. (2002). Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 92(3), 263-274. [doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00017-1)
- Arunkumar, T., Lim, H. W., Denkenberger, D., & Lee, S. J. (2022). A review on carbonized natural green flora for solar desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112121. doi.org/10.1016/j.rser.2022.112121
- Ashraf, M. A., Maah, M. J., Yusoff, I., Mahmood, K., & Wajid, A. (2011). Study of biosorptive potential in the peel of *Citrus reticulata*, *Punica granatum*, *Daucus carota* and *Momordica charantia*. *African Journal of Biotechnology*, 10(68), 15364-15371. doi.org/10.5897/AJB11.1090
- Asgher, M., & Bhatti, H. N. (2012). Removal of reactive blue 19 and reactive blue 49 textile dyes by citrus waste biomass from aqueous solution: equilibrium and kinetic study. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 90(2), 412-419. doi.org/10.1002/cjce.20531
- Attallah, O. A., Al-Ghobashy, M. A., Nebsen, M., El-Kholy, R., & Salem, M. Y. (2018). Assessment of pectin-coated magnetite nanoparticles in low-energy water desalination applications. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 18476-18483. doi.org/10.1007/s11356-018-2060-9

- (Citrus maxima) fruit peels. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 63504-63515. doi.org/10.1007/s11356-020-10176-6
- Dutta, S., Bhattacharyya, A., Ganguly, A., Gupta, S., & Basu, S. (2011). Application of response surface methodology for preparation of low-cost adsorbent from citrus fruit peel and for removal of methylene blue. *Desalination*, 275(1-3), 26-36. doi.org/10.1016/j.desal.2011.02.057
- El Malti, W., Hijazi, A., Abou Khalil, Z., Yaghi, Z., Medlej, M. K., & Reda, M. (2022). Comparative study of the elimination of copper, cadmium, and methylene blue from water by adsorption on the Citrus sinensis peel and its activated carbon. *Royal Society of Chemistry advances*, 12(17), 10186-10197. doi.org/10.1039/D1RA08997H
- El Nemr, A., Abdelwahab, O., El-Sikaily, A., & Khaled, A. (2009). Removal of direct blue-86 from aqueous solution by new activated carbon developed from orange peel. *Journal of Hazardous Materials*, 161(1), 102-110. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.060
- Elisadiki, J., Jande, Y. A. C., Machunda, R. L., & Kibona, T. E. (2019). Porous carbon derived from Artocarpus heterophyllus peels for capacitive deionization electrodes. *Carbon*, 147, 582-593. doi.org/10.1016/j.carbon.2019.03.036
- FENG, N. C., & GUO, X. Y. (2012). Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead, and zinc by modified orange peel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(5), 1224-1231. [doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61309-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61309-5)
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2011). Microwave assisted preparation of activated carbon from pomelo skin for the removal of anionic and cationic dyes. *Chemical Engineering Journal*, 173(2), 385-390. doi.org/10.1016/j.cej.2011.07.073
- Gondhalekar, S. C., & Shukla, S. R. (2014). Equilibrium and kinetics study of uranium (VI) from aqueous solution by Citrus limetta peels. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 302, 451-457. doi.org/10.1007/s10967-014-3165-3
- Gönen, F., & Serin, D. S. (2012). Adsorption study on orange peel: removal of Ni (II) ions from aqueous solution. *African Journal of Biotechnology*, 11(5), 1250-1258. doi.org/10.5897/AJB11.1753
- Gunay Gurer, A., Aktas, K., Ozkaleli Akcetin, M., Erdem Unsar, A., & Asilturk, M. (2021). Adsorption isotherms, thermodynamics, and kinetic modeling of methylene blue
- Biswas, B. K., Inoue, K., Ghimire, K. N., Ohta, S., Harada, H., Ohto, K., & Kawakita, H. (2007). The adsorption of phosphate from an aquatic environment using metal-loaded orange waste. *Journal of Colloid and Interface Science*, 312(2), 214-223. doi.org/10.1016/j.jcis.2007.03.072
- Chatterjee, A., & Schiewer, S. (2011). Biosorption of cadmium (II) ions by citrus peels in a packed bed column: effect of process parameters and comparison of different breakthrough curve models. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 39(9), 874-881. doi.org/10.1002/clen.201000482
- Chatterjee, A., & Schiewer, S. (2014a). Effect of competing cations (Pb, Cd, Zn, and Ca) in fixed-bed column biosorption and desorption from citrus peels. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225, 1-13. doi.org/10.1007/s11270-013-1854-0
- Chatterjee, A., & Schiewer, S. (2014b). Multi-resistance kinetic models for biosorption of Cd by raw and immobilized citrus peels in batch and packed-bed columns. *Chemical Engineering Journal*, 244, 105-116. doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.017
- Czarnota, R., Knapik, E., Wojnarowski, P., Janiga, D., & Stopa, J. (2019). Carbon dioxide separation technologies. *Archives of Mining Sciences*, 64(3), 487-498. doi.org/10.24425/ams.2019.129364
- Da Silva, M. D., da Boit Martinello, K., Knani, S., Lütke, S. F., Machado, L. M., Manera, C., Perondi, D., Godinho, M., Collazzo, G.C., Silva, L.F., & Dotto, G. L. (2022). Pyrolysis of citrus wastes for the simultaneous production of adsorbents for Cu (II), H₂, and d-limonene. *Waste Management*, 152, 17-29. doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.024
- De Souza, J. V. T. M., Diniz, K. M., Massocatto, C. L., Tarley, C. R. T., Caetano, J., & Dragunski, D. C. (2012). Removal of Pb (II) from aqueous solution with orange sub-products chemically modified as biosorbent. *BioResources*, 7(2), 2300-2318. doi.org/10.15376/biores.7.2.2300-2318
- Dev, S., Khamkhash, A., Ghosh, T., & Aggarwal, S. (2020). Adsorptive removal of Se (IV) by citrus peels: Effect of adsorbent entrapment in calcium alginate beads. *American Chemical Society omega*, 5(28), 17215-17222. doi.org/10.1021/acsomega.0c01347
- Dinh, V. P., Xuan, T. D., Hung, N. Q., Luu, T. T., Do, T. T. T., Nguyen, T. D., Nguyen, V.D., Anh, T.T.K., & Tran, N. Q. (2021). Primary biosorption mechanism of lead (II) and cadmium (II) cations from aqueous solution by pomelo

- Khorasani, A. C., Bajestani, S. Z., & Bajestani, A. S. (2023). Comparative techno-economic assessment of production of microcrystalline cellulose, microcrystalline nitrocellulose, and solid biofuel for biorefinery of pistachio shell. *Bioresource Technology Reports*, 24, 101673. doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101673
- Khorasani, A. C., & Satvati, P. R. (2024). Reusable cellulose-based biosorbents for efficient iodine adsorption by economic microcrystalline cellulose production from walnut shell. *International Journal of Biological Macromolecules*, 256, 128432. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128432
- Khaskheli, M. I., Memon, S. Q., Siyal, A. N., & Khuhawar, M. Y. (2011). Use of orange peel waste for arsenic remediation of drinking water. *Waste and Biomass Valorization*, 2, 423-433. doi.org/10.1007/s12649-011-9081-7
- Khormaei, M., Nasernejad, B., Edrisi, M., & Eslamzadeh, T. (2007). Copper biosorption from aqueous solutions by sour orange residue. *Journal of Hazardous Materials*, 149(2), 269-274. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.074
- Khaled, A., El Nemr, A., El-Sikaily, A., & Abdelwahab, O. (2009). Treatment of artificial textile dye effluent containing Direct Yellow 12 by orange peel carbon. *Desalination*, 238(1-3), 210-232. doi.org/10.1016/j.desal.2008.02.014
- Lasheen, M. R., Ammar, N. S., & Ibrahim, H. S. (2012). Adsorption/desorption of Cd (II), Cu (II) and Pb (II) using chemically modified orange peel: Equilibrium and kinetic studies. *Solid State Sciences*, 14(2), 202-210. doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2011.11.029
- Lee, M. G., & Kam, S. K. (2018). Study on the adsorption of antibiotics trimethoprim in aqueous solution by activated carbon prepared from waste citrus peel using box-behnken design. *Korean Chemical Engineering Research*, 56(4), 568-576. doi.org/10.9713/kcer.2018.56.4.568
- Mahato, N., Sharma, K., Sinha, M., Baral, E. R., Koteswararao, R., Dhyani, A., Cho, M.H., & Cho, S. (2020). Bio-sorbents, industrially important chemicals, and novel materials from citrus processing waste as a sustainable and renewable bioresource: A review. *Journal of Advanced Research*, 23, 61-82. doi.org/10.1016/j.jare.2020.01.007
- Mahato, N., Agarwal, P., Mohapatra, D., Sinha, M., Dhyani, A., Pathak, B., Tripathi, M.K., & Angaiah, S. (2021). Bio-transformation of citrus waste-II: bio-sorbent materials for removal of dyes, heavy metals, and toxic chemicals from polluted water. *Processes*, 9(9), 1544. doi.org/10.3390/pr9091544
- onto novel carbonaceous adsorbent derived from bitter orange peels. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 1-17. doi.org/10.1007/s11270-021-05090-7
- Hameed, B. H., Mahmoud, D. K., & Ahmad, A. L. (2008). Sorption of basic dye from aqueous solution by pomelo (*Citrus grandis*) peel in a batch system. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 316(1-3), 78-84. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.08.033
- Inagaki, C. S., Caretta, T. D. O., Alfaya, R. V. D. S., & Alfaya, A. A. D. S. (2013). Mexerica mandarin (*Citrus nobilis*) peel as a new biosorbent to remove Cu (II), Cd (II), and Pb (II) from industrial effluent. *Desalination and Water Treatment*, 51(28-30), 5537-5546. doi.org/10.1080/19443994.2012.759156
- Januário, E. F. D., Vidovix, T. B., Araujo, L. A. D., Bergamasco Beltran, L., Bergamasco, R., & Vieira, A. M. S. (2022). Investigation of *Citrus reticulata* peels as an efficient and low-cost adsorbent for the removal of safranin orange dye. *Environmental Technology*, 43(27), 4315-4329. doi.org/10.1080/09593330.2021.1946601
- Joglekar, J. J., Munde, Y. S., Jadhav, A. L., Bhutada, D. S., Radhakrishnan, S., & Kulkarni, M. B. (2021). Studies on effective utilization of *Citrus Maxima* fibers-based PVC composites. *Materials Today: Proceedings*, 42, 578-583. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.648
- Karanicola, P., Patsalou, M., Stergiou, P. Y., Kavallieratou, A., Evripidou, N., Christou, P., & Koutinas, M. (2021). Ultrasound-assisted dilute acid hydrolysis for production of essential oils, pectin, and bacterial cellulose via a citrus processing waste biorefinery. *Bioresource Technology*, 342, 126010. doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126010
- Khorasani, A. C., & Shojaosadati, S. A. (2019a). Magnetic pectin-*Chlorella vulgaris* biosorbent for the adsorption of dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103062. doi.org/10.1016/j.jece.2019.103062
- Khorasani, A. C., & Shojaosadati, S. A. (2019b). Intestinal adsorption of glucose, cholesterol, and bile salt by simultaneous incorporation of edible microbiosorbent and intestinal bacteria. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 19, 101119. doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101119
- Khorasani, A. C., Kouhfar, F., & Shojaosadati, S. A. (2021). Pectin/lignocellulose nanofibers/chitin nanofibers bionanocomposite as an efficient biosorbent of cholesterol and bile salts. *Carbohydrate Polymers*, 261, 117883. doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117883

- using nanocelluloses/cellulose derivatives-based membranes for sustainable future. *Desalination*, 520, 115359. doi.org/10.1016/j.desal.2021.115359
- Rahmat, N. A., Ali, A. A., Salmiati, Hussain, N., Muhamad, M. S., Kristanti, R. A., & Hadibarata, T. (2016). Removal of Remazol Brilliant Blue R from aqueous solution by adsorption using pineapple leaf powder and lime peel powder. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 1-11. doi.org/10.1007/s11270-016-2807-1
- Rani, S., & Chaudhary, S. (2022). Adsorption of methylene blue and crystal violet dye from waste water using Citrus limetta peel as an adsorbent. *Materials Today: Proceedings*, 60, 336-344. doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.237
- Rajasekhar, K. K., Babu, R. H., Veena, B. M., Lavanya, G., Haripriya, P., & Hamsini, K. V. (2009). Adsorption studies of methylene blue and congo red on the surface of Citrus aurantium. *Asian Journal of Chemistry*, 21(2), 1531.
- Rehman, R., Zafar, J., & Nisar, H. (2014). Adsorption studies of removal of indigo carmine dye from water by formaldehyde and urea treated cellulosic waste of citrus reticulata peels. *Asian Journal of Chemistry*, 26(1), 43. doi.org/10.14233/ajchem.2014.15305
- Rosales, E., Mejjide, J., Tavares, T., Pazos, M., & Sanromán, M. A. (2016). Grapefruit peelings as a promising biosorbent for the removal of leather dyes and hexavalent chromium. *Process Safety and Environmental Protection*, 101, 61-71. doi.org/10.1016/j.psep.2016.03.006
- Roy, H., Prantika, T. R., Riyad, M. H., Paul, S., & Islam, M. S. (2022). Synthesis, characterizations, and RSM analysis of Citrus macroptera peel derived biochar for textile dye treatment. *South African Journal of Chemical Engineering*, 41, 129-139. doi.org/10.1016/j.sajce.2022.05.008
- Samrot, A. V., Purohit, K., Saigeetha, S., Shobana, N., Dhas, T. S., & Cypriana, P. J. (2022). Citrus sinensis cellulose fibres incorporated with SPIONs for effective removal of crystal violet dye. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 39, 102211. doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102211
- Saeed, A., Sharif, M., & Iqbal, M. (2010). Application potential of grapefruit peel as dye sorbent: kinetics, equilibrium, and mechanism of crystal violet adsorption. *Journal of Hazardous Materials*, 179(1-3), 564-572. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.041
- Sattar, J. A. A. (2013). Toxic metal pollution abatement using sour orange biomass. *Al-Nahrain Journal of Science*, 16(3), 56-64. doi.org/10.22401/JNUS.16.3.07
- Mafra, M. R., Igarashi-Mafra, L., Zuim, D. R., Vasques, E. C., & Ferreira, M. A. (2013). Adsorption of remazol brilliant blue on an orange peel adsorbent. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30, 657-665. doi.org/10.1590/S0104-66322013000300022
- Mahmoud, G. A., Abdel-Aal, S. E., Badway, N. A., Elbayaa, A. A., & Ahmed, D. F. (2017). A novel hydrogel based on agricultural waste for removal of hazardous dyes from aqueous solution and reuse process in a secondary adsorption. *Polymer Bulletin*, 74, 337-358. doi.org/10.1007/s00289-016-1717-0
- Muniraj, K., Raju, G., Asha, B., & Manikandan, G. (2020). Citrus lemon leaf powder as a biosorbent for the removal of liquid phase toxic metals from textile effluent. *Desalination and Water Treatment*, 196, 422-432. doi.org/10.5004/dwt.2020.26084
- Naveed, S., Bhatti, H. N., Kazmi, M., Ishfaq, T., Ikhlaiq, A., & Fatima, H. (2016). Biosorption of Mn (II) by ripped Citrus paradisi pulp waste. *Desalination and Water Treatment*, 57(14), 6574-6581. doi.org/10.1080/19443994.2015.1011703
- Namasivayam, C., Muniasamy, N., Gayatri, K., Rani, M., & Ranganathan, K. (1996). Removal of dyes from aqueous solutions by cellulosic waste orange peel. *Bioresource Technology*, 57(1), 37-43. [doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00044-2](https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00044-2)
- Osman, A. I., El-Monaem, E. M. A., Elgarahy, A. M., Anigor, C. O., Hosny, M., Farghali, M., Rashad, E., Ejimofor, M.I., López-Maldonado, E.A., Ihara, I., Yap, P.S., Rooney, D.W., & Eltaweil, A. S. (2023). Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(4), 2337-2398. doi.org/10.1007/s10311-023-01603-4
- Pavan, F. A., Mazzocato, A. C., Jacques, R. A., & Dias, S. L. (2008). Ponkan peel: a potential biosorbent for removal of Pb (II) ions from aqueous solution. *Biochemical Engineering Journal*, 40(2), 357-362. doi.org/10.1016/j.bej.2008.01.004
- Patiño-Saldivar, L., Hernández, J. A., Ardila, A., Salazar-Hernández, M., Talavera, A., & Hernández-Soto, R. (2021). Cr (III) removal capacity in aqueous solution in relation to the functional groups present in the orange peel (Citrus sinensis). *Applied Sciences*, 11(14), 6346. doi.org/10.3390/app11146346
- Rana, A. K., Gupta, V. K., Saini, A. K., Voicu, S. I., Abdellatif, M. H., & Thakur, V. K. (2021). Water desalination

- Tayel, A., Nasr, P., & Sewilam, H. (2019). Forward osmosis desalination using pectin-coated magnetic nanoparticles as a draw solution. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 1617-1628. doi.org/10.1007/s10098-019-01738-5
- Torab-Mostaedi, M., Asadollahzadeh, M., Hemmati, A., & Khosravi, A. (2013). Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies for biosorption of cadmium and nickel on grapefruit peel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(2), 295-302. doi.org/10.1016/j.jtice.2012.11.001
- Verma, L., Siddique, M. A., Singh, J., & Bharagava, R. N. (2019). As (III) and As (V) removal by using iron impregnated biosorbents derived from waste biomass of Citrus limetta (peel and pulp) from the aqueous solution and ground water. *Journal of Environmental Management*, 250, 109452. doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109452
- Wilson, H. M., Ahirrao, D. J., Ar, S. R., & Jha, N. (2020). Biomass-derived porous carbon for excellent low intensity solar steam generation and seawater desalination. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215, 110604. doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110604
- Wu, S., Li, K., Shi, W., & Cai, J. (2022). Chitosan/polyvinylpyrrolidone/polyvinyl alcohol/carbon nanotubes dual layers nanofibrous membrane constructed by electrospinning-electrospray for water purification. *Carbohydrate Polymers*, 294, 119756. doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119756
- Xie, Z., Shang, X., Yan, J., Hussain, T., Nie, P., & Liu, J. (2018). Biomass-derived porous carbon anode for high-performance capacitive deionization. *Electrochimica Acta*, 290, 666-675. doi.org/10.1016/j.electacta.2018.09.104
- Yadav, M., Jadeja, R., & Thakore, S. (2022). An ecofriendly approach for methylene blue and lead (II) adsorption onto functionalized Citrus limetta bioadsorbent. *Environmental Processes*, 9(2), 27. doi.org/10.1007/s40710-022-00583-x
- Santos, C. M., Dweck, J., Viotto, R. S., Rosa, A. H., & de Morais, L. C. (2015). Application of orange peel waste in the production of solid biofuels and biosorbents. *Bioresource Technology*, 196, 469-479. doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.114
- Schiewer, S., & Balaria, A. (2009). Biosorption of Pb²⁺ by original and protonated citrus peels: Equilibrium, kinetics, and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 146(2), 211-219. doi.org/10.1016/j.cej.2008.05.034
- Schiewer, S., & Iqbal, M. (2010). The role of pectin in Cd binding by orange peel biosorbents: a comparison of peels, depectinated peels and pectic acid. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), 899-907. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.001
- Sharma, P., & Gupta, S. (2014). Study of amount of Oxygen (BOD, OD, COD) in water and their effect on fishes. *American International Journal of Research in Formal, Applied and Natural Sciences*, 7(1), 53-58.
- Shakoor, S., & Nasar, A. (2016). Removal of methylene blue dye from artificially contaminated water using Citrus limetta peel waste as a very low-cost adsorbent. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 66, 154-163. doi.org/10.1016/j.jtice.2016.06.009
- Sivaraj, R., Namasivayam, C., & Kadirvelu, K. (2001). Orange peel as an adsorbent in the removal of acid violet 17 (acid dye) from aqueous solutions. *Waste Management*, 21(1), 105-110. [doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00076-3](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00076-3)
- Singh, S. A., & Shukla, S. R. (2016). Adsorptive removal of cobalt ions on raw and alkali-treated lemon peels. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13, 165-178. doi.org/10.1007/s13762-015-0801-6
- Singh, S., & Shukla, S. R. (2017). Theoretical studies on adsorption of Ni (II) from aqueous solution using Citrus limetta peels. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(3), 864-872. doi.org/10.1002/ep.12526
- Sowmya Lakshmi, K. B., & Munilakshmi, N. (2016). Adsorptive removal of colour from aqueous solution of disazo dye by using organic adsorbents. *International Journal of ChemTech Research*, 9(4), 407-415.
- Tasaso, P. (2014). Adsorption of copper using pomelo peel and depectinated pomelo peel. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2(2), 154-157. doi.org/10.7763/JOCET.2014.V2.112