مروری بر خواص نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف سلولزی برای جذب آلاینده‌های هوا

سیما سپهوند[۱]
مهدی جنوبی[۲*]
پیام مرادپور[۳]
علیرضا عشوری[۴*]

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

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

[۳] استادیار، دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی، گروه علوم و مهندسی صنایع چوب و کاغذ، تهران، ایران

[۴] استاد، تهران، سازمان پژوهش¬های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده فناوری¬های شیمیایی ، تهران، ایران

مسئول مکاتبات:
mehdi.jonoobi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۴

چکیده

آلودگی ناشی از ذرات معلق موجود در هوا یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده سلامت انسان و محیط زیست در جهان می‌باشد. امروزه، در ساخت فیلترهای صنعتی هوا از پلیمرهای سنتزی بر پایه نفت و مواد شیمیایی استفاده می‌شود که به‌دلیل ایجاد آلودگی ثانویه، سازگار با محیط زیست نمی‌باشند. لذا، توسعه استفاده از یک ماده جدید در ساخت فیلترهای هوا که نه تنها سازگار با محیط زیست باشد بلکه قابلیت تجدیدپذیری را نیز داشته باشد، نیاز حیاتی می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات و مطالعات زیادی به منظور جایگزین نمودن نانوالیاف سلولزی به جای الیاف مصنوعی مانند نانوالیاف شیشه، کربن فعال و پلیمرهای پلاستیکی در ساخت فیلترهای هوا انجام شده‌است. نانوالیاف سلولزی با داشتن مزایای زیادی از قبیل زیست تخریب‌پذیری، ارزانی ، دانسیته کم و تشکیل ساختار شبکه‌ای می‌توانند با نانوالیاف مصنوعی رقابت کنند. تحقیق مروری حاضر با هدف بررسی استفاده از نانوالیاف سلولزی برای جذب ذرات معلق و دی‌اکسیدکربن هوا انجام گرفته‌است. بر اساس تحقیقات منتشر شده، گروه‌های فعال هیدروکسیل در سطح و همچنین سطح ویژه زیاد نانوالیاف سلولز منجر به افزایش راندمان جذب دی‌اکسیدکربن و ذرات معلق هوا می‌شود. همچنین، نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف سلولز به دلیل قطر منافذ کم، دارای افت فشار کمتری نسبت به فیلترهای موجود در بازار می‌باشند.

واژگان کلیدی: فیلترهای هوا، پلیمرهای سنتزی، نانوالیاف سلولز، ذرات معلق هوا، دی‌اکسیدکربن.

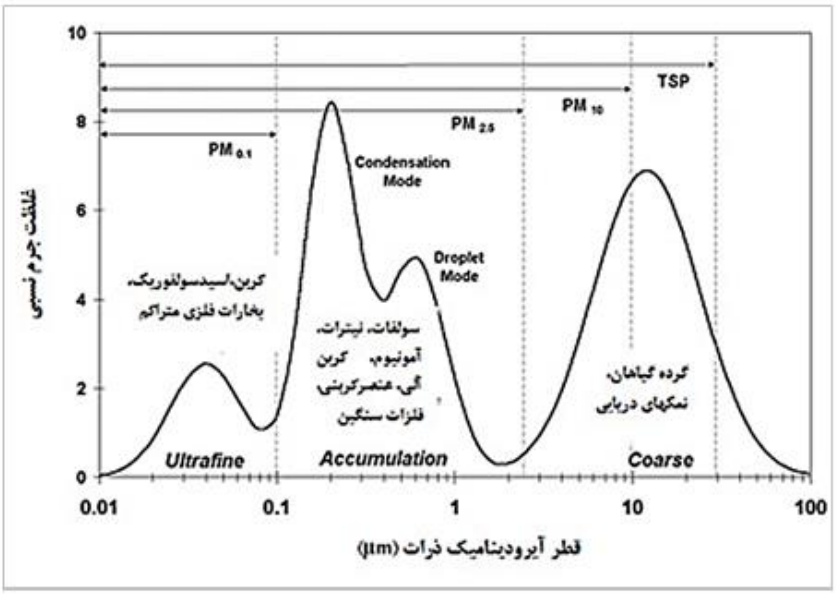
مقدمه

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده سلامت انسان و محیط زیست در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته است [۱،۲]. با گسترش شهرها و افزایش منابع آلاینده و با توجه به خطراتی که این آلودگی‌ها برای سلامت افراد ساکن در این مناطق دارد، شناخت و آگاهی نسبت به جوانب مختلف این مسأله از اهمیت بسزائی برخوردار است [۱]. بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی (WHO)[1]، ذرات معلق (PM)[2] مهم‌ترین آلاینده‌های هوا در شهرهای بزرگ جهان می‌باشند [۳].

ذرات معلق هوا اصطلاحی است که برای توصیف ذرات مولکولی جامد و مایع، با قطر تقریباً یک نانومتر و کوچک‌تر از ۵۰۰ میکرومتر پراکنده شده در هوا استفاده می‌گردد

[1] World Health Organization
[2] Particulate Matter
[2] Coarse Particulate
[3] Fine Particulate
[4] Ultra Fine Particulate

[۳،۴]. ذرات معلق هم از نظر جنس و هم از نظر اندازه بسیار متنوع می‌باشند. ولی با توجه به اندازه آن‌ها به سه نوع ذرات درشت[۲] (PM_{10}) ذرات ریز[۳] ($PM_{2.5}$) و ذرات بسیار ریز[۴] ($PM_{0.1}$) تقسیم می‌شوند [۵]. ذرات معلق PM_{10}: دارای قطر کوچک‌تر از ۱۰ میکرون و شامل غبار، گرده و باکتری می‌باشند. ذرات معلق $PM_{2.5}$: دارای قطر ۲/۵ میکرون و یا کمتر می‌باشند به نحوی که می‌توانند حتی به کوچک‌ترین مجاری ریه‌ها نفوذ کنند. این ذرات شامل مواد غیر آلی مانند دی‌اکسیدسیلیکون (SiO_2)، سولفات (SO_4^{2-}) و نیترات (NO^{3-})، مواد آلی مانند کربن آلی و عناصر کربنی می‌باشند [۵]. ذرات معلق بسیار ریز $PM_{0.1}$ شامل ذرات معلق با قطر یک دهم میکرون و یا کمتر بوده و بیشترین تعداد ذرات در همین گروه قرار دارند. این ذرات از نظر سطح پراکنش، جزء بیشترین ذرات معلق در هوا می‌باشند اما در میزان جرم کلی ذرات معلق در هوا، سهم کمی دارند. از ترکیبات مهم در این نوع ذرات می‌توان به سولفات‌ها و نیترات‌ها اشاره کرد [۵]. در شکل ۱ مشخصات ذرات معلق موجود در هوا نشان داده شده-است.



شکل۱. مشخصات ذرات معلق هوا: ذرات درشت PM_{10}، ذرات ریز $PM_{2.5}$ و ذرات بسیار ریز $PM_{0.1}$ [۶]

عوامل اصلی آلودگی هوا

سوزاندن سوخت‌های فسیلی: آلاینده‌های ناشی از وسایل نقلیه شامل خودروها، قطارها و هواپیماها باعث ایجاد آلودگی زیادی می‌شوند. در واقع، گازهای گلخانه‌ای که از احتراق سوخت‌های فسیلی مثل زغال‌سنگ، نفت و سایر منتشر می‌شوند از عوامل اصلی و مهم آلودگی هوا می‌باشند.

فعالیت‌های کشاورزی: آمونیاکی که توسط محصولات مرتبط با کشاورزی تولید می‌شود بسیار شایع می‌باشد و یکی از گازهای خطرناک در جو است. همچنین، استفاده از حشره‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و کودها در فعالیت-های کشاورزی بسیار زیاد است. زیرا آن‌ها مواد شیمیایی مضر را در هوا پخش می‌کنند و علاوه بر هوا می‌توانند باعث آلودگی آب نیز شوند.

گازهای خروجی نیروگاه ها و صنایع: صنایع تولیدی مقدار زیادی مونوکسیدکربن، هیدروکربن، ترکیبات آلی و مواد شیمیایی را در هوا پخش می‌کنند و به همین دلیل کیفیت هوا را کاهش می‌دهند. صنایع تولیدی را می‌توان در هر گوشه‌ای از زمین یافت و هیچ منطقه‌ای نیست که تحت تأثیر آن قرار نگرفته باشد.

پالایشگاه‌های نفت همچنین هیدروکربن و سایر مواد شیمیایی آلوده دیگر را در هوا منتشر می‌کنند و منجر به آلودگی زمین می‌شوند [۱].

فیلتر

تصفیه هوا به علت تنوع بسیار زیاد آلاینده‌ها و منابع متعدد آلوده‌کننده‌ها، یکی از پیچیده‌ترین جنبه‌های علمی و عملی پیش روی بشر است. روش‌های کنونی همچون فیزیکی (چگالش، جذب سطحی، جذب و جداسازی توسط غشاء)، شیمیایی (سوزاندن حرارتی و کاتالیستی)، بیولوژیکی (بیواسکرابینگ، بیوتریکلنگ و بیوفیلتراسیون) و فیلتراسیون که برای تصفیه هوا استفاده می‌شوند همگی در اوایل قرن بیستم کشف و بر مبنای سیستم‌های تصفیه هوای خانگی پایه‌گذاری شدند. [۷]. نگرانی‌های عمومی از کارایی روش‌های متداول، زمینه توسعه و رشد روش‌های نوین تصفیه هوا را فراهم کرده‌است که به لحاظ اقتصادی و عملکردی موثرتر باشند.بهترین روش متداول در این حوزه، فیلتراسیون می‌باشد که با ایجاد نوآوری و تغییراتی همچون هوادهی (برای حذف بو)، روش‌های اسمز معکوس (برای حذف ویروس‌ها، سموم و سایر ترکیبات آلوده غیر آلی) و کربن فعال (برای حذف آلاینده‌های آلی)، متحول شده‌است [۷، ۸] . فیلتراسیون فرایندی است که در آن ذرات جامد معلق و جاری در گاز یا مایع با عبور از فضاهای دارای ویژگی‌های خاص (غشاءها)، جدا می‌شوند [۹].هدف از فیلتراسیون، استفاده از یک ساختار جامد چندبخشی، متخلخل و صفحه‌ای برای تصفیه هوا و آب است [۱۰]. در واقع، عموماً اصطلاح فیلتر به ساختارهایی اطلاق می‌شود که توانایی جداسازی ذرات با ابعاد ۱ تا ۱۰ میکرومتر را دارند [۱۱].

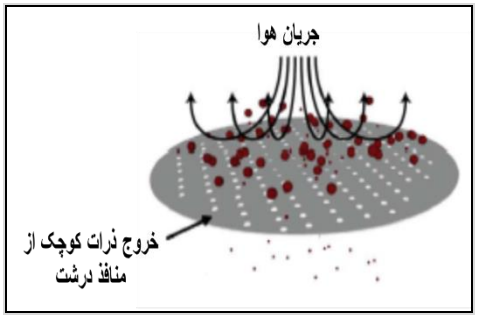
ویژگی فیلترها

مهم‌ترین ویژگی فیلترها، به عنوان یک محیط متخلخل، داشتن خلل و فرجهایی با اندازه و ابعاد مشخص است.. منافذ بخش بسیار زیادی از حجم فیلتر را در بر می‌گیرند و شبکه پیچیده‌ای از حفره‌ها را می‌سازند. فیلترها می‌توانند از مواد پلیمـری و یا سرامیکی تهیه شوند [۱۰]. شکل (۲) نشان می‌دهد با انجام عمل فیلتراسیون، ذراتی که از اندازه حفره‌های فیلتر کوچک‌تر می‌باشند از آن عبور کرده و ذرات با اندازه بزرگ‌تر، از فاز حامل جدا شده و پشت فیلتر باقی می‌مانند [۱۲].

دو عامل مؤثر در انتخاب نوع و راندمان فیلتر

اندازه حفرات فیلتر: موادی با اندازه بزرگ‌تر از حفرات فیلتر، در پشت آن باقی می‌مانند و عبور نمی‌کنند، در نتیجه، برای جداسازی ذرات با اندازه مشخص باید از فیلترهای مناسب استفاده کرد.

مقدار ذرات باقی‌مانده در پشت فیلتر: ذراتی که در پشت فیلتر باقی می‌مانند به مرور زمان و با استفاده مداوم از فیلتر بیشتر می‌شوند. این مسئله می‌تواند به‌دلیل انسداد روزنه‌های فیلتر شودو باید در بازه‌های زمانی مشخص، فیلتر را تعویض، و یا آن را پاک‌سازی نمود. گرفتگی فیلتر از اهمیت زیادی برخوردار است. زیرا تعویض و یا حتی تمیزکردن فیلتر هزینه‌بر است [۵،۱۲] .



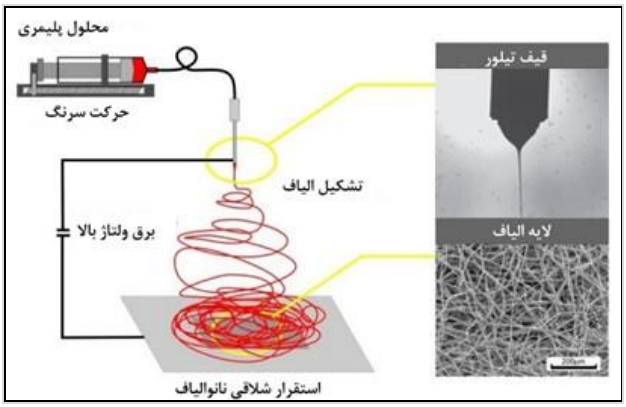
شکل۲. غشای متخلخل فیلترهای هوا [۵]

روش‌های ساخت فیلترهای هوا

امروزه، مهمترین روش‌ها برای ساخت فیلترهای هوا ، روش‌های الکتروریسی و خشک‌کن انجمادی [۱۸-۱۳] می‌باشند.

روش الکتروریسی

الکتروریسی روشی است که تولید نانوالیاف با نیروی محرکه الکترواستاتیکی انجام می‌شود. به عبارت دیگر، در این روش از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا جهت تولید بار الکتریکی در جریان محلول یا مذاب پلیمری استفاده می‌شود. به‌منظور تولید نانوالیاف، یکی از الکترودهای منبع تغذیه ولتاژ بالا به محلول پلیمری و الکترود دیگر به زمین یا به جمع‌کننده رسانا متصل می‌گردد. با عبور محلول از درون لوله موئینه، در اثر میدان الکتریکی حاصل از منبع تغذیه ولتاژ بالا ما بین نوک لوله موئینه و جمع‌کننده متصل به زمین، سیال باردار شده و از نوک لوله موئینه به سمت جمع‌کننده کشیده می‌شود. در اثر حرکت سیال، حلال تبخیر شده و رشته‌هایی با قطر زیر میکرون روی جمع‌کننده تولید می‌شود (شکل۳). اندازه و ریزساختار نانوالیاف با متغیرهای عملیاتی متفاوتی مانند ویسکوزیته محلول، ولتاژ، نرخ تغذیه، هدایت محلول، فاصله هدف و لوله موئین و اندازه لوله کنترل می‌شوند. با روش الکتروریسی محدوده وسیعی از مواد پلیمری با بازه‌ای از قطر الیاف (نانومتر تا چند میکرومتر) تولید می‌شوند. نانوالیاف الکتروریسی شده معمولاً به صورت بی‌نظم یا جهت‌دار روی صفحه دوبعدی جمع‌آوری می‌شوند [۱۹]. اما در این روش نانوالیاف به صورت نامنظم روی یکدیگر قرار می‌گیرند و همچنین نانوالیاف تشکیل شده دارای تخلخل نامنظم می‌باشند. علاوه بر این، برای حل کردن پلیمر باید از حلال مناسبی استفاده شود [۲۲-۲۰].



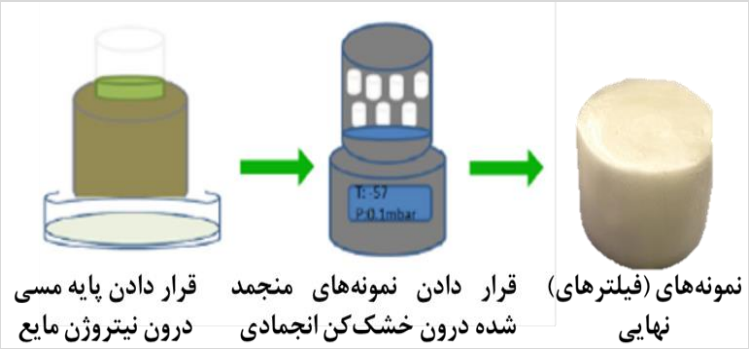
شکل ۳. نمای شماتیک فرایند الکتروریسی [۱۴].

روش خشک‌کن انجمادی(خشک‌کن تصعیدی)

برای ساخت فیلتر از یک لوله تفلونی از جنس PTFE[۲] با قطر مورد نظر تثبیت شده روی سطح عرضی یک استوانه (پایه) مسی با قطر و طول مورد نظر ، استفاده می‌شود. تا یک سوم ارتفاع استوانه مسی درون نیتروژن مایع در دمای ۱۹۶- درجه‌ی سلسیوس قرار داده می‌شود. سپس ترکیب‌های آماده شده برای ساخت فیلتر داخل لوله تفلونی ریخته می‌شود. با انتقال آرام سرما به وسیله استوانه مسی، مخلوط‌ها به تدریج از کف به سطح منجمد می‌شوند. در نهایت، نمونه‌های منجمد شده درون دستگاه خشک‌کن انجمادی قرار داده می‌شوند (شکل ۴) [۲۳،۲۴]. در واقع، از این روش جهت خشک‌کردن نمونه‌هایی با شکل هندسی منظم استفاده می‌شود. در خشک کردن به شیوه انجمادی، آب یا حلال از نمونه منجمد شده طبق فرآیند تصعید حذف شده و بدین ترتیب به دلیل عدم استفاده از گرما برای دهیدراسیون (آب‌زدایی)، کمترین میزان تغییرات در خواص محصول را خواهد داشت. بطوری‌که، ساختار یکپارچه بدون ایجاد ترک یا شکستگی در محصول ایجاد می‌شود. در این روش عواملی مانند غلظت پلیمر، وزن مولکولی و رشد کریستال‌های یخ طی

[1] Freeze dryer
[2] Polytetrafluoroethylene

فرایند ساخت بر تخلخل و اندازه منافذ محصول تأثیر می-گذارد [۱۸]. از آنجایی که میزان تخلخل، یکنواختی منافذ برای ساخت فیلترها مهم می‌باشد، لذا این روش یکی از بهترین و به‌صرفه‌ترین روش‌های ساخت فیلترها می‌باشد.



شکل ۴. شمایی از مراحل ساخت فیلتر با روش خشک‌کن انجمادی [۲۴].

راهکارهای مؤثر کاهش آلودگی هوا

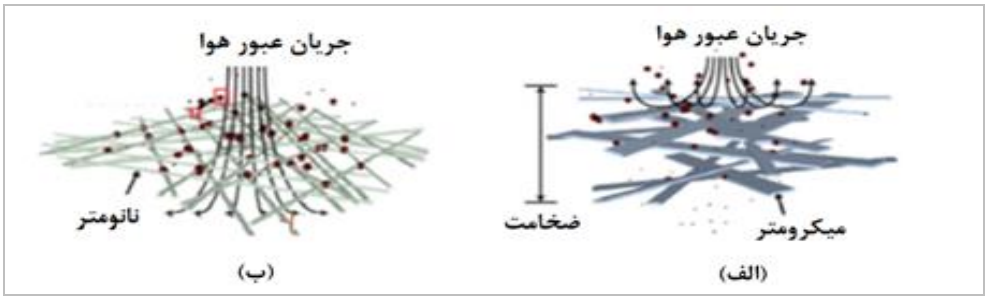
طی دهه‌های گذشته، به منظور کاهش آلودگی هوا، روش‌های متعددی آزمایش و پیشرفت‌های زیادی حاصل شده‌است. یکی از این روش‌ها، استفاده از فیلتر کربن فعال[1](فیلتر کربن فعال به کربنی گفته می‌شود که توسط اکسیژن فرآوری شده به شکلی که سوراخ‌های خیلی ریز بی‌شماری مانند سنگ پا در میان اتم‌های آن به وجود آمده‌است) می باشد. نتایج محققان نشان می‌دهد که فیلترهای کربن فعال توانایی جذب بازمانده‌های واکنش-های شیمیایی و بسیاری دیگر از گازهای آلاینده محیط نظیر SO_2، بنزن، رادون، فرمالدهید و غیره را دارند. اما مشکلات این نوع فیلترها راندمان کم، سطح ویژه کم و همچنین عمر کوتاه آنها می‌باشد، به طوری‌که به نسبت حجم آلودگی در بازه ۲ هفته تا ۳ ماه باید تعویض گردند [۲۵].

بعلاوه، از فیلترهایی که از درهم تنیده شدن نامنظم و کاملاً تصادفی الیاف شیشه، پوشال و یا حصیر که پس از فشرده شدن ساخته می‌شوند، عمدتاً برای جذب ذرات معلق موجود در هوا استفاده می‌شود. قطر این الیاف بین ۰/۵ تا ۲ میکرون می‌باشد. معایب این نوع فیلترها، قطر و ضخامت زیاد الیاف، عدم توانایی جذب و مسدودسازی ذرات بسیار ریز (کمتر از ۰/۵ میکرون)، ابعاد بزرگ منافذ و تخلخل کمتر، مصرف انرژی زیاد، نفوذپذیری کم هوا ، افت فشار و وزن پایه زیاد می‌باشد. . قطر و ضخامت زیاد الیاف و سرعت عبور جریان هوا کم این نوع فیلترها که به کاهش جذب ذرات معلق هوا میانجامد موجب کاهش راندمان جذب این فیلترها می‌شوند (شکل ۵ (الف)). [۲۶]. عدم وجود گروه‌های عاملی در ساختار مواد اولیه فیلترهای صنعتی هوا و همچنین ساز و کار فیزیکی باعث فیلتراسیون محدود و عدم حذف مواد شیمیایی سمی از هوا می‌شود [۳]. توسعه مواد چند منظوره فیلترهای هوا برای حذف بسیاری از آلاینده‌های هوا با راندمان بالا بسیار مهم است، اما در این زمینه چالش‌هایی نیز مطرح می‌باشد.

در دهه‌ی اخیر، یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش آلودگی هوا، استفاده از فیلترهای حاصل از نانوالیاف می-باشد. پلیمرهایی که به صورت غشای فیبر نبافته[2]در تولید این نوع فیلترها استفاده می‌شوند شامل پلی‌اتیلن[3]و پلی-پروپیلن[3] و پلی‌استایرن (که از لحاظ شیمیایی سنتز شده) می‌باشد (شکل ۵ (ب)). راندمان فیلترهای حاصل از نانوالیاف ۹۵- ۱۰۰ درصد می باشد در حالی‌که بازده فیلترهای معمولی بین ۳۵ تا ۷۵ درصد می‌باشد [۲۷].همچنین عیب عمده فیلترهای معمولی، زیست تخریب‌پذیر نبودن آنها می‌باشد بطوری‌که بیش از ۴۰۰ سال در محیط باقی می‌مانند، زیرا پلیمرهای حاصل از نفت بسیار پایدار می‌باشند و به طور طبیعی دچار تخریب نمی‌شوند . این عامل باعث آلودگی بیشتر آنها پس از دفع در محیط‌زیست می‌شود [۲۸].

[1] Activated carbon

[2]Nonwoven Fiber Membrane
[3]PolyEthylene



شکل ۵. نحوه‌ی عبور جریان هوا در فیلترهای هوا (الف) میکروفیلترها و (ب) نانوفیلترها [۲۶]

عدم وجود گروه‌های عاملی در ساختار مواد اولیه فیلترهای صنعتی هوا و همچنین مکانیزم تصفیه فیزیکی آنها که باعث فیلتراسیون محدود به‌ویژه کم و عدم از بین بردن مواد شیمیایی سمی از هوا می‌شود، منجر به توسعه نسل جدیدی از فیلترهای با کارایی زیاد شد. تحقیقات گذشته نشان داد که اصلاح سطحی نانوالیاف و استفاده از پلیمرهای سازگار با محیط زیست (پروتئین ژلاتین و سویا و نانوالیاف سلولز) را می‌توان برای افزایش عملکرد فیلترهای هوا استفاده کرد. این نوع فیلترهای هوا نه تنها ذرات آلاینده هوا با اندازه‌های مختلف، بلکه گازهای شیمیایی مانند فرمالدهید و مونوکسید کربن را نیز جذب می‌کنند [۲۹]. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از غشای کامپوزیت پروتیئن سویا ایزوله/ سلولز باکتریایی برای ساخت فیلترهای تصفیه هوا باعث افزایش جذب ذرات آلاینده هوا می‌شود. به عبارت دیگر راندمان جذب افزایش می‌یابد[۳۰].

علاوه بر جذب ذرات معلق، جذب گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در هوا از جمله دی‌اکسیدکربن، یکی از چالش‌های عمده فعلی زیست محیطی می‌باشد [۲۹]. افزایش مداوم غلظت دی‌اکسیدکربن هوا در سراسر جهان توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است، به‌طوری که از ۲۷۰ppm[1] قبل از انقلاب صنعتی تا نزدیک به ۴۰۰ ppm در روز افزایش یافته‌است. در حقیقت، دی‌اکسیدکربن یکی از بزرگترین گازهای گلخانه‌ای روی کره زمین می‌باشد. بطوری‌که، بیش از ۷۵ درصد کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان را تشکیل می‌دهد و به علت سمیت تأثیر زیادی بر محیط‌زیست دارد [۳۴-۳۰]. علت اصلی گرم شدن کره زمین نیز افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در جو می‌باشد [۳۴]. از آنجایی که دی‌اکسیدکربن دارای کاربرد بسیار زیادی در صنایع می‌باشد، توسعه فن‌آوری‌های متنوع و کم هزینه برای جذب و بازیابی دی‌اکسیدکربن بسیار مهم است [۳۵]. در حال حاضر، از مکانیزم‌ها و مواد مختلف برای جذب دی‌اکسیدکربن استفاده می‌شود، اما توسعه استفاده از فن‌آوری‌های دارای هزینه‌های تجهیزات و مصرف انرژی کم و عملکرد بالا بسیار مهم می‌باشند [۳۶]. یکی از راه‌های شناخته شده و اقتصادی جذب دی-اکسیدکربن استفاده از نانو فیلترهای هوا می‌باشد [۳۷].فیلترهای حاوی جاذب‌های محلول آلکانول- آمین‌ها و جاذب‌های جامد متعدد مانند مواد سیلیکا و کربن، چارچوب‌های فلزات آلی و پلیمرهای آلی متخلخل برای جذب دی‌اکسیدکربن توسعه یافته‌اند [۳۸]. برای ساخت فیلترهای هوای جاذب دی‌اکسیدکربن، برخی از پلیمرهای آلی متخلخل به علت دانسیته کم، سطح ویژه زیاد، ثبات عالی در برابر حرارت، آب و مواد شیمیایی توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۳۹]. به‌طور کلی، مواد ایده‌آل و مطلوب برای جذب دی‌اکسیدکربن باید خصوصیاتی از جمله: (۱) ارزانی، (۲) ساختار مکانیکی خوب، (۳) عملکرد خوب برای غلبه بر جریان هوا طی یک بازه‌ی خاص، (۴) ظرفیت جذب زیاد و (۵) توانایی بازسازی با استفاده از رویکردهای مقرون به صرفه را داشته باشند[۴۰].

بهره‌گیری از فناوری‌های نوین

اخیراً همراه با افزایش نگرانی‌های محیط زیستی و وضع استانداردهای جدید، علاقه‌مندی روزافزونی به توسعه سیستم‌های تمام زیست‌تخریب‌پذیر و سازگار با محیط-زیست به وجود آمده‌است. فناوری‌های سبز سعی دارند تا موادی ایمن با محصولات جانبی و ضایعاتی با حداقل

[1] Parts Per Million

صدمات زیست‌محیطی را تولید نمایند [۴۱]. به‌منظور حل مشکلات محیط زیستی ایجاد شده توسط پلاستیک‌های بر پایه ترکیبات نفتی مثل پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن تلاش‌های بسیاری برای جایگزینی مواد پلاستیکی با مواد زیست‌تخریب‌پذیر با ویژگی‌های مشابه صورت گرفت [۴۲]. فنّاوری نانو در زمینه الیاف لیگنوسلولزی می‌تواند ضمن تولید فرآورده‌های کاربردی و با ارزش افزوده بسیار زیاد و همچنین استفاده بهینه و ارزشمند از منابع سلولزی، راهکاری بسیار مهم و استراتژیک برای تبدیل صنایع سلولزی از حالت ناپایدار (مبتنی بر مواد اولیه) به صنایع با دوام و پایداری زیاد (مبتنی بر دانش و فناوری پیشرفته) محسوب شود [۴۳].از نانوفناوری انتظار می‌رود که باعث افزایش توانایی صنعتی در تولید محصولات حاصل از مواد لیگنوسلولزی به روشی هماهنگ با اصول شیمی سبز و مهندسی سبز شود. فناوری نانو از تکنولوژی‌های نوینی است که فرصت‌های جدیدی برای صنعت فیلترهای هوا به منظور توسعه نسل جدیدی از فیلترهای با کارایی زیاد گشوده است. تحقیقات گذشته نشان داد که نانوذراتی همچون کربن، نقره، و نانوهیبریدها را می‌توان برای افزایش عملکرد فیلترهای هوا استفاده کرد. با کاهش اندازه ذرات ، نسبت سطح مؤثر به حجم ذرات افزایش یافته، اثرهای سطحی قوی‌تر شده و خواص جذب افزایش می‌یابد. افزایش سهم اتم‌ها در سطح نانوذرات خواص فیزیکی آن‌ها را تغییر می‌دهد و موجب بهبود ویژگی‌های فیلترهای تولید شده می‌شود [۴۴]. با این حال، همواره نگرانی در خصوص مخاطرات بهداشتی ناشی از نانوذرات اکسید فلزی، نانو نقره و نانوسیلیکا وجود داشته‌است. همچنین این نوع نانوذرات قابلیت تجدیدشوندگی ندارند. این نگرانی‌ها ، شتاب بیشتری را برای معرفی نانومواد تجدیدپذیر و سازگارتر با محیط زیست ایجاد می‌کند [۴۴]. به دلیل اثبات خطر سرطان زایی نانولوله‌های کربنی به عنوان مهمترین نانو ماده امروزی، توجه بیشتری به مواد دارای ارزش‌های محیط زیستی نظیر نانوسلولز جلب شده‌است [۴۶].

کاربرد سلولز در ساخت فیلتر

اخیراً با افزایش تقاضا برای محصولات زیست‌سازگار و دوستدار محیط زیست، سلولز در تنوع گسترده‌ای از کاربردها استفاده می‌شود. در میان موادی که برای ساخت فیلترها استفاده می‌شود، سلولز، به‌عنوان فراوان‌ترین ماده خام زیستی موجود در طبیعت که در مقیاس‌های میکرومتر تا نانومتر قابل‌دسترس می‌باشد و ساختار شبکه-ای تشکیل می‌دهد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین، سلولز به علت دارا بودن قابلیت‌هایی همچون پخش‌شوندگی در آب، تجزیه‌پذیری در طبیعت توسط آنزیم‌های میکروبی یا قارچی [۴۷]، غیر سمی بودن، عدم اثر مخرب برمحیط زیست، کم بودن هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری و کاهش مصرف انرژی ، می‌تواند به عنوان یک ماده خام بالقوه در زمینه تولید فیلترهای هوا استفاده شود [۳۵،۴۸، ۴۹]. این ماده تجدیدپذیر ، چندمنظوره نیز می‌باشد و به راحتی می‌تواند جایگزین بسیاری از مواد تجزیه ناپذیر گردد [۴۹]. سلولز در فرم‌های مختلفی (استات سلولز و نانو الیاف) برای تصفیه هوا استفاده می‌شود [۵۰].

نانوالیاف سلولز[1]

نانوالیاف سلولز نانوذراتی با قطر در حد نانومتر (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) و طول چند میکرومترهستند. نانوالیاف سلولز به‌عنوان یک ماده سلولزی حجیم با سطح ویژه زیاد دارای تعداد زیادی گروه هیدروکسیل فعال می‌باشد که شامل مجموعه‌ای از میکروفیبریل‌های سلولزی است و برخلاف نانوکریستال سلولزی دارای هر دو بخش کریستالی و آمورف می‌باشد. ضریب لاغری[2](نسبت طول به قطر) آن بسیار زیاد بوده و توانایی بسیار خوبی برای تشکیل شبکه‌های محکم و قوی دارد، بنابراین نفوذپذیری فیلم‌های تهیه شده از CNF بسیار کم است [۵۱].

اهمیت استفاده از نانوالیاف سلولزی در فیلتراسیون آلاینده‌های هوا

طی سال‌های اخیر، فناوری نانو با سرعت چشمگیری به یک زمینه بین‌رشته‌ای تبدیل شده و در بسیاری از موضوعات تحقیقاتی مطالعه شده‌است. نانوساختارها مواد پرکاربردی در صنایع مختلفی چون الکترونیک، شیمی،

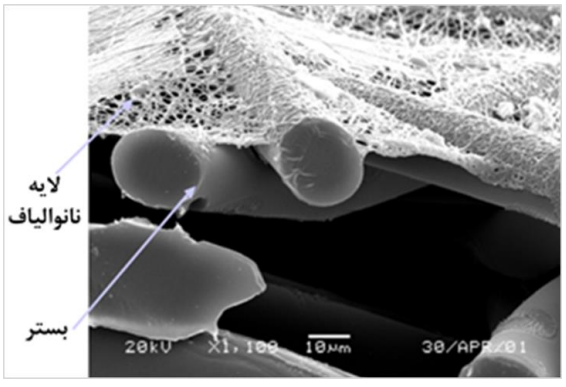
[1]-Cellulose nanofibers (CNF)
[2]-Aspect ratio

مهندسی زیستی[1] و کاربردهای زیست‌محیطی می‌باشند که به همراه پلیمرهای آلی، فلزات یا پلیمرهای غیرآلی استفاده می‌شوند [۵۲]. الیاف سلولز از نانوالیاف، بزرگ‌تر هستند و فضای خالی بیشتری بین الیاف سلولز وجود دارد که منجر به ورود و عبور آلودگی‌ها می‌گردد، بنابراین استفاده از الیاف سلولز موجب کاهش ظرفیت کاری فیلتر و شار[2]آن می‌شود. ظرفیت فیلتر عبارت است از مقدار گرد و غباری که فیلتر می‌تواند پس از پالایش هوا در خود جذب می‌کند. شار عبارت است از مقدار جریان عبوری مایع یا گاز از فیلتر در یک زمان مشخص. شار فیلتر به درصد تخلخل، توزیع اندازه حفرات، فشار پشت فیلتر، ضخامت فیلتر، و ویژگی‌های مایع وگاز عبوری بستگی دارد. بازده فیلترهای معمولی بین ۳۵ تا ۷۵ درصد و در فیلترهای نانویی ۹۵- ۱۰۰ درصد گزارش شده است [۲۷].

با اعمال نانوالیاف تولید شده روی سطح فیلترهای غیرسلولزی و یا تولید فیلترهای تمام سلولزی، ذرات و آلودگی‌های با اندازه کمتر از میکرومتر بر سطح فیلترها قرار گرفته و مانع عبور از فیلتر می‌شود (شکل ۶) [۵۳].محققین براین باورند که استفاده از نانوسلولز به عنوان آئروژل می‌تواند آلاینده‌های هوا را با قدرت ۱۳۰برابر بیشتر از کربن فعال جذب کند [۵۱]. غشاهای نابافته[3] تولید شده از نانو الیاف، با اندازه حفره‌های خیلی کوچک و تخلخل زیاد ، بازده فیلتراسیون بالا[۵۳]. برای کاربردهای متنوع فیلتراسیون در زمینه‌های نظامی (مثل ماسک‌های شیمیایی) و یا صنعتی (مثل فیلتر برای موتورها و ژنراتورهایی که خیلی کثیف می‌شوند) و بهداشتی (مثل فیلترهای هوا و فیلترهای تولید آب شیرین) مناسب می‌باشند [۵۴].

استفاده از نانوالیاف سلولز اصلاح شده برای جذب دی‌اکسیدکربن

با توجه به مباحث فوق، در بین مواد مختلفی که برای ساخت فیلترهای هوا استفاده می‌شود، سلولز به‌عنوان فراوان‌ترین ترکیب آلی از توده زیستی قابل دسترس در مقیاس‌های میکرومتر و نانومتر و توانائی تشکیل ساختار شبکه‌ای، دارای اهمیت و جایگاه خاصی می‌باشد. Gebald و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی برای جذب دی‌اکسیدکربن از نانوالیاف سلولزی اصلاح شده با N- ۲- آمینواتیل-۳- آمینو پروپیل متیل‌دی متوکسی سیلان[4]با روش خشک‌کن انجمادی گزارش کردند که در غلظت ۵۰۶ppm دی‌اکسیدکربن هوا، رطوبت نسبی ۴۰ درصد، دما ۲۵ درجه سلسیوس و مدت زمان ۱۲ ساعت میزان جذب دی‌اکسیدکربن ۱/۳۹ میلی‌مول بر گرم بود [۶۹]. Seahqui و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش خشک‌کن - انجمادی موفق به ساخت فوم‌های نانوالیاف سلولزی اصلاح شده با پلی‌اتیلن‌ایمین[5]برای جذب دی‌اکسیدکربن شدند.



شکل ۶. قرار گرفتن یک لایه نانوالیاف بر روی بستر

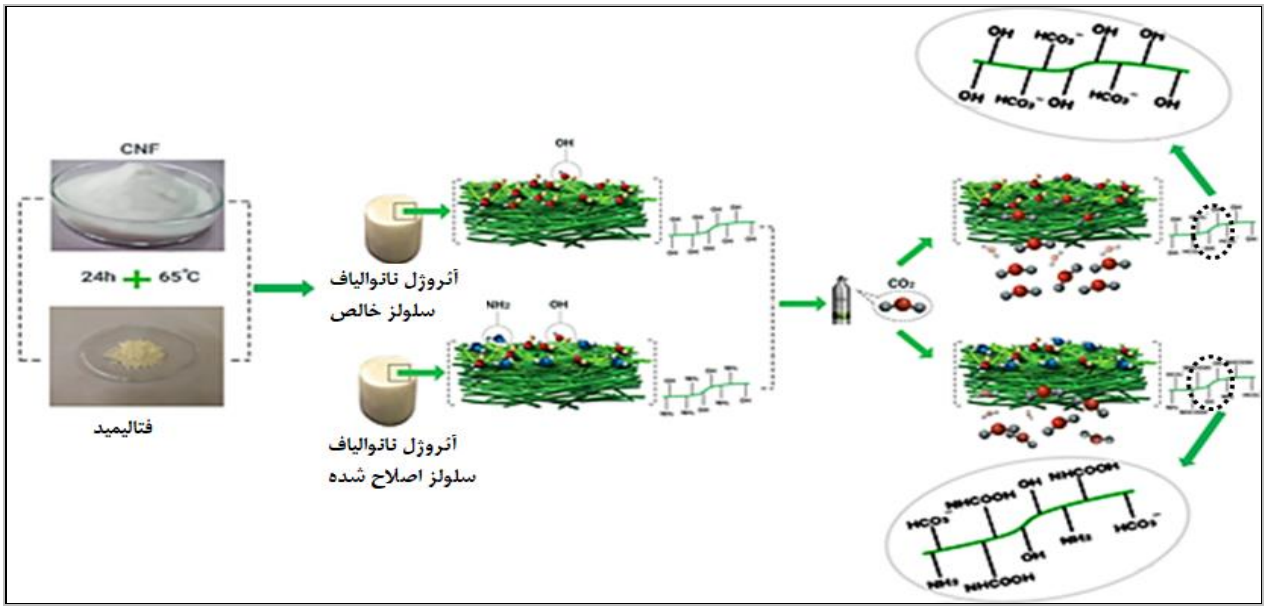
[1] Bioengineering
[2] Flux
[3] Nonwoven Fiber Membrane

4-N-(2-aminoethyl)-3-aminopropylmethyldimethoxysilane (AEAPDMS)
[5]Polyethylenimine (PEI)

نتایج تحقیقات آنها نشان داد که فوم‌های نانوالیاف سلولز اصلاح شده با میزان تخلخل ۴۴ درصد قادرند در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت‌نسبی ۸۰ درصد ۲/۲۲ میلی مول بر گرم دی‌اکسیدکربن را جذب کنند [۷۰].

Valdebenitoو همکاران (۲۰۱۸) فیلم نانوالیاف سلولز اصلاح شده با N-۳-[(تری‌متوکسی‌سیلیل) پروپیل] اتیل دی‌آمین[1]برای جذب دی‌اکسیدکربن را بررسی کردند. در این تحقیق نانوالیاف سلولزی استخراج شده از ضایعات کشاورزی از جمله پوسته ذرت و جو با نانوالیاف سلولزی استخراج شده از خمیر کرافت مقایسه شدند. نتایج نشان داد بعد از ۳ ساعت قرار گرفتن فیلم‌های نانوالیاف سلولز اصلاح شده در معرض دی‌اکسیدکربن، غلظت جذب دی-اکسیدکربن در دمای ۲۵ درجه سلسیوس افزایش یافت، به‌طوری‌که در فیلم‌های نانوالیاف سلولز اصلاح شده‌ی پوسته ذرت، پوسته جو و خمیر کرافت میزان جذب به ترتیب ۰/۹، ۱/۲۷ و ۲/۱۱ میلی‌مول بر گرم بود [۴۸].

Sepahvand و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر پارامترهای مدت زمان، فشار، دما، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا را بر میزان جذب دی‌اکسیدکربن توسط نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف سلولز اصلاح شده با فتالیمید (۱،۳- دی‌هیدرو-۱،۳- دی‌اکسی‌ایزو ایندول; $C_6H_4(CO)_2NH$) را مورد بررسی قرار دادند. همچنین، آنها برای ساخت نانوفیلترها از روش خشک‌کن انجمادی استفاده کردند (شکل۷). بررسی پارامترهای مختلف از جمله: مدت زمان، فشار، دما، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا روی میزان جذب دی-اکسیدکربن در نمونه‌های نانوالیاف سلولز اعم از خالص و اصلاح شده نشان داد که با افزایش پارامترهای فوق میزان جذب دی‌اکسیدکربن افزایش یافت. همچنین با افزایش مقدار فتالیمید در نانوالیاف سلولز اصلاح شده، میزان جذب دی اکسیدکربن به دلیل حضور گروه‌های آمینی بیشتر در سطح افزایش یافت . این نوع نانوفیلترها دارای کمترین افت فشار (۸۳ پاسکال) و بیشترین فاکتور کیفیت (۰/۰۷۲) بودنداین امر به‌دلیل سطح ویژه زیاد، قطر کوچک و حجم زیاد منافذ می‌باشد که منجر به افزایش فاکتور کیفیت و کاهش افت فشار (افزایش نفوذپذیری هوا) می‌شود [۷۱].



شکل ۷. نحوه‌ی اصلاح نانوالیاف سلولز با فتالیمید و جذب دی اکسیدکربن[۷۱]

[1]N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]ethylenediamine (DAMO)

نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از نانوفیلترهای زیست‌تخریب‌پذیر و سازگار با محیط‌زیست می‌تواند یک روش مفید برای کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی محسوب شوند. نانوفیلترها از نظر اندازه منافذ، حد فاصل بین روش‌های اسمز معکوس و اولترافیلتراسیون می‌باشند. اولترافیلتراسیون به‌دلیل بالاتر بودن مقدار آلاینده‌های معدنی و قلیایی نسبت به حد مجاز و روش اسمز معکوس به‌دلیل تولید خلوص بیش از حد محصول و قیمت بالا دارای نواقصی می‌باشند. بر اساس تحقیقات انجام شده، نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف سلولزی اعم از خالص و اصلاح شده دارای میزان تخلخل و نفوذپذیری بیشتر و همچنین قطر کوچکتر منافذ نسبت به فیلترهای معمولی ساخته شده از سلولز و و سایر مواد دیگر می‌باشند. همچنین، نانوفیلترهای حاصل از نانوالیاف سلولز به دلیل سطح ویژه بیشتر، دارای کارایی و قدرت جذب بیشتری نسبت به فیلترهای معمولی ساخته شده از سایر مواد می‌باشند به‌طوری‌که بازده برای فیلترهای معمولی بین ۳۵ تا ۷۵ درصد و در فیلترهای نانویی ۹۵- ۱۰۰ درصد گزارش شده‌است. در واقع، نانو فیلترهای هوا به دلیل تخلخل بالا در هر مترمربع، لایه نازکتر الیاف و توزیع یکنواخت حفره‌ها ، امکان نگهداری ذرات بیشتری را فراهم می‌کنند که ه افت کمتر فشار و بهبود کیفیت کلی فیلتر در مقایسه با فیلتر معمولی می‌انجامد. از آنجایی که مکانیسم جذب ذرات در لایه سطحی اتفاق می‌افتد، این امر می‌تواند منجر به افزایش عمر نهائی فیلتر تا ۲۰ درصد شود. علاوه بر این، عبور جریان هوا در نانوفیلترهای هوا نسبت به فیلترهای معمولی بیشتر است. زیرا در فیلترهای معمولی الیاف درشت‌تر می‌باشند و فضای بیشتری بین الیاف‌ها وجود دارد. لذا ذرات گرد و غبار در عمق فیلتر گیر می‌کند و باعث مسدود شدن جریان هوای عبوری می‌شوند. درحالی‌که، نانوفیلترها دارای فضاهای بسیار ریز می‌باشند که منجر به گیر افتادن ذرات در سطح نانوفیلتر می‌شود و درنتیجه میزان عبور هوا بیشتر می‌شود.

منابع

[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] Zhang, R., Jing, J., Tao, J., Hsu, S. C., Wang, G., Cao, J., ... and Shen, Z., 2013. Chemical characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Beijing: seasonal perspective. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(14), 7053-7074.

[3] Andreae, M. O., & 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.

[4] 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.

[5] Hailin, W., Zhuang, Y., Ying, W., Yele, S. U. N., Hui, Y. U. A. N., Zhuang, G., and Zhengping, H. A. O., 2008. Long-term monitoring and source apportionment of PM2. 5/PM10 in Beijing, China. Journal of Environmental Sciences, 20(11), 1323-1327.

[6] Peterson, G., Rapaka, S., Koski, N., Kearney, M., Ortblad, K., and Tadlock, L., 2017. A robust sebum, oil, and particulate pollution model for assessing cleansing efficacy of human skin. International journal of cosmetic science, 39(3), 351-354.

[7] Hu, A., and Apblett, A. (Eds.)., 2014. Nanotechnology for water treatment and purification. Switzerland: Springer International Publishing.

[8] Fuller, G. W., 1933. Progress in water purification. Journal (American Water Works Association), 25(11), 1566-1576.

[9] Rushton, A., Ward, A. S., and Holdich, R. G., 2008. Solid-liquid filtration and separation technology. John Wiley & Sons.

[10] Pendergast, M. M., and Hoek, E. M., 2011. A review of water treatment membrane nanotechnologies. Energy & Environmental Science, 4(6), 1946-1971.

[11] Sagle, A., and Freeman, B., 2004. Fundamentals of membranes for water treatment. The future of desalination in Texas, 2(363), 137.

[12] Pabby, A. K., Rizvi, S. S., and Requena, A. M. S., 2008. Handbook of membrane separations: chemical, pharmaceutical, food, and biotechnological applications. CRC press.

[13] Zhang, R., Liu, C., Hsu, P. C., Zhang, C., Liu, N., Zhang, J., ... 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] Alghoraibi, I., and Alomari, S., 2018. Different methods for nanofiber design and fabrication. Handbook of nanofibers, 1-46.

[15] Niu, H., Wang, X., and Lin, T., 2012. Upward needleless electrospinning of nanofibers. J. Eng. Fibers Fabr., 7, 17–22.

[16] Dong, Y., Wang, M., Chen, L. and Li, M., 2012. Preparation, characterization of (PVDF HFP)/[bmim]BF4 ionic liquids hybrid membranes and their pervaporation performance for ethyl acetate recovery from water. Desalination, 295: 53–60.

[17] Ding, J., Zhang, M., Jiang, Z., Li, Y., Ma, J. and Zhao, J. 2012. Enhancing the permselectivity of pervaporation membrane by constructing the active layer through alternative self-assembly and spin-coating. Membrane Science, 390: 218–225

[18] Chen, G., Ushida, T. and Tateishi, T., 2002. Scaffold design for tissue engineering. Macromolecular Bioscience, 2:67-77.

[19] Schubert, D. W., and Dunkel, T., 2003. Spin coating from a molecular point of view: its concentration regimes, influence of molar mass and distribution. Materials Research Innovations, 7(5), 314-321.

[20] Kowalewski, T.A., Blonski, S., Barral, S., "Experiments and Modeling of Electrospinning Process", Bull Polymer Academy Science, 53/4, 385- 394, 2005.

[21] Deitzel, J.M., Kleinmeyer, J., Harris, D., "The Effect of Processing Variables on the Morphology of Electrospun Nanofibers and Textiles", Polymer, 42, 261-272, 2001.

[22] Sonseca, A., Peponi, L., Sahuquillo, O., "Electrospinning of Biodegradable Polylactide/Hydroxyapatite Nanofibers: Study on the Morphology, Crystallinity Structure and Thermal Stability", Polymer Degradation and Stability, 97, 2052-2059, 2011.

[23] Sepahvand, S., Jonoobi, M. and Ashori, A., 2019. Chemical modification of cellulose nanofibers with phthalimide air filter to adsorb carbon dioxide. Wood and paper science research, 33(4): 531-543. (**In Persian**).

[24] 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.

[25] Salleh,W.N.W., Ismail, A.F., Matsuura,T. Abdullah, M.S., 2011. Precursor selection and process conditions in the preparation of carbon membrane for gas separation: A review, Separation & Purification Reviews, 40, 261-311.

[26]-Baker, R. W., 2012. Membrane technology and applications. John Wiley & Sons.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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.

[31] Leung, D. Y., Caramanna, G. and Maroto-Valer, M. M., 2014. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39: 426-443.

[32] Knöfel, C., Martin, C., Hornebecq, V. and Llewellyn, P. L., 2009. Study of carbon dioxide adsorption on mesoporous aminopropylsilane-functionalized silica and titania combining microcalorimetry and in situ infrared spectroscopy. The Journal of Physical Chemistry C, 113(52): 21726-21734.

[33] Ansaloni, L., Salas-Gay, J., Ligi, S. and Baschetti, M. G., 2017. Nanocellulose-based membranes for CO_2 capture. Membrane Science, 522, 216-225.

[34] Darunte, L.A., Walton, K.S., Sholl, D.S. and Jones, C.W., 2016. CO_2 capture via adsortion in amine-functionalized sorbents. Chemical Engineering, 12: 82-90.

[35] Dassanayake, R. S., Gunathilake, C., Dassanayake, A. C., Abidi, N., & Jaroniec, M., 2017. Amidoxime-functionalized nanocrystalline cellulose–mesoporous silica composites for carbon dioxide sorption at ambient and elevated temperatures. Journal of Materials Chemistry A, 5(16), 7462-7473.

[36] Hornbostel, M. D., Bao, J., Krishnan, G., Nagar, A., Jayaweera, I., Kobayashi, T., …. and Dubois, L., 2013. Characteristics of an advanced carbon sorbent for CO_2 capture. Carbon, 56: 77-85.

[37] Daneleviciute, A., Katunskis, J. and Buika, G., 2009. Electrospun PVA Nanofibres for Gas Filtration Applications. Fibers & Textiles in Eastern Europe, 6(77): 40–43.

[38] Choi, S., Drese, J. H., Eisenberger, P. M., and Jones, C. W., 2011. Application of amine-tethered solid sorbents for direct CO_2 capture from the ambient air. Environmental science & technology, 45(6): 2420-2427.

[39] 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.

[40] Mahfoudhi, N. and Boufi, S., 2017. Nanocellulose as a novel nanostructured adsorbent for environmental remediation: a review. Cellulose, 24(3), 1171-1197.

[41] Svagan, A. J., Azizi Samir, M. A., and Berglund, L. A., 2007. Biomimetic polysaccharide nanocomposites of high cellulose content and high toughness. Biomacromolecules, 8(8), 2556-2563.

[42] Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., and Sain, M., 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. Progress in polymer science, 37(11), 1552-1596.

[43] Jonoobi, M., Mathew, A. P., Abdi, M. M., Makinejad, M. D., and Oksman, K., 2012. A comparison of modified and unmodified cellulose nanofiber reinforced polylactic acid (PLA) prepared by twin screw extrusion. Journal of Polymers and the Environment, 20(4), 991-997.

[44] Bhat, G., Hegde, R. R., Kamath, M. G., and Deshpande, B., 2008. Nanoclay reinforced fibers and nonwovens. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 3(3), 155892500800300303.

[45] Kaboorani, A., and Riedl, B. 2015. Surface modification of cellulose nanocrystals (CNC) by a cationic surfactant. Industrial Crops and Products, 65, 45-55.

[46] Yousefi, H., 2010. Cellulose nanofiber (CNF) for nanocomposites production: Opportunities and challenges. In Proceeding of the Sixth International Workshop on Green Composites, Sep. 8-10, Gumi, Korea, 2010 (pp. 151-154).

[47] 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.

[48] Valdebenito, F., García, R., Cruces, K., Ciudad, G., Chinga-Carrasco, G. and Habibi, Y., 2018. CO_2 Adsorption of surface-modified cellulose nanofibril films derived from agricultural wastes. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6(10): 12603-12612.

[49] 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.

[50] Daneleviciute-Vaisnienee, A., Katunskis, J., and Buika, G., 2009. Electrospun PVA nanofibres for gas filtration applications. Fibres & Textiles In Eastern Europe, (6 (77)), 40-43.

[51] Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A., and Bras, J., 2012. Microfibrillated cellulose–Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. Carbohydrate polymers, 90(2), 735-764.

[52] Lim, S. K., Lee, S. K., Hwang, S. H., and Kim, H., 2006. Photocatalytic deposition of silver nanoparticles onto organic/inorganic composite nanofibers. Macromolecular Materials and Engineering, 291(10), 1265-1270.

[53] Sivakumar, M., Mohan, D. R., and Rangarajan, R., 2006. Studies on cellulose acetate-polysulfone ultrafiltration membranes: II. Effect of additive concentration. Journal of Membrane Science, 268(2), 208-219.

[54]-Liu, P., Sehaqui, H., Tingaut, P., Wichser, A., Oksman, K., and Mathew, A. P., 2014. Cellulose and chitin nanomaterials for capturing silver ions (Ag^+) from water via surface adsorption. Cellulose, 21(1), 449-461.

[55] Khalil, H. A., Bhat, A. H., and Yusra, A. I., 2012. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. Carbohydrate polymers, 87(2), 963-979.

[56] Cherian, B. M., Leão, A. L., de Souza, S. F., Costa, L. M. M., de Olyveira, G. M., Kottaisamy, M., ... and Thomas, S., 2011. Cellulose nanocomposites with nanofibres isolated from pineapple leaf fibers for medical applications. Carbohydrate Polymers, 86(4), 1790-1798.

[57] Dobreva, T., Benavente, R., Perena, J. M., Perez, E., Avella, M., Garcia, M., and Bogoeva-Gaceva, G., 2010. Effect of different thermal treatments on the mechanical performance of poly (L-lactic acid) based eco-composites. Journal of applied polymer science, 116(2), 1088-1098.

[58] Nair, S. S., Zhu, J. Y., Deng, Y., and Ragauskas, A. J., 2014. Hydrogels prepared from cross-linked nanofibrillated cellulose. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2(4), 772-780.

[59] Rosilo, H., Kontturi, E., Seitsonen, J., Kolehmainen, E., and Ikkala, O., 2013. Transition to reinforced state by percolating domains of intercalated brush-modified cellulose nanocrystals and poly (butadiene) in cross-linked composites based on thiol–ene click chemistry. Biomacromolecules, 14(5), 1547-1554.

[60] Cunha, A. G., and Gandini, A., 2010. Turning polysaccharides into hydrophobic materials: a critical review. Part 1. Cellulose. Cellulose, 17(5), 875-889.

[61] Espino-Pérez, E., Bras, J., Ducruet, V., Guinault, A., Dufresne, A., and Domenek, S., 2013. Influence of chemical surface modification of cellulose nanowhiskers on thermal, mechanical, and barrier properties of poly (lactide) based bionanocomposites. European Polymer Journal, 49(10), 3144-3154.

[62] Semba, T., Ito, A., Kitagawa, K., Nakatani, T., Yano, H., and Sato, A., 2014. Thermoplastic composites of polyamide-12 reinforced by cellulose nanofibers with cationic surface modification. Journal of Applied Polymer Science, 131(20).

[63] Habibi, Y., Chanzy, H., and Vignon, M. R., 2006. TEMPO-mediated surface oxidation of cellulose whiskers. Cellulose, 13(6), 679-687.

[64] Pasquini, D., de Morais Teixeira, E., da Silva Curvelo, A. A., Belgacem, M. N., and Dufresne, A., 2008. Surface esterification of cellulose fibres: processing and characterisation of low-density polyethylene/cellulose fibres composites. Composites Science and Technology, 68(1), 193-201.

[65] Gousse, C., Chanzy, H., Cerrada, M. L., and Fleury, E., 2004. Surface silylation of cellulose microfibrils: preparation and rheological properties. Polymer, 45(5), 1569-1575.

[66] Hemraz, U. D., Boluk, Y., and Sunasee, R., 2013. Amine-decorated nanocrystalline cellulose surfaces: synthesis, characterization, and surface properties. Canadian Journal of Chemistry, 91(10), 974-981.

[67] Ashori, A., Babaee, M., Jonoobi, M., and Hamzeh, Y., 2014. Solvent-free acetylation of cellulose nanofibers for improving compatibility and dispersion. Carbohydrate polymers, 102, 369-375.

[68] Lam, E., Male, K. B., Chong, J. H., Leung, A. C., and Luong, J. H., 2012. Applications of functionalized and nanoparticle-modified nanocrystalline cellulose. Trends in biotechnology, 30(5), 283-290.

[69] Gebald, C., Wurzbacher, J. A., Tingaut, P., Zimmermann, T., and Steinfeld, A., 2011. Amine-based nanofibrillated cellulose as adsorbent for CO_2 capture from air. Environmental science & technology, 45(20), 9101-9108.

[70] Sehaqui, H., Gálvez, M. E., Becatinni, V., cheng Ng, Y., Steinfeld, A., Zimmermann, T., and Tingaut, P., 2015. Fast and Reversible Direct CO_2 Capture from Air onto All-Polymer Nanofibrillated Cellulose-Polyethylenimine Foams. Environmental science & technology, 49(5), 3167-3174.

[71] 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 (CO_2) adsorption. Carbohydrate Polymers, 230, 115571.

An overview of the properties of nanofilters derived from cellulose nanofibers for the adsorption of air pollutants

Abstract

Pollution from particulate matter (PM) is going to be one of the important threats to human and environmental health in the world. Today, synthetic polymers based on petroleum and chemicals are used in the manufacturing industrial air filters, which are not environmentally friendly due to secondary pollution. Using sustainable biomaterial in fabrication is a vital need. In recent years, many kinds of research and studies have been done to replace cellulose nanofiber (CNF) with synthetic fibers such as glass nanofibers, activated carbon, and plastic polymers in the manufacture of air filters. CNF can compete with synthetic nanofibers by having many advantages such as biodegradability, cheapness, low density, and network structure. The present review study was conducted to investigate the using cellulose nanofibers for the adsorption of PM and carbon dioxide (CO_2) in the air. According to published research, active hydroxyl groups on the surface, as well as the high specific surface area of CNF, increase the adsorption efficiency of CO_2 and PM. Also, nanofilters made of CNF have a lower pressure drop than filters on the market due to their small pore diameter.

Keywords: AirFilters, synthetic polymers, cellulose nanofibers, particulate matter (PM), carbon dioxide (CO_2).

S. Sepahvand[1]
M. Jonoobi[2*]
P. Moradpour[3]
A. Ashori[4*]

[1] Ph.D. Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

[2] Associate Prof, Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

[3] Assistant Prof, Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

[4] Prof., Department of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran

Corresponding author:
mehdi.jonoobi@ut.ac.ir

Received: 2020/08/30
Accepted: 2020/11/24