

استفاده از آئروژل‌های نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده با فتالیمید برای جذب ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون

سیما سپهوند^۱، مهدی جنوبی^{۲*}، علیرضا عشوری^۳

۱. دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. استاد پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۳۱

چکیده

هدف این پژوهش، ساخت فیلترهای نانویی برای جذب ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون موجود در هوا با استفاده از نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده با فتالیمید است. اصلاح نانوالیاف سلولز با فتالیمید در اسید استیک با نسبت نانوالیاف سلولز به فتالیمید ۱:۰/۵، ۱:۱ و ۱:۱/۵ درصد وزنی انجام گرفت. بررسی توسط آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در اثر اصلاح هیچ تغییر معنی‌داری در ابعاد و ساختار نانوالیاف سلولز ایجاد نمی‌شود، اما با افزایش مقدار فتالیمید سطح ویژه افزایش می‌یابد، درحالی که تخلخل و قطر منافذ کاهش می‌یابد. همچنین نتایج تأثیر درجه حرارت بر میزان جذب ذرات معلق نشان داد که بیشترین جذب ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون مربوط به نانوالیاف سلولزی اصلاح‌شده با فتالیمید ۱/۵ درصد و دمای ۶۵ درجه سلسیوس (۷۶ درصد) بود. اما جذب ذرات معلق بزرگ‌تر از ۲/۵ میکرون برای همه نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف سلولزی خالص و اصلاح‌شده به‌طور جزئی افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: اصلاح شیمیایی، جذب ذرات معلق ۲/۵ میکرون، فتالیمید، نانوالیاف سلولز.

مقدمه

هوا استفاده می‌شود که بزرگ‌تر از مولکول‌های مجزا (مولکول‌هایی با قطر تقریباً ۱ نانومتر) و کوچک‌تر از ۵۰۰ میکرومتر هستند. مواجهه مزمن با ذرات معلق هوا، سبب بیماری‌های قلبی-عروقی، کاهش مقاومت سیستم ایمنی بدن در مقابل بیماری‌ها، از بین رفتن بافت ریه، آسم کودکان، مرگ‌ومیر زودرس و سرطان ریه می‌شود. ذرات معلق هوا به‌طور جدی بر کیفیت هوا، دید و اکوسیستم‌ها تأثیر می‌گذارند [۲، ۳]. ذرات معلق هم از نظر جنس و هم از نظر اندازه بسیار متنوع‌اند. ولی با توجه به اندازه آنها به سه نوع درشت (PM_{10})، ریز ($PM_{2.5}$) و بسیار ریز ($PM_{0.1}$) تقسیم می‌شوند [۴]. قطر ذرات معلق $PM_{2.5}$ ۲/۵ میکرون یا کمتر

هوا یکی از پنج عنصر (هوا، آب، غذا، گرما و نور) ضروری برای ادامه حیات انسان است. با گسترش شهرها و افزایش منابع آلاینده و با توجه به خطرهای این آلودگی‌ها برای ساکنان این مناطق، شناخت و آگاهی درباره جوانب مختلف این مسئله از اهمیت بسزایی برخوردار است [۱]. به‌طوری که امروزه یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی در ایران مشکل آلودگی هوا (PM^1) اصطلاحی است که برای توصیف ذرات جامد و مایع پراکنده‌شده در

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۶۳۲۲۴۹۳۱۱

Email: mehdi.jonoobi@ut.ac.ir

1. Particulate Matter

محدوده میکرومتر است. ویژگی‌های این نانومواد از جمله نسبت سطح به حجم، ضریب لاغری زیاد، دانسیته کم، سهولت دسترسی، قیمت مناسب، تجزیه پذیری در طبیعت توسط آنزیم‌های میکروبی یا قارچی، غیرسمی بودن و کاهش مصرف انرژی سبب شده است که به‌عنوان ماده خام بالقوه در تولید فیلترهای هوا استفاده شوند [۱۰-۱۲].

ژنگ^۳ و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر دما در محدوده ۲۵-۴۰۰ درجه سلسیوس در فیلترهای هوای ساخته شده از نانوالیاف پلی‌آمید بر جذب ذرات معلق ۲/۵ میکرون را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش دما (از ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس) جذب ذرات معلق افزایش می‌یابد، اما بعد از ۱۰۰ درجه سلسیوس، مقدار جذب ذرات ثابت می‌ماند [۱۳]. سوزنده و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی عوامل محیطی (دما و رطوبت) در نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف پروتئین ژلاتین به این نتیجه رسیدند که با افزایش رطوبت، جذب ذرات معلق هوای کمتر از ۱۰ میکرون به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش رطوبت از ۲۵ به ۹۵ درصد، مقدار جذب از ۷۰ به ۸۰ درصد افزایش یافت، اما افزایش دما از ۲۵ به ۴۵ درجه سلسیوس تأثیر معنی‌داری بر میزان جذب نداشت. آنها بیان کردند که این موضوع ممکن است به دلیل کوچک بودن محدوده دمایی انتخاب شده باشد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که تغییر شرایط محیطی تأثیری بر قطر لیاف و ساختار منافذ نانوفیلترهای نداشت [۹]. سپهوند و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیق درباره استفاده از نانوالیاف سلولزی اصلاح شده با فتالیمید برای جذب دی‌اکسید کربن به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار فتالیمید و افزایش عوامل محیطی، جذب دی‌اکسید کربن افزایش می‌یابد [۱۴]. هدف این پژوهش، ساخت نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف سلولزی اصلاح شده با فتالیمید با استفاده از روش خشک‌کن انجمادی^۴ و نیز بررسی تأثیر دما بر مقدار جذب ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون بوده است.

(یک صدم موی انسان) است. این ذرات آنقدر کوچک‌اند که حتی به کوچک‌ترین مجاری ریه‌ها نفوذ می‌کنند. این ذرات شامل مواد غیرآلی (SiO_2 ، SO_4^{2-} و NO_3^-) و آلی مانند کربن آلی و عناصر کربنی هستند. منابع انتشار این ذرات، فعالیت‌های احتراقی (وسایل نقلیه موتوری، نیروگاهی، سوزاندن چوب و غیره) و فرایندهای صنعتی خاص و گردوغبار است. این ذرات هم به‌طور مستقیم ساطع می‌شوند و هم به‌شکل آلاینده ثانویه در جو شکل می‌گیرند [۴].

یکی از راه‌های شناخته شده و اقتصادی کاهش آلودگی هوا استفاده از فیلترهای هواساز [۵]. امروزه استفاده از فیلترهای حاوی پلیمرهای آلی متخلخل رواج یافته است [۶]، زیرا برخی از پلیمرهای آلی متخلخل به‌علت سطح ویژه زیاد، چگالی کم، و ثبات عالی در برابر حرارت، مواد شیمیایی و آب توجه زیادی را برای ساخت فیلترهای هوا به‌منظور جذب ذرات معلق به خود جلب کرده‌اند [۷]. در دهه اخیر، از فیلترهایی با غشای فیبر ناپخته^۱ پلیمرهای ترموپلاستیک مانند پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، لیاف شیشه، پوشال یا حصیر که پس از فشرده شدن ساخته می‌شوند، اغلب برای جذب ذرات معلق موجود در هوا استفاده می‌شوند. اما معایب این نوع فیلترها، ضخامت و قطر زیاد لیاف (قطر لیاف بین ۰/۵ تا ۲ میکرون)، ناتوانی در جذب و مسدودسازی ذرات بسیار ریز (کمتر از ۰/۵ میکرون)، منافذ بزرگ و تخلخل کمتر، مصرف انرژی زیاد، نفوذپذیری کم و وزن پایه زیاد است [۸]. افزون‌بر این، آنها زیست‌تخریب‌پذیر نیستند، یعنی به‌طور طبیعی تخریب نمی‌شوند که این ویژگی سبب آلودگی بیشتر محیط زیست پس از دفع می‌شود [۹]. در سال‌های اخیر، بیشتر پژوهش‌ها معطوف به استفاده از نانوالیاف سلولزی^۲ به‌جای لیاف مصنوعی مثل نانوالیاف شیشه و کربن برای ساخت محصولات سازگار با محیط زیست، بوده است. نانوالیاف سلولزی از نانوذراتی هستند که مزایای زیادی همچون ضخامت حدود ۱۰۰-۱۰ نانومتر دارند و طول آنها در

3. Zhang
4. Freeze-Drying

1. Nonwoven Fiber Membrane
2. Cellulose NanoFibers

مواد و روش‌ها

مواد

نانوالیاف سلولز استفاده‌شده در این تحقیق با غلظت ۲/۲ درصد وزن خشک از دانشگاه صنعتی لوزل در سوئد تهیه شد. فتالیمید (۳,۱-دی‌هیدرو-۳,۱-دی‌اکسی ایزو ایندول برای اصلاح سطحی نانوالیاف سلولز از شرکت مرک آلمان تهیه شد. همچنین از اسید استیک با خلوص ۹۹/۵ درصد از شرکت سیگما آلد ریچ آمریکا و آب مقطر برای حل کردن فتالیمید استفاده شد.

اصلاح سطحی نانوالیاف سلولز

ابتدا پودر فتالیمید با نسبت ۰,۵/۱ و ۱/۵ درصد وزنی با آب و اسید استیک با نسبت ۹۶ به ۴ درصد حجمی به ترتیب تهیه شد. از آنجا که فتالیمید بسیار حساس به حرارت مستقیم است، برای حل شدن، درون روغن گلیسرول و تحت شرایط دمایی ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت روی هیتر قرار گرفت. سپس ژل نانوالیاف سلولز با غلظت ۱ درصد وزنی، در دمای اتاق به مدت ۳ ساعت در همزن مغناطیسی با سرعت ۴۸۰ دور بر دقیقه آماده شد. محلول فتالیمید به ژل نانوالیاف سلولز در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت تحت همزن مغناطیسی با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه تهیه شد.

pH محلول تحت همزنی مداوم (با سرعت ۴۰۰ دور بر دقیقه) با استفاده از هیدروکسید کلسیم روی ۴ تنظیم شد.

ساخت و خشک کردن آئروژل‌ها (نانوفیلترها)

یک لوله تفلونی از جنس PTFE^۱ با قطر ۳۰ میلی‌متر روی سطح عرضی یک استوانه مسی با قطر ۴۰ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر ثابت شد. استوانه مسی تا یک سوم ارتفاع آن در نیتروژن مایع در دمای ۱۹۶- درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس محلول‌های آماده‌شده (فتالیمید و نانوالیاف سلولز) به حجم ۱۵ سی‌سی داخل لوله تفلونی ریخته شد. با انتقال آرام سرما به وسیله استوانه مسی، مخلوط‌ها به تدریج از کف به سطح منجمد شدند. نمونه‌های منجمدشده توسط خشک‌کن انجمادی (ALPHA 1-4 LD CHRIST) در شرایط دمای ۵۷- درجه سلسیوس، خلأ ۰/۱ میلی‌بار و زمان ۴۸ ساعت برای خشک‌شدن کامل نمونه‌ها قرار گرفتند. در جدول ۱ کدگذاری نمونه‌ها نشان داده شده است. از نانوفیلترهای ساخته‌شده از نانوالیاف سلولز خالص و اصلاح‌شده با فتالیمید به منظور اندازه‌گیری خصوصیات مورفولوژیکی سطح و جذب ذرات معلق استفاده شد.

جدول ۱. کدگذاری نمونه‌ها

کد نمونه‌ها	توضیحات
HEPA ^۲	فیلتر شاهد
CNF	نانوالیاف سلولز خالص ۱ درصد
CNF-Ph (1: 0.5)	نانوالیاف سلولز + ۰/۵ درصد فتالیمید
CNF-Ph (1: 1.0)	نانوالیاف سلولز + ۱/۰ درصد فتالیمید
CNF-Ph (1: 1.5)	نانوالیاف سلولز + ۱/۵ درصد فتالیمید

1. Poly Tetra Fluoro Ethylene
2. High Efficiency Particulate Air

روش‌ها

C_d : غلظت ذرات جذب‌شده؛ C_{II} : غلظت کل ذرات

ورودی.

بررسی خواص فیزیکی و ساختاری

ریخت‌شناسی (مورفولوژی) آئروژل‌های نانوالیاف سلولز خالص و اصلاح‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Phenom Prox (هلند) با ولتاژ ۱۰ کیلووات بررسی شد. در آماده‌سازی نمونه‌ها برای تصویربرداری از سطح، ابتدا نمونه‌ها با چسب‌های نواری دوطرف رسانا روی پایه نقره‌ای چسبانده شدند و با دستگاه پوشش‌دهنده به مدت ۱۰ دقیقه با طلا به ضخامت ۱۵ نانومتر پوشش داده شدند. درباره دیگر خواص فیزیکی مانند دانسیته، تخلخل، سطح ویژه و قطر منافذ نانوفیلترها با توجه به نتایج گزارش‌شده قبلی [۱۴] بحث خواهد شد.

آزمون پتانسیل زتا^۱

برای بررسی بار سطحی نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده و خالص از روش بار پتانسیل زتا استفاده شد. بدین منظور از دستگاه Zetasizer nanoseries شرکت Malvernpanalytical استفاده شد. ابتدا یک قطره از سوسپانسیون هر نمونه با حجم ۲ سی‌سی آب مقطر مخلوط و رقیق شده و برای جداسازی ذرات به هم‌چسبیده، مخلوط حاصل با دستگاه فراصوت تیمار شد. سپس مخلوط آماده‌شده از هر نمونه درون سل اسپکتروفوتومتر (بکمن آمریکا) به مدت ۱۲۰ ثانیه و زاویه ۹۰ درجه در معرض گاز هلیوم-نئون (۵ میلی‌ولت) قرار گرفت.

آزمون جذب ذرات معلق هوا نانوفیلترها

برای ارزیابی جذب ذرات معلق هوا نانوفیلترهای هوا حاصل از نانوالیاف سلولزی خالص و اصلاح‌شده، از کپسول حاوی ذرات معلق هوا که به شماره‌دهنده ذرات ۲- ID2981-Lighthouse (آمریکا) متصل بود، استفاده شد. بازده جذب ذرات معلق (η) به‌طور تجربی براساس غلظت ورودی و خروجی ذرات مطابق معادله ۱ محاسبه شد [۱۵].

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{C_d}{C_{II}}\right) \times 100 \quad (1)$$

آزمون تغییر دما نانوفیلترها

یکی از عوامل محیطی تأثیرگذار بر مقدار جذب ذرات معلق تغییر دماست. بدین منظور برای بررسی این عامل از ترمومتر ترموکوپل مدل TK 110-112 متصل به منبع حرارت (هیتر) به منظور به‌دست آوردن دماهای مختلف استفاده شد. سپس نمونه آماده‌شده برای ارزیابی جذب ذرات در دستگاه آزمون جذب ذرات معلق که مجهز به حسگر اندازه‌گیری دما بود استفاده شد.

تجزیه و تحلیل آماری

برای بررسی آماری داده‌ها از برنامه آماری SPSS (نسخه ۲۰) استفاده شد. نتایج در قالب طرح کاملاً تصادفی به کمک روش تجزیه واریانس (ANOVA) تجزیه و تحلیل شد. مقایسه میانگین‌ها در سطح اطمینان آماری ۹۵ درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن استفاده شد.

نتایج و بحث

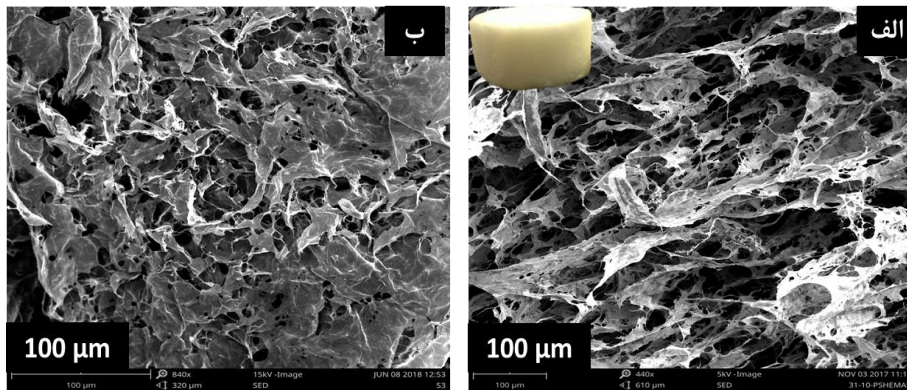
خصوصیات مورفولوژی

خصوصیات مورفولوژی آئروژل‌های نانوالیاف سلولز خالص و اصلاح‌شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۱ الف، سطح نانوالیاف سلولز خالص را نشان می‌دهد. این سطح دارای شبکه سلولزی یکپارچه‌ای است که نانوالیاف سلولز از طریق پیوند هیدروژنی که بین خودشان وجود دارد به هم‌دیگر متصل شده‌اند تا یک شبکه سه‌بعدی ایجاد شود. همچنین مشاهده می‌شود که نانوالیاف سلولز خالص دارای ماتریس متخلخلی است که قطر منافذ در آنها بزرگ‌تر دیده می‌شود. شکل ۱ ب، مورفولوژی سطح نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده با فتالیمید را نشان می‌دهد. فتالیمید درون زنجیره نانوالیاف سلولزی قرار می‌گیرد و سبب ایجاد ساختاری صفحه‌ای^۳ می‌شود که افزایش سطح

1. Zeta potential (ZP)
2. Particulate counter

فیلترهای هوا هستند [۱۹]. نتایج تجزیه واریانس [۱۴] نشان داد که تأثیر غلظت فتالیمید بر دانسیته، تخلخل، سطح ویژه و قطر منافذ آئروژل‌ها در سطح اطمینان آماری ۹۵ درصد معنی‌دار بوده است، به طوری که با افزایش غلظت فتالیمید در نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده نسبت به خالص سطح ویژه افزایش یافت که این افزایش به دلیل افزایش دانسیته و حضور فتالیمید بوده است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش غلظت فتالیمید در آئروژل‌های اصلاح‌شده قطر منافذ کاهش یافت که دلیل آن، دانسیته زیاد است که موجب فشردگی و متراکم‌تر شدن آئروژل‌ها می‌شود [۱۴].

ویژه و کاهش خلل و فرج و قطر منافذ را در پی دارد [۱۶]. با افزایش غلظت فتالیمید در نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده با فتالیمید با دانسیته‌های مختلف (۰/۰۱۰۵، ۰/۰۱۱۲، ۰/۰۱۳۸ و ۰/۰۱۶۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، سطح ویژه و حجم منافذ افزایش یافت، در حالی که تخلخل و قطر منافذ کاهش یافت (شکل ۱). غلظت از عواملی است که بر میزان تخلخل و دانسیته تأثیر می‌گذارد، به طوری که با افزایش غلظت، ساختار متراکم‌تر و فشرده‌تر می‌شود که افزایش دانسیته و کاهش تخلخل را در پی دارد [۱۷، ۱۸]. سطح ویژه، قطر منافذ و تخلخل سه پارامتر مهم در میزان جذب ذرات، کیفیت و افت فشار

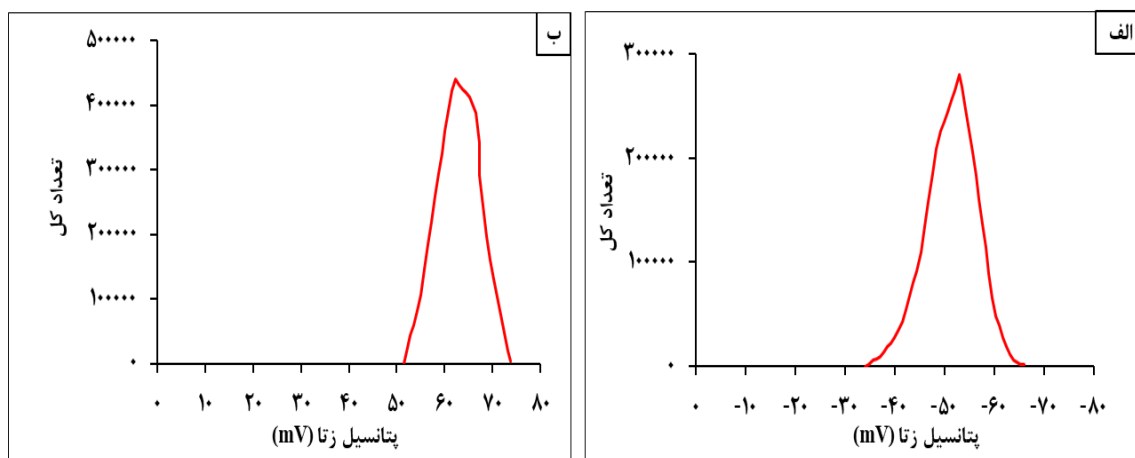


شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از آئروژل‌های ساخته‌شده با (الف). نانوالیاف سلولز خالص و (ب) نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده با فتالیمید ۱/۵ درصد

حاوی گروه‌های عاملی آمین ۴/۵ است [۲۰]. هنگامی که مقدار pH کمتر از ۴/۵ است، فتالیمید کاتیونی می‌شود و در صورت بیشتر بودن مقدار pH از ۴/۵، فتالیمید آنیونی است. از آنجا که فتالیمید با اسید استیک حل شد، مقدار pH، ۴ است. همچنین مقدار مطلق زتا پتانسیل نانوالیاف اصلاح‌شده با فتالیمید (۶۲/۲) که خیلی بیشتر از نانوالیاف سلولز خالص (۵۲/۵-) است نشان‌دهنده این است که محلول نانوالیاف سلولز خالص ناپایدارتر از نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده است که این ممکن است به دلیل بیشتر بودن گروه‌های آنیونی در نانوالیاف سلولز خالص و مقدار pH بیشتر باشد [۲۱].

پتانسیل زتا

پتانسیل زتا از عوامل مهم در پایداری مواد کلوئیدی است. این پتانسیل می‌تواند شرایط نمونه را در حالت‌های مهم نشان دهد. بار سطحی نانوالیاف سلولز خالص و اصلاح‌شده با استفاده از پتانسیل زتا انجام گرفت. نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پتانسیل زتا نانوالیاف سلولز خالص، منفی و نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده، مثبت است که تأیید موفقیت‌آمیز بودن اصلاح است، زیرا نانوالیاف سلولز خالص به دلیل داشتن گروه‌های کربوکسیل و pH ۶، دارای بار سطحی آنیونی است، اما پس از اصلاح به دلیل وجود گروه‌های آمین با بار سطحی مثبت و pH ۴ کاتیونی شد؛ زیرا نقطه ایزوالکتریک فتالیمید



شکل ۲. مقدار پتانسیل زتا (الف) محلول نانوالیاف سلولز خالص (ب) نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده با فتالیمید

تأثیر دما بر مقدار جذب ذرات معلق

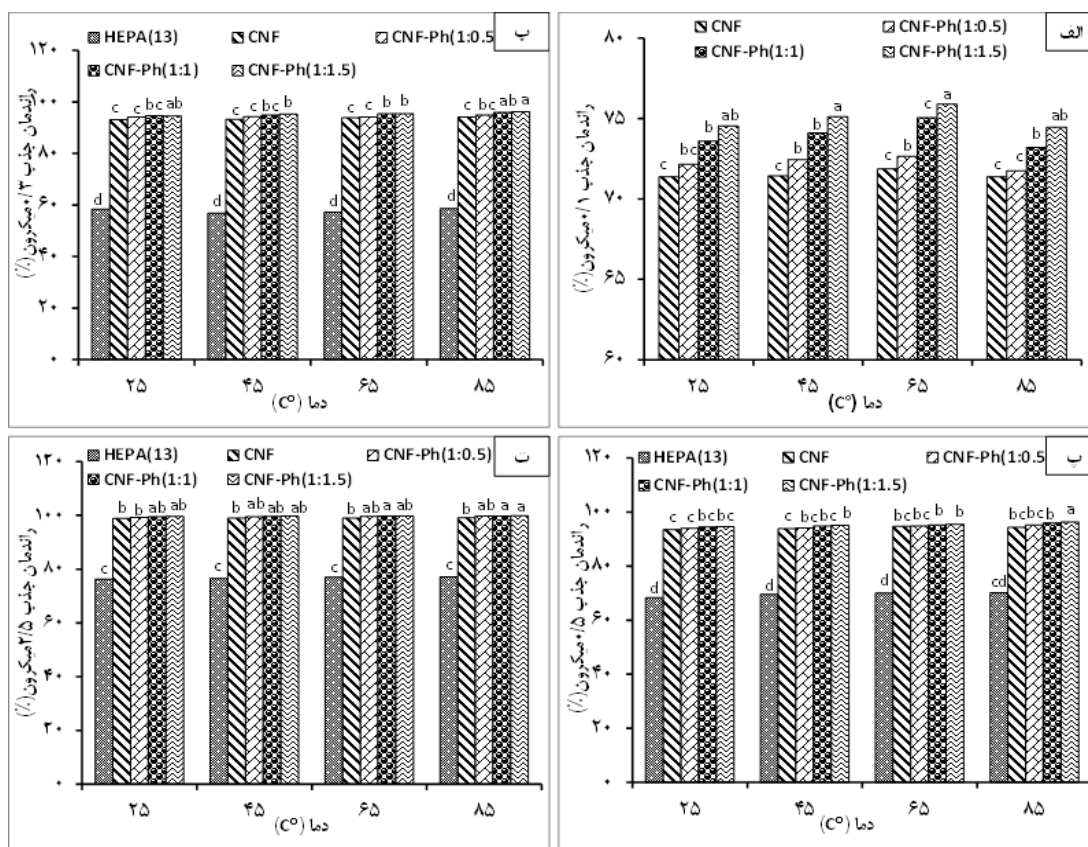
درجه حرارت از عوامل محیطی مهم است که می‌تواند بر عملکرد فیلترهای تصفیه هوا تأثیر بگذارد [۱۸]. بنابراین تأثیر دما بر عملکرد فیلتراسیون ذرات معلق هوا برای نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف سلولزی خالص و اصلاح‌شده بررسی و با فیلتر هپا مقایسه شد. برای این منظور، محدوده دمای عملیاتی بین ۲۵ تا ۸۵ درجه سلسیوس برای بررسی اثرهای دما بر عملکرد فیلتراسیون انتخاب شد. نتایج ارزیابی تأثیر دماهای مختلف بر بازده جذب ذرات معلق نشان داد که استفاده از سطوح مختلف فتالیمید سبب تغییر معنی‌دار (سطح اطمینان آماری ۹۵ درصد) بازده جذب در نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده در مقایسه با فیلتر هپا و نانوالیاف سلولز خالص شد. به‌طور کلی در درجه حرارت‌های مختلف، در پی استفاده از فتالیمید در مقایسه با نانوالیاف سلولز خالص، بازده جذب بهتری در ذرات معلق دیده شد، هرچند در برخی از شرایط، این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبوده است. در درجه حرارت‌های بیشتر و در سطوح بالاتر مصرف فتالیمید، مقادیر بازده جذب بیشتری به‌دست آمد. آزمون دانکن مقادیر بازده جذب ذرات معلق در اندازه‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۲/۵ میکرون را به ترتیب در سه، چهار، چهار و سه گروه جداگانه قرار داده است. بیشترین بازده جذب

ذرات معلق در مورد ذرات با اندازه ۲/۵ میکرون (۹۹/۸۲ درصد) و ۰/۵ میکرون (۹۶/۳ درصد) به ترتیب با استفاده از ۱ و ۱/۵ درصد فتالیمید به‌دست آمد.

تأثیر دماهای مختلف و نوع فیلتر بر مقدار جذب ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون در شکل ۳ (الف، ب، پ و ت) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ الف مشاهده می‌شود، فیلتر هپا توانایی جذب ذرات معلق کمتر از ۰/۱ میکرون را ندارد. همچنین مقدار جذب ذرات معلق در همه نمونه‌ها با افزایش دما از ۲۵ به ۶۵ درجه سلسیوس و همچنین افزایش مقدار فتالیمید افزایش یافت، به طوری که بیشترین جذب ذرات معلق به نانوالیاف سلولزی اصلاح‌شده با فتالیمید ۱/۵ درصد و دمای ۶۵ درجه سلسیوس (۷۶ درصد) اختصاص داشت. اما با افزایش دما از ۶۵ به ۸۵ درجه سلسیوس، مقدار جذب ذرات معلق کاهش یافت، به طوری که برای نانوالیاف سلولز اصلاح‌شده با فتالیمید ۱/۵ درصد، از ۷۶ به ۷۴/۵ درصد کاهش یافت. در توضیح این پدیده می‌توان گفت برخی از ذرات معلق کمتر از ۰/۱ میکرون، مولکول‌های قطبی گازی هستند که با سطح نانوالیاف سلولز از طریق پیوند قطبی-قطبی واکنش می‌دهند و افزایش دما می‌تواند انرژی جنبشی مولکول‌های گازی موجود در سطح را افزایش دهد. این افزایش انرژی جنبشی ناشی از دمای

نمونه‌ها عملکرد مطلوبی در محدوده دمایی تحت مطالعه داشتند. نتایج یادشده با یافته‌های ژنگ و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. در حقیقت، کاهش جذب ذرات معلق به دلیل تخریب نانوالیاف پلی‌آمید در محدوده دمایی ۳۸۰ درجه سلسیوس بود [۱۳]. از طرف دیگر نتایج این پژوهش با یافته‌های سوزنده و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. البته آنها دلیل این پایداری زیاد را به انتخاب محدوده دمایی کم نسبت دادند [۹].

زیاد می‌تواند زمان تعامل بین آلاینده‌های گازی و نانوالیاف سلولزی را کاهش دهد و در نتیجه موجب کاهش جذب ذرات معلق شود [۹، ۱۳]. در شکل ۳ (ب، پ و ت) مشاهده می‌شود که فیلتر هپا توانایی جذب ذرات معلق ۰/۳ میکرون به بالا را دارد. همچنین با افزایش دما، میزان جذب ذرات معلق بزرگ‌تر از ۰/۳ میکرون برای همه نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف سلولزی خالص و اصلاح‌شده به‌طور جزئی افزایش یافت. به‌طور کلی همه



شکل ۳. اثر دما و نوع فیلتر بر بازده جذب ذرات (الف) ۰/۱ میکرون؛ (ب) ذرات ۰/۳ میکرون؛ (پ) ذرات ۰/۵ میکرون؛ و (ت) ذرات ۲/۵ میکرون نانوفیلترهای هوا

نانوالیاف سلولز خالص و اصلاح‌شده می‌شود. خصوصیات مورفولوژی آنروژل‌های نانوالیاف سلولز ساخته‌شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که افزایش غلظت فتالیمید موجب افزایش سطح ویژه و دانسیته می‌شود، اما تخلخل و قطر منافذ کاهش می‌یابد. نتایج تأثیر درجه حرارت نشان داد که بیشترین جذب ذرات معلق کمتر از ۰/۱ میکرون

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از نانوالیاف سلولز خالص و اصلاح‌شده با فتالیمید برای جذب ذرات معلق هوا استفاده شد. در این تحقیق مشاهده شد که استفاده از روش خشک‌کن انجمادی موجب حذف مستقیم آب و ایجاد ساختار متخلخل به‌هم‌پیوسته بدون تغییر شکل در نانوفیلترهای حاصل از

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از پروفسور یوس براورس، دکتر چینگ‌لیانگ یو و دکتر فلورنت گواوین از گروه مهندسی مواد دانشکده محیط زیست دانشگاه صنعتی آیندهوون هلند بابت فراهم آوردن امکانات آزمایشگاهی، از پروفسور کریستینا اوکسمان از گروه مهندسی مواد دانشکده فنی دانشگاه لوتلای سوئد بابت فراهم آوردن مواد آزمایشگاهی و از مسئولان دانشگاه تهران و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو بابت حمایت مالی در اجرای هرچه بهتر این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌کنند.

مربوط به نانوالیاف سلولزی اصلاح شده با فتالیمید ۱/۵ درصد و دمای ۶۵ درجه سلسیوس (۷۶ درصد) بود. اما با افزایش دما از ۶۵ به ۸۵ درجه سلسیوس، جذب ذرات معلق به ۷۴/۵ درصد کاهش یافت. همچنین مشاهده شد که با افزایش دما، جذب ذرات معلق بزرگ‌تر از ۰/۳ میکرون برای همه نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف سلولزی خالص و اصلاح شده به طور جزئی افزایش می‌یابد. به طور کلی مشخص شد که همه نمونه‌ها عملکرد مطلوبی در محدوده دمایی تحت بررسی داشتند. در نهایت نتایج نشان داد که نانوفیلترهای مبتنی بر نانوالیاف سلولز اصلاح شده، کارایی و عملکرد فیلتراسیون خوب و نیز قدرت جذب ذرات کمتر از ۰/۱ میکرون را دارند، اما فیلترها قادر به جذب این ذرات نیست.

References

- [1]. Fang, M., Chan, C.K., and Yao, X. (2009). Managing air quality in a rapidly developing nation: China. *Atmospheric Environment*, 43(1): 79-86.
- [2]. Andreae, M.O., and Rosenfeld, D. (2008). Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth-Science Reviews*, 89(1-2): 13-41.
- [3]. Horton, D.E., Skinner, C.B., Singh, D., and Diffenbaugh, N.S. (2014). Occurrence and persistence of future atmospheric stagnation events. *Nature Climate Change*, 4(8): 698.
- [4]. Liu, C., Hsu, P.C., Lee, H.W., Ye, M., Zheng, G., Liu, N., Li, W., and Cui, Y. (2015). Transparent air filter for high-efficiency PM_{2.5} capture. *Nature Communications*, 6(1): 1-9.
- [5]. Daneleviciute, A., Katunskis, J., and Buika, G. (2009). Electrospun PVA nanofibres for gas filtration applications. *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, 6(77): 40-43.
- [6]. Choi, S., Drese, J.H., Eisenberger, P.M., and Jones, C.W. (2011). Application of amine-tethered solid sorbents for direct CO₂ capture from the ambient air. *Environmental Science & Technology*, 45(6): 2420-2427.
- [7]. Sung, S., and Suh, M.P. (2014). Highly efficient carbon dioxide capture with a porous organic polymer impregnated with polyethylenimine. *Materials Chemistry A*, 2(33): 13245-13249.
- [8]. Baker, R.W. (2012). *Membrane Technology and Applications*. John Wiley & Sons.
- [9]. Souzandeh, H., Molki, B., Zheng, M., Beyenal, H., Scudiero, L., Wang, Y., and Zhong, W.H. (2017). Cross-linked protein nanofilter with antibacterial properties for multifunctional air filtration. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(27): 22846-22855.
- [10]. Valdebenito, F., García, R., Cruces, K., Ciudad, G., Chinga-Carrasco, G., and Habibi, Y. (2018). CO₂ Adsorption of surface-modified cellulose nanofibril films derived from agricultural wastes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(10): 12603-12612.
- [11]. Miyamoto, T., Takahashi, S.I., Ito, H., Inagaki, H., and Noishiki, Y. (1989). Tissue biocompatibility of cellulose and its derivatives. *Biomedical Materials Research*, 23: 125-133.
- [12]. Saljoughi, E., Sadrzadeh, M., and Mohammadi, T. (2009). Effect of preparation variables on morphology and pure water permeation flux through asymmetric cellulose acetate membranes. *Membrane Science*, 326(2): 627-634.

- [13]. Zhang, R., Liu, C., Hsu, P.C., Zhang, C., Liu, N., Zhang, J., Lee, R.H., Lu, Y., Qiu, Y., Chu, S. and Cui, Y. (2016). Nanofiber air filters with high-temperature stability for efficient PM_{2.5} removal from the pollution sources. *Nano Letters*, 16(6): 3642-3649.
- [14]. Sepahvand, S., Jonoobi, M., Ashori, A., Gauvin, F., Brouwers, H.J.H., Oksman, K., and Yu, Q. (2020). A promising process to modify cellulose nanofibers for carbon dioxide (CO₂) adsorption. *Carbohydrate Polymers*, 230: 115571.
- [15]. Souzandeh, H., Johnson, K.S., Wang, Y., Bhamidipaty, K., and Zhong, W.H. (2016). Soy-protein-based nanofabrics for highly efficient and multifunctional air filtration. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(31): 20023-20031.
- [16]. Sepahvand, S., Jonoobi, M., Ashori, A., Gauvin, F., Brouwers, H.J.H., and Yu, Q. (2019). Surface modification of cellulose nanofiber aerogels using phthalimide. *Polymer Composites*, 41: 219-226.
- [17]. Rafieian, F., Hosseini, M., Jonoobi, M., and Yu, Q. (2018). Development of hydrophobic nanocellulose-based aerogel via chemical vapor deposition for oil separation for water treatment. *Cellulose*, 25(8): 4695-4710.
- [18]. Molina, C.T., and Bouallou, C. (2016). Carbon dioxide absorption by ammonia intensified with membrane contactors. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(7): 2133-2146.
- [19]. Feng, J., Nguyen, S.T., Fan, Z., and Duong, H.M. (2015). Advanced fabrication and oil absorption properties of super-hydrophobic recycled cellulose aerogels. *Chemical Engineering Journal*, 270: 168-175.
- [20]. Kushwaha, N., and Kaushik, D. (2016). Recent advances and future prospects of phthalimide derivatives. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 6: 159-171.
- [21]. Liu, X., Souzandeh, H., Zheng, Y., Xie, Y., Zhong, W.H., and Wang, C. (2017). Soy protein isolate/bacterial cellulose composite membranes for high efficiency particulate air filtration. *Composites Science and Technology*, 138: 124-133.

Use of cellulose nanofibers modified with phthalimide for adsorb of particulate matters less than 2.5 microns

S. Sepahvand; Ph.D., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

M. Jonoobi*; Assoc., Prof, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

A. Ashori; Prof., Department of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, I.R. Iran

(Received: 09 March 2020, Accepted: 19 April 2020)

ABSTRACT

The purpose of this study was to fabricate nano filters to adsorb particulate matters less than 2.5 μm using phthalimide modified cellulose nanofibers. Modification of cellulose nanoparticles with phthalimide was performed on acetic acid with the cellulose to phthalimide nanofiber ratios of 1:0, 1:0.5, 1:1 and 1:1.5 wt%. Modified cellulose nanofibers were evaluated by various techniques including SEM and ZP (zeta potential). Finally, cellulose nanofibers, both pure and unmodified, were evaluated for the adsorption of particulate matters and compared with the control filter (HEPA). SEM analysis showed no significant change in the size and structure of cellulose nanofibers due to modification, but with increasing phthalimide content, the specific surface area increased while porosity and pore diameter decreased. The results of the effect of temperature on the adsorption of particulate matters showed that the highest adsorption of particulate matters less than 0.1 μm was related to 1.5% phthalimide-modified cellulose nanofibers and 65°C (76%). However, the adsorption of particulate matter was above 0.3 μm for all purified and modified cellulose nanofibers.

Keywords: chemical modification, adsorption of PM_{2.5}, phthalimide, cellulose nanofibers.

* Corresponding Author, Email: mehdi.jonoobi@ut.ac.ir, Tel: +0982632249311