

بررسی اثر عوامل محیطی در فرایندهای جذبی آلاینده‌های آلی پساب با نانوالیاف پلی‌آمید الکتروریسی شده و مقایسه عملکرد با سامانه‌های ناهمگن کربن اولترا

محمدابراهیم علیا^{۱*}، جان-ایو دران^۲، مانده وفایی^۳، امیرهوشنگ حکمتی^۴، عبدالکریم شریفی^۵ و عمر حرزالله^۶

- ۱- دانشیار مهندسی شیمی، گروه پژوهشی محیط زیست و رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران
- ۲- استاد مهندسی نساجی، آزمایشگاه خواص فیزیکی و مکانیکی نساجی، دانشگاه هاوت آلزاس، مولوز، فرانسه
- ۳- دانشجوی دکترای مهندسی رنگ، گروه پژوهشی محیط زیست و رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران
- ۴- استادیار مهندسی نساجی، گروه طراحی لباس، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
- ۵- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، گروه پژوهشی محیط زیست و رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران
- ۶- دانشیار مهندسی نساجی، آزمایشگاه خواص فیزیکی و مکانیکی نساجی، دانشگاه هاوت آلزاس، مولوز، فرانسه

دریافت: آذر ۱۳۹۷، بازنگری: اسفند ۱۳۹۷، پذیرش: فروردین ۱۳۹۸

چکیده: در این پژوهش با توجه به خطرات ناشی از آلودگی‌های پساب صنایع نساجی و رنگرزی و باهدف حذف آلاینده‌های آلی، ابتدا نانوالیاف بسپاری (پلی‌آمید) تحت میدان ولتاژ بالا با سامانه نوین نیم‌صنعتی الکتروریسی تولید و نانوالیاف به دست آمده با روش‌های طیفسنجی فرسرخ تبدیل فوریه (FTIR)، میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، طیفسنجی تفکیک انرژی (EDS) و میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM) شناسایی شدند. همچنین، مساحت سطح جاذب با روش BET اندازه‌گیری شد. سپس، باهدف کاربرد نانوالیاف الکتروریسی شده در حذف مواد رنگزای آلی، با بررسی عامل‌های فرایندی، شرایط بهینه جذب ماده رنگزا در نقاط ۰/۰۴ گرم پلی‌آمید، pH برابر با ۲ و دور هم‌زن برابر با ۷۵۰ rpm به‌دست آمد. نتایج بیانگر تطابق ظرفیت جذب تعادلی محاسبه‌شده با ظرفیت جذب آزمایشگاهی در سینتیک درجه دوم و تبعیت هم‌دمای فرایند از هم‌دمای لانگمویر بود. برای مقایسه عملکردی با سامانه‌های ناهمگن، شرایط بهینه فرایندی سامانه ناهمگن کربن اولترا به‌عنوان یک سامانه مناسب شامل ۰/۰۱۵ گرم کربن اولترا، pH برابر با ۴ و دور هم‌زن ۷۵۰ rpm به‌دست آمد. درنهایت مزایا و معایب این دو سامانه فرایندی برای بررسی قابلیت ارتقای مقیاس از آزمایشگاهی به نیم‌صنعتی مورد مقایسه قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: نانوالیاف، الکتروریسی نیم‌صنعتی، سامانه جذبی ناهمگن، آلاینده‌های آلی پساب

مقدمه

توجه به این که محیط زیست از ارکان توسعه پایدار در هر کشوری است، از این‌رو، در چند دهه گذشته تلاش‌های قابل‌توجهی به منظور اجرا و بهبود سامانه‌های تصفیه پساب‌ها انجام شده است

امروزه پساب‌های صنعتی به‌عنوان یک منبع آلودگی، همواره سلامت انسان و محیط زیست را با خطر جدی مواجه می‌سازد. با

ایجاد می‌شود. مهم‌ترین نیروی مؤثر جذب فیزیکی، نیروهای الکترواستاتیک شامل نیروی واندروالس است [۱۰]. جذب سطحی شیمیایی مانند جذب فیزیکی بر پایه نیروهای الکترواستاتیک است درحالی‌که جذب شیمیایی با انتقال الکترون‌ها و تشکیل پیوندهای شیمیایی بین جاذب و ماده جذب‌شونده ایجاد می‌شود و اغلب قوی‌تر از سازوکار جذب سطحی فیزیکی است [۱۱]. در این فرایند سرعت جذب نیز بر اساس انتقال جرم و نفوذ درون ذره‌ای تعیین می‌شود [۱۲]. جاذب‌ها در چند گروه کلی جاذب‌های معدنی، آلی، زیستی، کربن فعال و یا در یک گروه‌بندی دیگر جاذب‌های طبیعی و سنتزی موردبررسی قرار می‌گیرند. در این بین کربن فعال را به دلیل گستره عملکردی و قدرت جذب بالا در فازهای متفاوت می‌توان به‌عنوان یکی از پرکاربردترین جاذب‌ها نام برد [۱۳ تا ۱۶]. کربن فعال به روشهای متفاوتی از جمله کربنی‌شدن و آبیگری قابل ساخت است. به این شکل که از سوختن ناخالصی‌ها در این فرایندها ماده با سطح تخلخل مناسب و قدرت جذب بالا تشکیل می‌شود که در شکلهای متفاوت ریزدانه‌ای^۱ و پودری در سطح بازار یافت می‌شود. این مواد دارای سطح متخلخل بسیار بزرگی در حدود تا $300 \text{ m}^2/\text{g}$ ۱۵۰۰ هستند [۱۵ تا ۱۷]. با توجه به این مطالب کربن فعال در بخش‌های تصفیه پساب به شکل همگن یا ناهمگن در دو نوع پودر و بستر ثابت، کاربرد بسیار زیادی پیدا کرده است [۱۸ تا ۲۰].

در سال‌های اخیر، کاربرد جاذب‌های بسیاری سنتزی برای حذف آلاینده‌ها از پساب‌های صنعتی گسترش چشمگیری پیدا کرده است [۲۱ و ۲۲]. جاذب‌های بسیاری به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای سایر جاذب‌ها به علت مساحت سطح زیاد، استحکام مکانیکی بالا و توزیع اندازه منافذ قابل تنظیم در حال گسترش هستند. سطح وسیع و استحکام ساختار این جاذب‌ها و ویژگی فیزیکی و شیمیایی پایه آن‌ها مانند سطح داخلی و توزیع اندازه منافذ با تغییر شرایط بسپارش، قابل تنظیم هستند. در این میان، پلی‌آمیدها دارای ویژگی برجسته‌ای از جمله نفوذناپذیری عالی در برابر گازها، مقاومت در برابر حلال‌های آلی و مقاومت زیستی بالا هستند که

[۱]. صنعت نساجی به‌عنوان یکی از بخش‌های پرمصرف در حوزه آب به همراه گستره وسیعی از مواد شیمیایی مورداستفاده در این صنعت به‌ویژه در فرایند رنگرزی به‌حساب می‌آید که تولید حجم قابل توجهی از پساب‌های صنعتی را به همراه دارد. در حقیقت، پساب نساجی شامل مواد رنگزا و رنگ‌دانه‌ها، ماده فعال در سطح، گریس‌ها و روغن‌ها، فلزها، کلریدها و سولفات‌ها هستند که تأثیر منفی بر کیفیت آب می‌گذارند. در صنایع رنگرزی به‌طور متوسط به ازای یک کیلوگرم ماده رنگزا ۱۰۰ لیتر پساب رنگی تولید می‌شود. برخی از این مواد رنگزا به دلیل داشتن ساختاری پیچیده، به سختی تجزیه می‌شوند و برخی دیگر سمی، سرطان‌زا و حتی جهش‌زا بوده و برای سلامت انسان و محیط‌زیست خطرناک هستند [۳ تا ۵]. با توجه به آنچه که در خصوص مواد رنگزا و اهمیت توجه به خطرات زیست‌محیطی آن‌ها بیان شد، امروزه روش‌های متعددی برای تصفیه پساب‌های صنعتی حاوی ترکیبات رنگزا مورداستفاده قرار می‌گیرد که برای مثال، می‌توان به روش‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی و روش‌های پیشرفته اشاره کرد. در تصفیه فیزیکی از یک فرایند فیزیکی و بیشتر بدون مواد شیمیایی برای انجام عمل تصفیه استفاده می‌شود که به همین دلیل این فرایندها که هزینه نگهداری و مواد افزودنی را نداشته و از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه هستند، به‌شدت موردتوجه بخش‌های صنعتی هستند [۶ تا ۸].

یکی از فرایندهای پرکاربرد در تصفیه آب فرایندهای جذب سطحی است که در آن عمل انتقال جرم در حذف مواد از فاز سیال انجام می‌شود. در سامانه‌های تصفیه پساب، از این فرایند به‌عنوان یک روش کارآمد پیش تصفیه استفاده می‌شود. در این سامانه مواد آلاینده بر سطح ماده جاذب که از آن به‌عنوان سطح فعال یاد می‌شود، جذب‌شده و عمل انتقال بین فاز محلول و سطح جامد انجام می‌شود. این مکان‌های فعال که دارای انرژی‌های متفاوت هستند اغلب به چند شکل فیزیکی و شیمیایی آلاینده‌های متفاوت را به خود جذب می‌کنند [۹]. جذب سطحی فیزیکی در نتیجه نیروهای بین مولکولی میان جاذب و ماده جذب‌شونده،

1. Granule

ترکیبات آلی، یکی از پرکاربردترین بسپارها در صنعت محسوب می‌شوند. نانوالیاف به‌دست آمده با روش‌های متفاوت شناسایی شده و قابلیت رنگبری آن با کربن فعال اولترا در سامانه‌های ناهمگن از نظر عملکردی و باهدف بررسی قابلیت ارتقا از سامانه آزمایشگاهی به سامانه‌های پایلوت و نیم‌صنعتی مورد مقایسه گرفته است.

بخش تجربی

مواد و روش‌ها

مواد

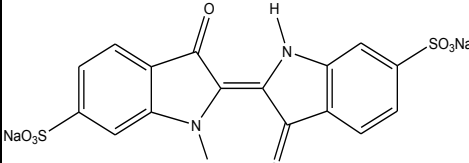
در این پژوهش، پلی‌آمید ۶ (آکرس)^۴ برای فرایند ساخت جاذب ترکیبی و فرمیک اسید ۹۸ درصد به‌عنوان یکی از حلال‌های مناسب برای بسپارهای سنتزی به‌کارگرفته شده است. ماده رنگزای ایندیگو کارمین^۵ (سیگما-آلدریج) با کاربرد بسیار بالا در صنایع رنگرزی و نساجی به‌عنوان ماده آلاینده آلی به‌کارگرفته شده است. رنگ‌های ایندیگوئید شامل صدها مشتق هستند و طیف وسیعی را در بر می‌گیرند، از میان آنها ایندیگو کارمین به‌طور گسترده‌ای در صنایع نساجی به‌کار می‌روند. جدول ۱ بیانگر مشخصات فیزیکی و شیمیایی رنگزای موردبررسی است.

در این پژوهش، برای مقایسه عملکرد جذبی نانوالیاف با سایر سامانه‌های جذبی ناهمگن، کربن فعال اولترا (NORIT) که به‌عنوان یکی از جاذب‌های خوب در صنعت از آن یاد می‌شود، مورداستفاده قرار گرفت. همچنین، از سولفوریک اسید و سدیم

این مسئله باعث کاربری روزافزون آن‌ها شده است. برای مثال، جاذب پلی‌آمید PAPS^۱ با ظرفیت جذب بالا در حذف رنگزاهای اسیدی و مستقیم از سامانه‌های تک جزئی و چند جزئی با گستره جذبی ۱۰ تا ۱۲ هزار میلی‌گرم بر گرم، مورد مطالعه قرار گرفته است که عملکرد مناسب این جاذب در قالب سینتیک شبه‌درجه دوم در فرایندهای حذف مواد رنگزا را نشان می‌دهد [۲۳]. همچنین، این ترکیبات برای حذف آنیلین موجود در آب‌های آلوده به‌کاررفته‌اند [۲۴]. در مطالعه دیگر، از پلی‌وینیل الکل (PVA)^۲ به‌عنوان جاذب برای حذف رنگزاهای آزو سمی مانند مالاکیت سبز و کونگو قرمز از محلول‌های آبی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حذف رنگزا به pH محلول وابسته است. مطالعه سینتیک جذب نشان می‌دهد که فرایند جذب از سینتیک شبه‌مرتبه دوم پیروی می‌کند [۲۵]. یکی از مهم‌ترین انواع نانوساختارهای یک‌بعدی، نانوالیاف هستند. صنعت منسوجات، به‌طور معمول الیافی را که قطری کمتر از ۱ میکرون دارند، به‌عنوان نانوالیاف در نظر می‌گیرد. طی چند دهه اخیر، روش‌های متعددی برای تولید نانوالیاف از مواد متفاوت از جمله بسپارها ارائه شده است.

در این پژوهش ابتدا نانوالیاف بسپاری پلی‌آمید به روش WSES^۳ الکترورسی شده و سپس، برای حذف ماده آلاینده آلی محلول در آب به‌کارگرفته شده است. الیاف پلی‌آمید به لحاظ انعطاف‌پذیری و مقاومت و پایداری عالی به‌ویژه در محیط‌های اسیدی، بازی و همچنین جذب رطوبت پایین و قدرت جذب بالای

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و شیمیایی ماده رنگزای ایندیگوکارمین

رنگزا	فرمول مولکولی	عدد شاخص رنگ*	جرم مولکولی (گرم بر مول)	λ_{max} (nm)	ساختار
ایندیگو کارمین	$C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$	۷۳۰۱۵	۴۶۶٫۳۶	۶۰۸	

* Color index number

1. Poly-aniline-propane sulfonic acid (PAPS) 2. Polyvinyl alcohol (PVA) 3. Wired semi-industrial electrospinning system (WSES)
4. ACROS 5. 5,5'-Indigo disulfonic acid disodium salt

دستگاه گریزانه 5000RPM Heraeus برای تهیه نمونه‌های جذبی، pH متر (EDT-GP353 و Consort C863) برای کنترل مقدار pH محلول، همزن مکانیکی، ترازوی دیجیتال با دقت 0.0001 g (Sartorius)، همزن مغناطیسی و آون (WTB binder Type F115) برای سایر موارد استفاده شد.

روش‌های شناسایی

برای شناسایی ویژگی و تجزیه مواد مصرفی و ترکیبات الکترونیسی شده روش‌های دستگاهی به کار گرفته شد. طیف FTIR نانوالیاف با طیف‌سنج فروسخ تبدیل فوریه (Thermo Nicolet NEXUS870 Nicolet Instrument Corp (USA) تهیه و به منظور شناسایی گروه‌های عاملی استفاده شد. ریخت‌شناسی سطح نانوالیاف با میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN-MIRA III بررسی شد. توپوگرافی سطح نانوالیاف با میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، مدل DualScope C-26 (DENMARK) بررسی شد. همچنین، مساحت سطح جاذب با روش BET، با تحلیل گر استاندارد (Micromeritics Gemini III 2375, USA) اندازه‌گیری شد.

روش کار

در هر آزمایش مقدار مشخصی از محلول رنگزا با غلظت موردنظر با آب فراخالص تهیه و pH آن با افزودن محلول NaOH یا H_2SO_4 تنظیم شد. به منظور پرهیز از تغییر حجم محلول پساب محلول NaOH و H_2SO_4 با غلظت‌های متفاوت تهیه شد. پس از افزودن ماده جاذب در بازه‌های زمانی مشخص، نمونه‌برداری برای خواندن مقدار جذب یا کربن آلی انجام شد. در فرایندهای ناهمگن پیش از سنجش مقدار جذب، نمونه‌ها در دستگاه گریزانه قرار داده شد.

روش محاسبه مقدار حذف آلاینده

به منظور محاسبه بازده و مقدار جذب، غلظت آلاینده موردنظر در محلول، پیش و پس از افزودن جاذب و در مدت موردنیاز برای رسیدن به تعادل، اندازه‌گیری شد. بازده حذف آلاینده (%Dec) از

هیدروکسید (مرک) برای تنظیم pH محلول‌های شیمیایی استفاده شد. برای ساخت محلول‌های موردنیاز، به دلیل مقدار ناچیز کربن آلی و عدم ایجاد مزاحمت برای اندازه‌گیری‌ها و همچنین، خلوص بالای آن از آب فراخالص استفاده شده است.

روش تولید نانوالیاف

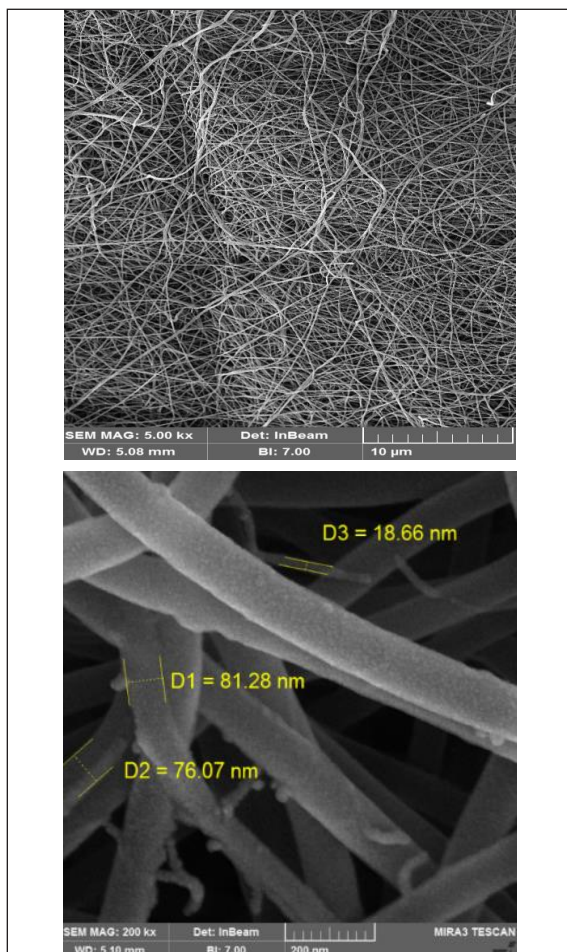
در روش الکترونیسی به کار گرفته شده، نانوالیاف با یک میدان الکتریکی ولتاژ بالا تولید می‌شوند که این روش را می‌توان روشی کارا برای تولید نانوالیاف حتی به صورت پیوسته دانست. در این روش، ماده در میدان ولتاژ بالا و با عبور از یک سوزن به سمت یک صفحه جمع‌آوری‌کننده پرتاب شده و در نهایت نانوالیاف بر صفحه تشکیل می‌شود. در حقیقت عامل اصلی تشکیل نانوالیاف در این سامانه تشکیل مخلوط تیلور در اثر غلبه نیروهای الکترواستاتیکی بر کشش سطحی مایع و حرکت آن در میدان به سمت سطح هدف است.

در سامانه‌های نیم‌صنعتی امروزی، یکی از روش‌های الکترونیسی جدید با استفاده از سیم‌های طولی و ریزش بسیار بر آن و تشکیل بسیار در میدان ولتاژ بالا بر صفحه هدف هم‌زمان با تبخیر حلال، مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در اثر قرار گرفتن بسیار بر سطح سیم‌های حاضر چگونگی پرتاب بسیار، بسیار شبیه به سامانه تشکیل الیاف در تارهای تنیده شده عنکبوت است که به همین دلیل و با در نظر داشتن سامانه پرتاب آن را سامانه الکترونیسی سیمی عنکبوتی می‌نامند. در این پژوهش نیز به دلیل امکان صنعتی شدن این فرایند، یک دستگاه نیم‌صنعتی تولید نانوالیاف با این روش، به کار گرفته شد.

تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور مطالعه‌ی فرایند حذف ماده رنگزا از محلول‌های آبی، طیف‌سنجی UV-Vis (Jasco) برای اندازه‌گیری مقادیر جذبی و برای آزمون نهایی عدم حضور کربن آلی، دستگاه TOC Analyzer Shimadzu به کار گرفته شد. همچنین، دستگاه الکترونیسی نیم‌صنعتی برای ساخت نانوالیاف به کار گرفته شد.

به‌طور متوسط دارای قطری کمتر از ۹۰ نانومتر هستند. برای مشخص شدن هرچه بهتر گروه‌های تشکیل دهنده الیاف، تجزیه عنصری انجام شد. همان‌طور که در شکل ۲ نیز مشخص است ماده الکتروریسی شده شامل کربن، اکسیژن و نیتروژن است. از سوی دیگر، این مطلب بیانگر عدم حضور مقادیر قابل توجه ناخالصی در نانوالیاف الکتروریسی شده است. با توجه به هدف پژوهش، برای مقایسه عملکردی نانوالیاف با سامانه‌های ناهمگن و انتخاب کربن اولترا (UAC) برای این مقایسه، تصاویر مربوط به UAC در شکل ۳ نیز گرفته شد که بیانگر سطح متخلخل و به دنبال آن قدرت جذب مناسب این ماده است.



شکل ۱ تصاویر SEM نانوالیاف پلی‌آمید الکتروریسی شده در مقیاس‌های متفاوت

1. Viscoelastic

معادله ۱ به‌دست آمد.

$$DEC\% = ((C_0 - C_t)/C_0) \times 100 \quad (1)$$

که در آن C_0 و C_t به ترتیب غلظت اولیه و غلظت ماده جذب‌شونده در زمان t است.

نتیجه‌ها و بحث

فرایند الکتروریسی

به منظور تهیه نانوالیاف پلی‌آمید از گرانول پلی‌آمید ۶ و فرمیک‌اسید ۹۸ درصد به‌عنوان حلال استفاده شد. محلول به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق هم‌زده و یکنواخت شد. غلظت بسیار در فرایند الکتروریسی از عامل‌های مهم و تعیین‌کننده به‌حساب می‌آید که برپایه مطالعات انجام‌شده بهترین گستره غلظت ۱۵ تا ۲۵٪ معرفی شده است [۲۶ تا ۲۸]. از این میان مقدار ۱۸ درصد وزنی بهترین و مؤثرترین غلظت برای این فرایند است. تصاویر ساختارشناسی نانوالیاف تهیه‌شده نیز گزارش شده است. از مزایای روش به‌کارگرفته شده در این پژوهش، برای الکتروریسی نانوالیاف می‌توان به سرعت مناسب نسبت به سایر روش‌ها و امکان تولید آن در مساحت‌های بالا به‌طور یکنواخت اشاره کرد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) و تجزیه عنصری (EDS)

در این پژوهش برای مشخص شدن هرچه بهتر ریخت‌شناسی سطح نمونه، میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی به‌کارگرفته شد. که تصاویر ارائه‌شده در شکل ۱ بیانگر نانوالیاف‌های به‌دست آمده با ضخامت مناسب و مقاوم و ریخت یکنواخت سطح فرآورده به‌دست آمده است. در فرایند الکتروریسی تعادل بین نیروهای الکترواستاتیک، کشش سطحی و نیروهای گران‌روکشسان بسیار مهم است که این مسئله بر میانگین قطر الیاف تأثیر مستقیم دارد و همان‌گونه که در شکل مشخص است، الیاف به‌دست آمده

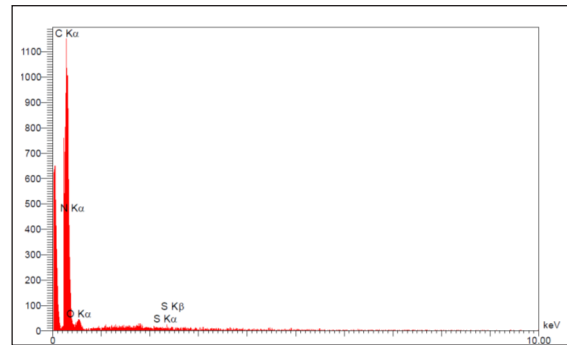
گرم از نانوالیاف الکتروریسی شده، بیانگر توان یالای آن در جذب ماده آلاینده در فرایندهای جذب سطحی است. میکروسکوپ نیروی اتمی، تصاویر سه‌بعدی از سطح را در اختیار قرار می‌دهد و از آن به‌عنوان یک فناوری مفید برای بررسی توپوگرافی سطح و زبری سطح جاذب‌ها استفاده می‌شود. شکل ۵ تصاویر به‌دست آمده برای نانوالیاف پلی‌آمید الکتروریسی شده با زبری ۱۲۵ نانومتر است. افزون به راین، حضور یک گستردگی در مقادیر زبری برای نانوالیاف مشاهده می‌شود که این گستردگی می‌تواند به دلیل تشکیل لایه متراکم و نایکنواخت بر سطح نانوالیاف یا به هم چسبیدن نانوالیاف باشد. تصاویر توپوگرافی الیاف بیان‌کننده زبری مناسب و توزیع یکنواخت آن بوده که براساس مراجع، این ماده قابلیت استفاده به‌عنوان جاذب را با در نظر گرفتن سطح متخلخل با پستی بلندی‌های مشخص شده در تصاویر دارد [۳۲].

بررسی پایداری ماده رنگزا

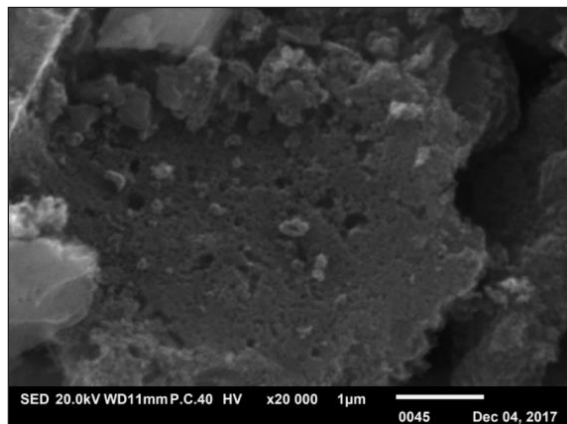
در ابتدا برای شناخت هرچه بهتر ویژگی ماده آلاینده، بررسی‌های اولیه بر ماده رنگزای انتخاب‌شده انجام گرفت. برای بررسی پایداری محیطی خود ماده رنگزا در شرایط طبیعی، یک نمونه محلول رنگزا با غلظت (20 mg.l^{-1}) تهیه و به مدت دو ماه در برابر نور محیط آزمایشگاهی قرار داده شد. نتایج به‌دست آمده حاکی از کاهش مقدار جذب در حدود ۱۸ درصد پس از دو ماه است. همچنین، محلول رنگزا تحت تأثیر محلول‌های اسید و باز ($\text{pH} > 11$) قرار گرفت. نتایج نشان داد، این ماده رنگزا در گستره pH بین ۱ تا ۱۱ از ثبات خوبی برخوردار بوده است. پس از انجام این بررسی‌ها، ساخت الیاف از بسیار انتخاب‌شده به روش الکتروریسی و مطالعات بر ویژگی و همچنین، قدرت عملکرد آن در حذف مواد رنگزا مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی عامل‌های مؤثر بر فرایند جذب

برای بررسی فرایند جذب ماده رنگزا با استفاده از بسیار الکتروریسی شده عوامل مؤثر در فرایند جذب برای به‌دست آوردن شرایط بهینه و پایدار مورد بررسی قرار گرفت.



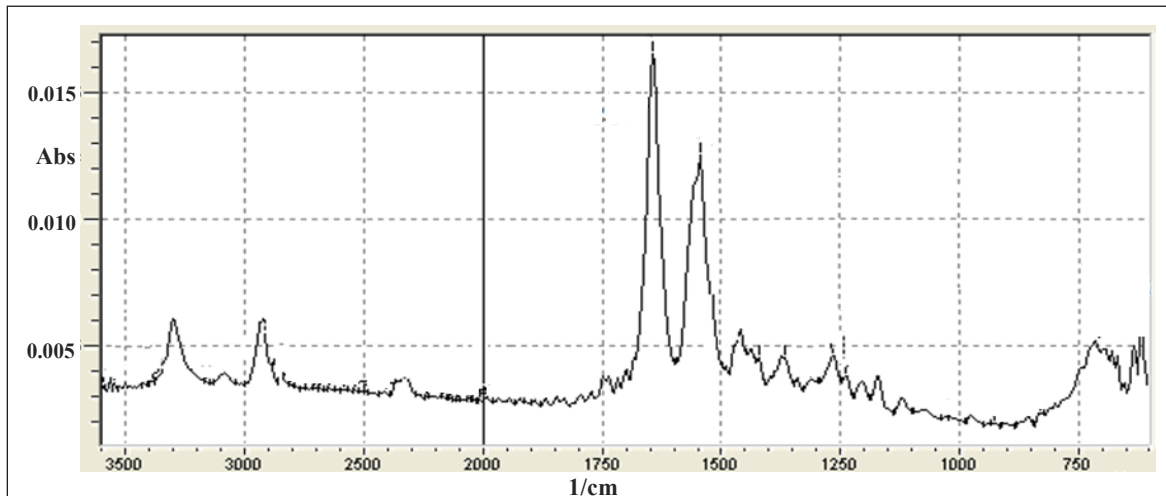
شکل ۲ آنالیز عنصری نانوالیاف پلی‌آمید



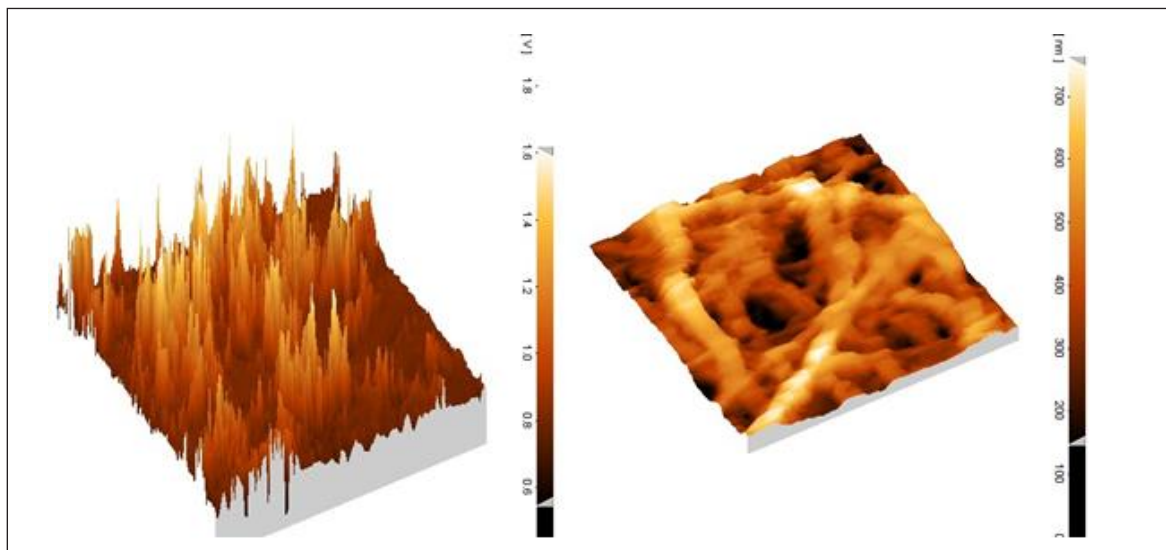
شکل ۳ تصویر SEM سطح ذرات کربن اولترا

بررسی طیف FTIR، آزمون BET و توپوگرافی سطح نانوالیاف با AFM

برای شناسایی هرچه بهتر گروه‌های عاملی موجود در بسیار الکتروریسی شده و تأیید ثبات ساختار و عدم تغییر آن در حضور حلال یا در حین فرایند الکتروریسی، طیف FTIR نمونه گرفته شد (شکل ۴). در این طیف نوارهای جذبی ناشی از C-N، C-H و C=O به‌طور کامل مشخص است. همچنین نوارهای جذبی در نواحی 1700 cm^{-1} ، 1100 cm^{-1} و 3256 cm^{-1} به‌ترتیب بیانگر ارتعاشات C-C، C-N و N-H در ساختار ماده است [۲۹ تا ۳۱]. از آزمون BET برای محاسبه سطح ویژه مواد جاذب سطحی استفاده شد. برای نمونه الکتروریسی شده مقدار سطح ویژه $51 \text{ m}^2/\text{g}$ اندازه‌گیری شد. سطح ویژه اندازه‌گیری شده برای هر



شکل ۴ طیف FTIR نانوالیاف پلی آمید



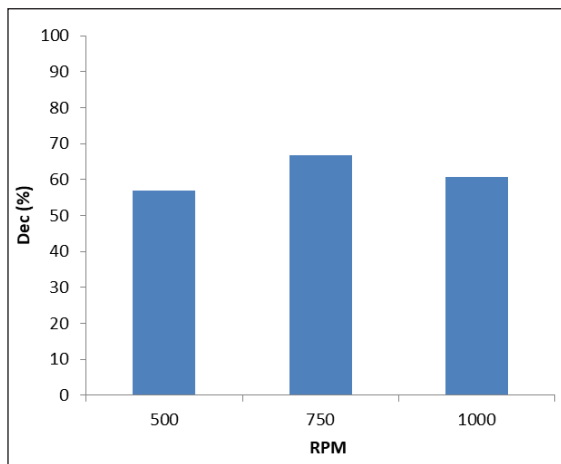
شکل ۵ توپوگرافی سطح نانوالیاف پلی آمید

مواد رنگزا مورد بررسی قرار گرفت. همان گونه که پیش بینی می شد با توجه به مقاومت خوب نانوالیاف در گستره های اسیدی، جایی که یون های H^+ بیشتری حضور دارند بازده فرایند نیز بالاتر است. شکل ۶ نیز بیانگر همین مطلب است.

اثر pH

یکی از مهم ترین عامل های تأثیرگذار بر بازده فرایندهای جذب سطحی مقدار pH محلول است. برای این منظور اثر عملکرد مقدار ثابتی از نانوالیاف پلی آمید در pH های متفاوت در حذف

سرعت هم‌زدن محلول رنگی نیز می‌تواند اثر مستقیم بر بازده فرایند داشته باشد. به عبارت دیگر این فرایند می‌تواند تا آنجایی که نقش مزاحم را پیدا نکند باعث افزایش بازده فرایند شود. اما پس از رسیدن به یک نقطه (نقطه بهینه) برهم‌زدن بیش از اندازه، منجر به از بین رفتن نیروهای ضعیف بین مولکولی و پیدایش عمل واجذب می‌شود که می‌تواند مطابق شکل ۸ نه تنها باعث افزایش بازده نشده بلکه نتیجه معکوس به همراه داشته باشد.



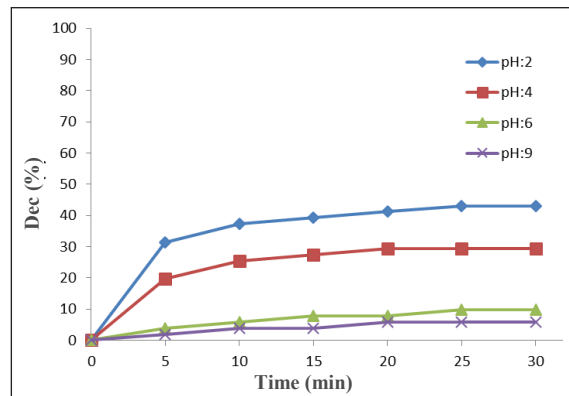
شکل ۸ اثر دور همزن بر بازده فرایند حذف رنگزا با PA

محاسبات سینتیک حذف با PA

به منظور تعیین سینتیک و معادلات هم‌دما حاکم، از رابطه ۲ برای تعیین ظرفیت جذب جاذب استفاده شد.

$$q_e = (C_0 - C_e)V/W \quad (2)$$

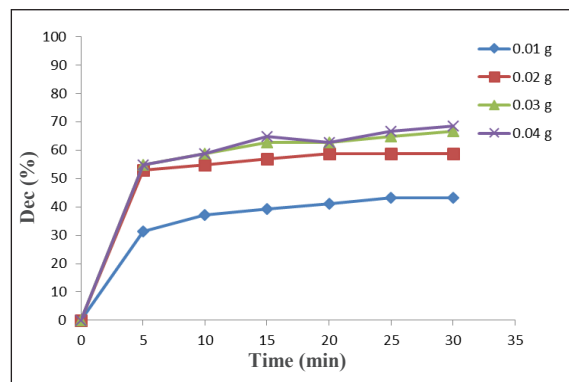
که در آن، q_e مقدار جذب‌شونده به ازای واحد وزن جاذب (میلی‌گرم بر گرم)، C_0 غلظت اولیه آلاینده در محلول (میلی‌گرم بر لیتر)، C_e غلظت تعادلی آلاینده در محلول (میلی‌گرم بر لیتر)، V مقدار حجم محلول (لیتر) و W مقدار وزن جاذب (گرم). سینتیک جذب مسیر انجام واکنش و زمان رسیدن به تعادل را توصیف می‌کند، درحالی‌که تعادل شیمیایی درباره مسیر واکنش و



شکل ۶ اثر pH بر بازده حذف ماده رنگزا با نانوالیاف PA

اثر مقدار جاذب

در فرایندهای رنگبری با جاذب، از آنجایی که با افزایش سطح ویژه جاذب و به دنبال آن مکان‌های جذبی فعال امکان جذب هرچه بیشتر ماده آلاینده تا رسیدن به یک نقطه بهینه وجود دارد، نقش مقدار جاذب نیز بسیار تأثیرگذار است. شکل ۷ روند این تغییرات برای جاذب PA را نشان می‌دهد که در آن با افزایش ظرفیت مکان‌های فعال بازده فرایند نیز افزایش پیدا می‌کند که البته این مقدار تا رسیدن به نقطه بهینه روند صعودی خواهد داشت.



شکل ۷ اثر مقدار جاذب PA بر بازده حذف ماده رنگزا در شرایط بهینه

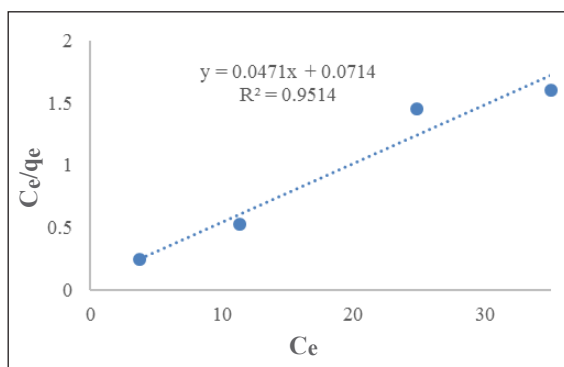
اثر دور همزن

چگونگی برخورد آلاینده با سطح جاذب و به عبارت دیگر

که در آن اگر نمودار t/q_t بر حسب t رسم شود، منحنی مربوط مطابق با سینتیک درجه دو خواهد بود.

جدول ۳ محاسبات سینتیکی درجه دوم برای نانولایف پلی آمید

X	Y(10 ppm)	Y(20 ppm)	Y(30 ppm)
t	t/q_t	t/q_t	t/q_t
۵	۰,۲۱۰۱۵۰۰۴	۰,۱۰۷۶۸۸۸۳	۰,۰۷۳۲۲۷۷۴
۱۰	۰,۴۱۸۴۵۳۴۳	۰,۲۱۴۶۴۹۵۴	۰,۱۴۶۳۴۲۹۶
۱۵	۰,۶۲۶۳۰۴۲۵	۰,۳۲۰۵۳۹۵	۰,۲۱۹۰۰۹۶۶
۲۰	۰,۸۳۳۲۴۵۸۴	۰,۴۲۵۴۶۳۴۸	۰,۲۹۱۱۲۰۲۸
۲۵	۰,۰۳۹۲۸۴۱۶	۰,۵۳۰۰۵۳۴۳	۰,۳۶۳۳۴۵۰۳



شکل ۱۰ نمودار سینتیکی درجه دوم برای نانولایف پلی آمید

در جدول ۴ به طور خلاصه مقدار ضریب همبستگی (R^2) سینتیک‌های درجه یک و دو آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار آن برای سینتیک درجه دو بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد، افزون بر اینکه، درجه ضریب همبستگی سینتیک درجه دوم بسیار مناسب است، ظرفیت جذب تعادلی محاسبه شده با ظرفیت جذب آزمایشگاهی تفاوت بسیار ناچیزی دارد که حاکی از درستی پیروی حذف آلاینده با PA از سینتیک درجه دوم است.

جدول ۴ مقایسه سینتیکی درجه اول و دوم برای نانولایف پلی آمید

غلظت	q_e (Exp) mg/g	درجه اول			درجه دوم		
		q_e (Cal) mg/g	k_1 min ⁻¹	R^2	q_e (Cal) mg/g	k_2 g/mg.min	R^2
۱۰ ppm	۲۴,۰۵۵۰	۴,۹۱۸۱	۰,۲۶۳۴	۰,۷۳۳۱	۲۴,۰۹۶۳	۰,۴۷۸۴	۰,۹۹۸
۲۰ ppm	۴۷,۱۶۵۰	۱۱,۵۷۴۴	۰,۲۴۲	۰,۷۴۴۳	۴۷,۳۹۳۳	۰,۱۴۸۴	۰,۹۸۹۹
۳۰ ppm	۶۸,۸۰۵۱	۱۳,۲۲	۰,۲۶۹۶	۰,۷۲۰۳	۶۸,۹۶۵۵	۰,۱۹۱۱	۰,۹۹۱۷

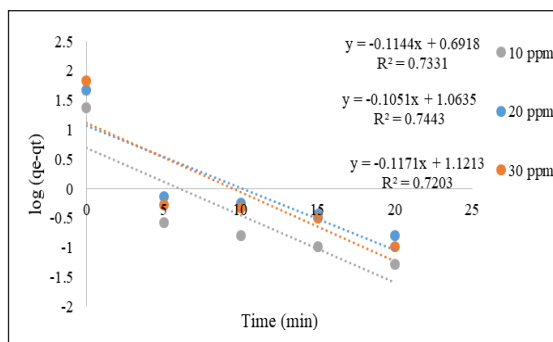
سرعت آن اطلاعاتی نمی‌دهد. به منظور بررسی سازوکار جذب، سینتیک‌های درجه یک و دو در نظر گرفته شدند. برپایه معادله ۳ می‌توان به بررسی خطی سینتیک درجه یک پرداخت.

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - (k_1 t / 2.303) \quad (3)$$

که در آن، q_t مقدار آلاینده جذب شده در زمان t (میلی گرم بر گرم) و k_1 ثابت سرعت تعادل جذب مرتبه اول (min^{-1}) است. اگر نمودار $\log(q_e - q_t)$ بر حسب t رسم شود، منحنی مربوط مطابق با سینتیک درجه یک خواهد بود [۳۳ و ۳۴].

جدول ۲ محاسبات سینتیکی درجه اول برای نانولایف پلی آمید

X	Y(10 ppm)	Y(20 ppm)	Y(30 ppm)
t	$\log(q_e - q_t)$	$\log(q_e - q_t)$	$\log(q_e - q_t)$
۰	۱,۳۸۱۲۰۶	۱,۶۷۳۶۲۰۴	۱,۸۳۷۶۲۱
۵	-۰,۵۸۰۸۷۹	-۰,۱۳۳۷۲۱	-۰,۲۷۹۸۴۹
۱۰	-۰,۸۰۲۷۲۸	-۰,۲۳۸۴۵۷	-۰,۳۲۵۶۰۷
۱۵	-۰,۹۷۸۸۱۹	-۰,۴۳۴۷۵۱	-۰,۵۰۱۶۹۸
۲۰	-۱,۲۷۹۸۴۹	-۰,۸۰۲۷۲۸	-۰,۹۷۸۸۱۹



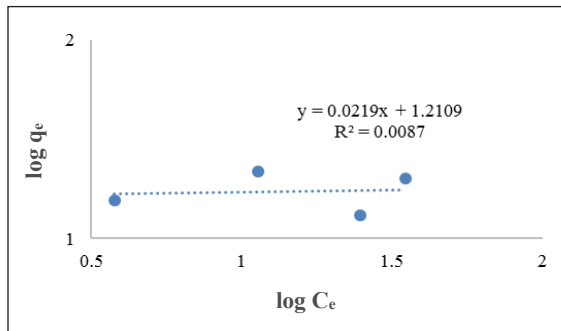
شکل ۹ نمودار سینتیکی درجه اول برای نانولایف پلی آمید

با معادله ۴ می‌توان به بررسی خطی سینتیک درجه دو پرداخت [۳۳ و ۳۴].

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

محاسبات هم‌دما PA

با رسم $\log q_e$ بر حسب $\log C_e$ یک خط با شیب $n/1$ به دست می‌آید. در این رابطه k_f و n ثابت‌های معادله هستند [۳۳ و ۳۴].



شکل ۱۲ نمودار هم‌دما فرندلیچ برای نانوالیاف پلی‌آمید

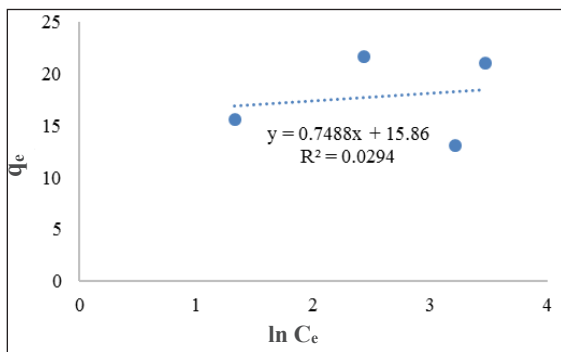
در هم‌دما تمکین، گرمای جذبی همه مولکول‌ها در لایه جذبی با پوشش سطح به صورت خطی کاهش می‌یابد و این به دلیل برهم‌کنش‌های میان مولکول‌هاست.

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln(k_t C_e) \quad (7)$$

$$q_e = B_1 \ln k_t + B_1 \ln C_e \quad (8)$$

$$B_1 = \frac{RT}{b} \quad (9)$$

در این معادله‌ها k_t ثابت جذب تعادلی (لیتر بر میلی‌گرم) و b ثابت جذب است که به گرمای جذب بستگی دارد و واحد آن (ژول بر مول) است. T دما بر حسب کلوین و R ثابت جهانی گاز (ژول بر مول کلوین) است [۳۳ و ۳۴].

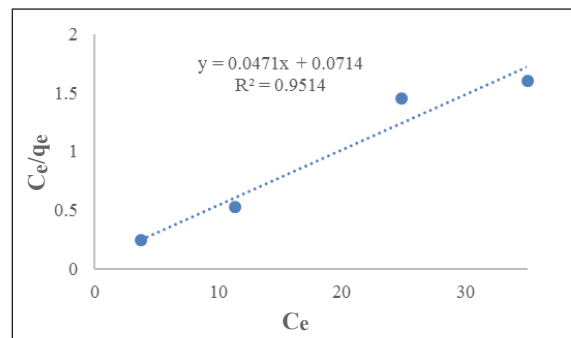


شکل ۱۳ نمودار هم‌دما تمکین برای نانوالیاف پلی‌آمید

مدل‌های جذب لانگمویر، فرندلیچ و تمکین از کاربردی‌ترین مدل‌های جذب به شمار می‌آیند. مدل لانگمویر بر این فرض استوار است که فرایند جذب در مکان‌های مشابهی بر سطح جاذب با توزیع سطح انرژی یکنواخت انجام می‌شود. وقتی آلاینده در یک مکان بر جاذب قرار گرفت، در آن نقطه آلاینده بیشتری جذب نمی‌شود و نتیجه گرفته می‌شود که فرایند جذب در یک تک لایه اتفاق افتاده است که معادله ۵ مدل خطی‌سازی شده هم‌دما لانگمویر را بیان می‌کند.

$$(C_e/q_e) = (1/k_1 q_0) + (C_e/q_0) \quad (5)$$

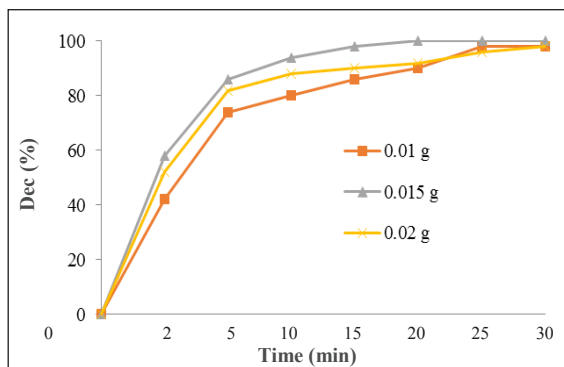
در این معادله q_0 بیش‌ترین جذب (میلی‌گرم بر گرم) و k_1 ضریب جذب (لیتر بر میلی‌گرم) ثابت‌های لانگمویر هستند. این روابط بستگی به ظرفیت جذب و انرژی جذبی دارند با خطی‌سازی می‌توان C_e/q_e را بر حسب C_e رسم کرد [۳۳ و ۳۴].



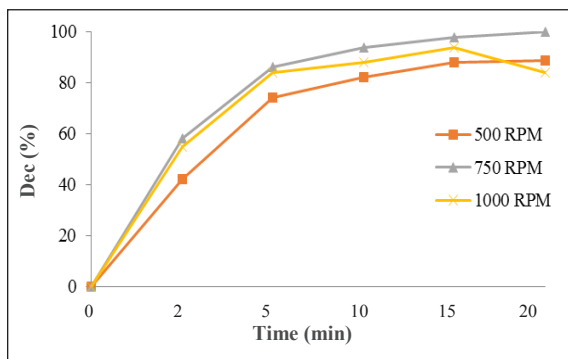
شکل ۱۱ نمودار هم‌دما لانگمویر برای نانوالیاف پلی‌آمید

هم‌دما فرندلیچ برخلاف لانگمویر، بر این فرض بنا شده است که جذب در مکان‌های ناهمگونی با توزیع سطح انرژی غیریکنواخت اتفاق می‌افتد. در واقع فرندلیچ جذب بازگشت‌پذیر را توصیف می‌کند و محدود به تشکیل جذب تک لایه نیست. معادله شماره ۶ این مدل را بیان می‌کند:

$$\log q_e = \log k_f + (1/n) \log C_e \quad (6)$$



شکل ۱۵ اثر مقدار جاذب UAC بر بازده فرایند حذف ماده رنگزای ایندیگوکارمین

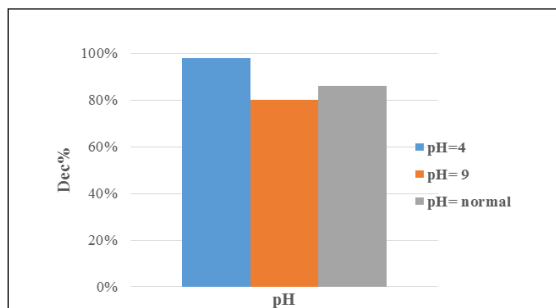


شکل ۱۶ اثر دور هم‌زدن بر بازده فرایند حذف ماده رنگزای ایندیگوکارمین

با مقایسه عملکرد الیاف PA و ذرات UAC این گونه به نظر می‌رسد که سامانه‌های ناهمگن پودری سرعت عملکرد بالاتری دارند، ولی یک مقایسه کلی این دو فرایند نشان می‌دهد که مزایای سامانه‌های نانوالیاف، قدرت انتخاب بیشتری را به‌ویژه در بخش‌های صنعتی با حجم بالاتر پساب‌های رنگی دارد. عدم نیاز به سامانه گریزان، برای جداسازی و همچنین، نمونه‌برداری آسان و عدم خروج جاذب همگی از مؤلفه‌های ایجاد برتری برای این سامانه هستند. از سوی دیگر، نانو الیاف الکترورسی شده توانایی کاربرد در سامانه‌های غشایی را نیز دارد. افزون بر اینکه، در صورت امکان رسیدن الیاف بر بسترهای ثابت مقاوم، امکان تبدیل این سامانه به یک سامانه صنعتی پیوسته نیز به‌وجود خواهد آمد. مقایسه‌ای کلی از این دو سامانه در جدول ۵ آمده است.

مقایسه فرایند نانوالیاف PA با سامانه ناهمگن UAC

در سامانه‌های ناهمگن روند بررسی به دلیل معلق‌بودن ذرات کمی متفاوت است و شاید به نوعی سرعت بالا در کنار سختی نمونه‌برداری را به همراه دارد. اثر تغییرات pH در فرایند رنگبری با UAC در شکل ۱۴ نشان داد که با افزایش pH و افزایش گروه‌های هیدروکسیل از یک سو و همچنین، نزدیک شدن به گستره عدم پایداری ساختار رنگزا و از سوی دیگر، مقدار جذب رنگ کاهش می‌یابد. روند تأثیر مقادیر متخلف جاذب UAC، بیانگر یک افزایش مناسب با افزایش مقدار جاذب تا رسیدن به نقطه بهینه و پس از آن کاهش بازده به دلیل حضور بیش از حد جاذب و امکان ایجاد فرایند واجذبی است. افزایش بازده فرایند با افزایش مقدار جاذب را می‌توان ناشی از افزایش مساحت سطح و دسترسی بیشتر مولکول‌های رنگ به نقاط فعال سطح جاذب دانست، درحالی‌که با افزایش بیش از مقدار بهینه، همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود به دلیل اشباع ماندن بعضی از مکان‌های فعال هدف جاذب، مقدار جذب آلاینده در واحد جرم جاذب کاهش می‌یابد که این موضوع باعث کاهش انتشار داخل ذره‌ای می‌شود. در بررسی اثر دور هم‌زدن در شکل ۱۶ بازده فرایند حذف رنگزا توسط UAC مشخص شد که با بالا رفتن سرعت اختلاط در ابتدا سرعت جذب تا رسیدن به مقدار بهینه افزایش می‌یابد. اما با بالا رفتن سرعت اختلاط بیش از مقدار بهینه، به دلیل جنبش بیشتر ذرات و در نتیجه سست شدن پیوند بین ذرات با سطح جاذب و کاهش احتمال جذب ذرات با جاذب، کاهش یافته و در برخی موارد نیز منجر به جداسدن ذرات جذب‌شده پیشین و در حقیقت واجذبی می‌شود.



شکل ۱۴ اثر pH بر بازده حذف ماده رنگزا با UAC (جاذب ۰/۰۱۵ گرم به ازای لیتر، غلظت ۱۰ ppm و دور هم‌زدن ۷۵۰ rpm)

نشریه پژوهش‌های کاربردی در شیمی (JARC)

جدول ۵ مقایسه کلی سامانه‌های جذبی UAC و نانوالیاف الکترورسی شده برای حذف مواد رنگزای پساب

نمونه	قدرت جذب	در سامانه ناهمگن	سرعت جذب	در بستن ثابت	امکان استفاده	عوامل محیطی	مقاومت در برابر شرایط فرایندی	مقاومت در برابر نمونه برداری	باز یافتنی	نیاز به گریزانه برای استفاده مجدد آب	فرایند حذف	هزینه عملکردی
جاذب UAC	مناسب	بالا	بالا	در فشار بالا	مناسب	مناسب	مناسب	پیچیده	دارد	ندارد	بالا	مناسب
نانوالیاف الکترورسی شده	مناسب	مناسب	مناسب	مناسب	مناسب	مناسب	مناسب	مناسب	مناسب	ندارد	مناسب	مناسب

نتیجه‌گیری

عملکرد الیاف PA و ذرات UAC مشخص شد که سامانه‌های ناهمگن پودری سرعت عملکرد بالاتری دارند. این در شرایطی است که در مقابل، سامانه‌های نانوالیاف، قدرت انتخاب بیشتری را به‌ویژه در بخش‌های صنعتی با حجم بالاتر پساب‌های رنگی دارند و به دلیل عدم نیاز به سامانه گریزانه، برای جداسازی و همچنین نمونه‌برداری آسان و عدم خروج جاذب همگی از مؤلفه‌های ایجاد برتری برای این سامانه هستند. از سوی دیگر، نانو الیاف الکترورسی شده توانایی کاربرد در سامانه‌های غشایی را نیز دارند که هم قابلیت جذبی بالایی دارد و هم با توجه به وجود این سامانه نیم‌صنعتی الکترورسی، امکان افزایش بازده با اصلاح سطح آن میسر خواهد بود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی انجام شده است. نویسندگان ضمن تشکر از این مرکز (CISSC)، از همکاری‌های علمی دانشگاه هاوت آژاس فرانسه نیز قدردانی می‌کنند.

در این پژوهش، نانوالیاف پلی‌آمید تحت میدان ولتاژ بالا با سامانه نیم‌صنعتی الکترورسی سیمی عنکبوتی (WSES) برای جذب ماده رنگزا به‌کارگرفته شدند. نانوالیاف الکترورسی شده با روش‌های آنالیزی FTIR، BET، EDX، FESEM و AFM شناسایی شدند. نتیجه‌ها حاکی از الیاف به‌دست آمده با قطری کمتر از ۹۰ نانومتر هستند که مقدار سطح مؤثری برابر با $51 \text{ m}^2/\text{g}$ دارند. با بهینه‌سازی عامل‌های فرایندی، بیش‌ترین بازده جذب در نقاط 0.04 گرم پلی‌آمید، pH برابر با ۲ و دور هم‌زن 750 rpm به‌دست آمد. در ادامه، مطالعات سینتیکی و هم‌دمای نانوالیاف در فرایند جذب موردبررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد، ظرفیت جذب تعادلی محاسبه‌شده با ظرفیت جذب آزمایشگاهی در سینتیک درجه دوم معادل یکدیگر است و این فرایند با هم‌دما لانگمویر مطابقت دارد. همچنین، مقایسه سامانه ناهمگن کربن فعال اولترا با سامانه نانوالیاف انجام شد که کربن اولترا با مقدار 0.15 گرم در pH برابر با ۴ و دور هم‌زن 750 rpm بیش‌ترین جذب را نشان داد. در یک مقایسه کلی

مراجع

- [1] Molinos, S.M.; Gómez, T.; Garrido, B.M.; Caballero, R.; Sala, G.R.; Sci. Total Environ. 497, 607–617, 2014.
- [2] Shehzadi, M.; Afzal, M.; Khan, M. U.; Islam, E.; Mobin, A.; Anwar, S.; Khan, Q.M.; Water Res. 58, 152–159, 2014.
- [3] Cooney, D.O.; “Adsorption design for wastewater treatment”, CRC Pres INC, Boca Raton Florida, USA, 1999.
- [4] Mohammadzadeh, S.; Olya, M.E.; Arabi,

- A.M.; Shariati, A.; Khosravi Nikou, M.R.; J. Environ. Sci. 35, 194–207, 2015.
- [5] Olya, M.E.; Orient. J. Chem. 32, 1453–1463, 2016.
- [6] Akhi, Y.; Irani, M.; Olya, M.E.; J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 63, 327–335, 2016.
- [7] Bai, Y.Y.; Wang, F.R.; Liu, J.K.; Ind. Eng. Chem. Res. 55, 9873–9879, 2016.
- [8] Sakhaei, F.; Salahi, E.; Olya, M.E.; Mobasherpour, I.; Res. Chem. Intermed. 43, 4063–4078, 2017.
- [9] Worch, E.; “Adsorption technology in water treatment: fundamentals, processes, and modeling”, Walter de Gruyter, Germany, 2012.
- [10] Llagostera, I.; Cervantes, D.; Sanmartí, N.; Romero, J.; Pérez, M.; Bull. Environ. Contam. Toxicol. 97, 374–379, 2016.
- [11] Liu, Q.; Yang, B.; Zhang, L.; Huang, R.; Int. J. Biol. Macromol. 72, 1129–1135, 2015.
- [12] Ravulapalli, S.; Kunta, R.; J. Environ. Chem. Eng. 6, 4298–4309, 2018.
- [13] Singh, N.B.; Nagpal, G.; Agrawal, S.; Environ. Technol. Innov. 11, 187–240, 2018.
- [14] Li, Y. K.; Yang, T.; Chen, M.L.; Wang, J.H.; Talanta 180, 18–24, 2018.
- [15] Spahis, N.; Addoun, A.; Mahmoudi, H.; Ghaffour, N.; Desalination 222, 519–527, 2008.
- [16] Bansal, R.C.; Donnet, J.B.; Stoeckli, F.; “Active Carbon” New York, 1988.
- [17] Jüntgen, H.; Carbon 15 (5), 273–283, 1977.
- [18] De Souza, T.N.V.; de Carvalho, S.M.L.; Vieira, M.G.A.; da Silva, M.G.C.; Brasil, D.D.S. B.; Appl. Surf. Sci. 448, 662–670, 2018.
- [19] Vandarkuzhali, S.A.A.; Karthikeyan, S.; Viswanathan, B.; Pachamuthu, M.P.; Surfaces and Interfaces 13, 101–111, 2018.
- [20] Awual, M.R.; Hasan, M.M.; Khaleque, M.A.; Sheikh, M.C.; Chem. Eng. J. 288, 368–376, 2016.
- [21] Mokhtari-Shourijeh, Z.; Montazerghaem, L.; Olya, M. E.; J. Polym. Environ. 26, 3550–3563, 2018.
- [22] Olya, M.E.; Montazerghaema, L.; Naeimi, A.; Desalination and Water Treatment 67, 318–323, 2017.
- [23] Mahmoodi, N.M.; Masrouri, O.; Najafi, F.; Fibers Polym. 15, 1656–1668, 2014.
- [24] Huang, Y.; Xu, Y.; He, Q.; Cao, Y.; Du, B.; Water Environ. Res. 86, 20–27, 2014.
- [25] Gupta, V.K.; Tyagi, I.; Agarwal, S.; Sadegh, H.; Shahryari-ghoshekandi, R.; Yari, M.; Yousefi-nejat, O.; J. Mol. Liq. 206, 129–136, 2015.
- [26] Mitthupatham, C.; Nithitanakul, M.; Supaphol, P.; Macromol. Chem. Phys. 205, 2327–2338, 2004.
- [27] Hekmati, A.H.; Rashidi, A.; Ghazisaeidi, R.; Drean, J.Y.; Text. Res. J. 83, 1452–1466, 2013.
- [28] Neo, Y.P.; Ray, S.; Eastal, A.J.; Nikolaidis, M. G.; Quek, S.Y.; J. Food Eng. 109, 645–651, 2012.
- [29] Zarshenas, K.; Raisi, A.; Aroujalian, A.; RSC Adv. 5, 19760–19772, 2015.
- [30] Parvinzadeh Gashti, M.; Almasian, A.; Compos. Part B Eng. 45, 282–289, 2013.
- [31] Ko, Y.G.; Choi, U.S.; Park, Y.S.; Woo, J.W.; J. Polym. Sci. Part A Polym. Chem. 42, 2010–2018, 2004.
- [32] Crini, G.; Badot, P.M.; Prog. Polym. Sci. 33, 399–447, 2008.
- [33] Mahmoodi, N.M.; Banijamali, M.; Noroozi, B.S.; Fibers Polym. 15, 1616–1626, 2014.
- [34] Samadani Langeroodi, N.; Tahery, F.; Mehriani, S.; Nov. Biol. Reper. 2, 166–175, 2015.

Influence of key operating parameters on the organic pollutants adsorption process by electrospun polyamide nanofibers via WSES method; comparison of performance with ultra-carbon heterogeneous systems

Mohammad Ebrahim Olya^{1*}, John Ev Dreen², Maedeh Vafae³, Amir Houshang Hekmai⁴, Abdolkarim Sharifi⁵, Omar Harzallah⁶

1. Associate Prof. of chemical engineering, Environmental Research Department, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran
2. Prof. of textile engineering, Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT), Université de Haute-Alsace, Mulhouse, France
3. Ph.D. Student of color engineering, Environmental Research Department, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran
4. Assistant Prof. of textile engineering, Department of Art and Architecture, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran
5. M.Sc. of chemical engineering, Environmental Research Department, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran
6. Associate Prof. of textile engineering, Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT), Université de Haute-Alsace, Mulhouse, France

Received: November 2018, Revised: February 2019, Accepted: March 2019

Abstract: In the present research, because of hazardous effect of dyeing and textile industries wastewaters and importance of the organic pollutants elimination, polymeric nanofibers (polyamide) were obtained under high-voltage field by a spider wired semi-industrial electrospinning system (WSES). Electrospun nanofibers were characterized by FESEM, EDX, BET, FTIR, and AFM analysis methods. The optimum conditions of dye adsorption using the fibers were achieved at 0.04 g of polyamide, pH=2 and 750 rpm. The results also showed that the calculated equilibrium adsorption capacity corresponds to the absorption capacity via the second-order kinetics, and this process follows Langmuir isotherm. To have a comparison with heterogeneous systems, optimum condition of the ultra-carbon heterogeneous system as a suitable process was evaluated (0.015 g of ultra-carbon at pH = 4 and 750 rpm). Finally, advantages and disadvantages of the processes were compared in order to have an applicable system for scale up the laboratory process to a pilot system.

Keywords: Nanofibers, WSES method, Heterogeneous adsorption system, Wastewater organic pollutants