

تأثیر غلظت نانوالیاف سلولز اصلاح شده با فتالیمید بر روی میزان جذب دی‌اکسیدکربن

چکیده

هدف از این پژوهش ساخت فیلترهای هوا با غلظت‌های مختلف نانوالیاف سلولز برای ارزیابی قابلیت استفاده از آن در جذب دی‌اکسیدکربن است. در این تحقیق از روش خشک‌کن انجمادی برای ساخت فیلترها با سه غلظت مختلف (۱، ۱/۵ و ۲ درصد) استفاده شد. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که هرچه مقدار غلظت نانوالیاف سلولز بیشتر شود سطح ویژه افزایش می‌یابد اما تخلخل و قطر منافذ کاهش می‌یابند. نتایج حاصله توسط آزمون BET نیز تأیید شد. همچنین ویژگی‌های مکانیکی و آزمون جذب دی‌اکسیدکربن بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که کاهش غلظت نانوالیاف سلولز مقاومت مکانیکی و میزان جذب دی‌اکسیدکربن را کاهش می‌دهد، به طوری که کمترین مقاومت مکانیکی و جذب دی‌اکسیدکربن مربوط به غلظت ۱ درصد نانوالیاف سلولز اصلاح نشده بود و بیشترین جذب دی‌اکسیدکربن مربوط به غلظت ۲ درصد نانوالیاف سلولز اصلاح شده بود.

واژگان کلیدی: فیلتر هوا، غلظت، نانوالیاف سلولزی، جذب دی‌اکسید کربن.

سیما سپهوند^۱

مهدی جنوبی^{*۲}

علیرضا عشوری^۳

^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

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

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

مسئول مکاتبات:

mehdi.jonoobi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۷

مقدمه

جذب، ذخیره‌سازی و بهره‌برداری از گازهای گلخانه‌ای منتشر شده، یکی از چالش‌های عمده فعلی از دیدگاه زیست محیطی است [۱]. افزایش مداوم در غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری در سراسر جهان توجه زیادی را به خود جلب کرده است، زیرا دی‌اکسیدکربن یکی از بزرگترین اثرات گلخانه‌ای روی زمین است بطوری که بیش از ۷۵ درصد کل انتشار گازهای گلخانه‌ای را در سرتاسر جهان را پوشش می‌دهد و به علت سمی بودن تأثیر زیادی بر محیط زیست دارد [۲، ۳]. به طور کلی شناخته شده است که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در جو، علت اصلی گرم شدن کره زمین است. غلظت

دی‌اکسیدکربن در هوا از 270 ppm^1 قبل از انقلاب صنعتی تا نزدیک به 400 ppm در روز افزایش یافته است [۴]. با این حال، دی‌اکسیدکربن به عنوان یک ماده‌ی پرکاربرد برای بسیاری از صنایع استفاده می‌شود. از این رو توسعه فن‌آوری‌های متنوع و کم‌هزینه برای جذب و بازیابی دی‌اکسیدکربن بسیار مهم است [۵]. بسیاری از فن‌آوری‌های مبتنی بر مواد مختلف و همچنین مکانیزم‌های متفاوتی برای جذب دی‌اکسیدکربن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ولی فن‌آوری‌هایی که هزینه‌های تجهیزاتی آنها کم، مصرف انرژی کم و دارای عملکرد بالایی باشند بسیار

¹Parts Per Million

های مکانیکی عالی دارد [۱۲]. اخیراً به دلیل افزایش تقاضا برای محصولات زیست سازگار و دوستدار محیط زیست، سلولز در تنوع گسترده‌ای از کاربردها استفاده شده است. همچنین سلولز به علت پخش-شوندگی در آب و تجزیه‌پذیری در طبیعت توسط آنزیم‌های میکروبی یا قارچی [۱۳]، غیر سمی بودن، کم بودن هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری و کاهش مصرف انرژی آن باعث شده است به عنوان یک ماده خام بالقوه در زمینه تولید فیلترهای هوا به منظور جذب دی‌اکسیدکربن استفاده شود [۱۴، ۱۵]. از روش‌های الکتروریسی، جداسازی فاز^۴، خودآرایی [۱۶]، تبخیر حلال [۱۷] و خشک‌کن انجمادی برای ساخت فیلترهای هوا استفاده می‌شود. از مزایای روش خشک‌کن انجمادی حذف مستقیم آب از محلول و ایجاد ساختار یکپارچه بدون اینکه ترک یا شکستگی در ساختار ایجاد شود. در این روش عواملی مانند غلظت پلیمر، کسر حجمی فاز پخش شده، وزن مولکولی و رشد کریستال‌های یخ طی فرایند ساخت بر تخلخل و اندازه منافذ تأثیر می‌گذارد [۱۸]. در سال‌های اخیر عمده تحقیقات و مطالعات معطوف به جایگزین کردن نانوالیاف سلولز^۷ به جای الیاف مصنوعی مثل نانوالیاف شیشه و کربن برای ساخت محصولات سازگار با محیط زیست، صورت گرفته است. نانوالیاف سلولز از جمله نانوذراتی هستند که مزایای زیادی از جمله ضخامت حدود ۱۰۰-۱۰ نانومتر و طول آنها در محدوده میکرومتر می‌باشند. این نانو مواد دارای مقاومت مکانیکی زیاد، نسبت سطح به حجم، ضریب لاغری زیاد، دانسیته کم، سهولت دسترسی، فرآوری آسان، قیمت مناسب، زیست‌تخریب‌پذیر، دارای ویژگی‌های ممانعتی بسیار خوب (عمدتاً به اکسیژن) هستند و می‌توانند با سایر مواد مخلوط و ترکیب شوند و ایجاد فیلم‌های شفاف^۸ و ساختارهای با منفذ نانو^۹ شوند.

مهم می‌باشند [۶]. یکی از راه‌های شناخته شده و اقتصادی کاهش آلودگی هوا (جذب دی‌اکسیدکربن) استفاده از فیلترهای هوا می‌باشد [۷]. استفاده از فیلترهایی که حاوی جاذب‌های محلول آلکانول-آمین‌ها و جاذب‌های جامد متعدد مانند مواد سیلیکا و کربن، چارچوب‌های فلزات آلی و پلیمرهای آلی متخلخل باشند برای جذب دی‌اکسیدکربن توسعه یافته‌اند [۸]. به ویژه، برخی از پلیمرهای آلی متخلخل به علت سطح ویژه زیاد، چگالی کم، داشتن ثبات عالی در برابر حرارت، مواد شیمیایی و آب توجه زیادی را برای ساخت فیلترهای هوا به منظور جذب دی‌اکسیدکربن به خود جلب کرده‌اند [۹]. در دهه اخیر، غشای فیبر نفاخته^۱ پلیمرهای ترموپلاستیک مانند پلی‌اتیلن^۲ و پلی‌پروپیلن^۳ یا الیاف شیشه (که از لحاظ شیمیایی سنتز شده) به عنوان شایعترین مواد اولیه مورد استفاده در تولید فیلترهای تجاری هوا می‌باشند. عیب عمده فیلترهای تجاری هوا، زیست تخریب‌پذیر نیستند و در محیط بیش از ۴۰۰ سال باقی می‌مانند زیرا پلیمرهای حاصل از نفت بسیار پایدار می‌باشند و به طور طبیعی دچار تخریب نمی‌شوند که این عامل باعث آلودگی بیشتر محیط‌زیست پس از دفع می‌شود [۱۰]. به‌طور کلی، مواد ایده آل برای جذب دی‌اکسیدکربن باید چندین مورد را برآورده سازند: (۱) ارزان بودن، (۲) یکپارچگی مکانیکی، (۳) ساختاری خوب برای غلبه بر جریان هوا برای یک زمان خاص، (۴) داشتن ظرفیت جذب زیاد و (۵) داشتن توانایی بازسازی با استفاده از رویکردهای مقرون به صرفه [۱۱]. با توجه به مباحث ارائه شده، در میان موادی که برای ساخت فیلترها استفاده می‌شود، سلولز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا سلولز فراوان‌ترین ترکیب آلی بدست آمده از توده زیستی است که در مقیاس‌های میکرومتر و نانومتر قابل دسترس می‌باشد و توانایی تشکیل ساختار شبکه‌ای را دارد. سلولز به علت ماهیت میکروفیبریلی، ویژگی-

⁴ Phase separation

⁵ Self-assembly

⁶ Solvent evaporation

⁷ Cellulose NanoFibers

⁸ Transparent films

⁹ Nanoporous structures

¹ Nonwoven Fiber Membrane

² PolyEthylene

³ PolyPropylene

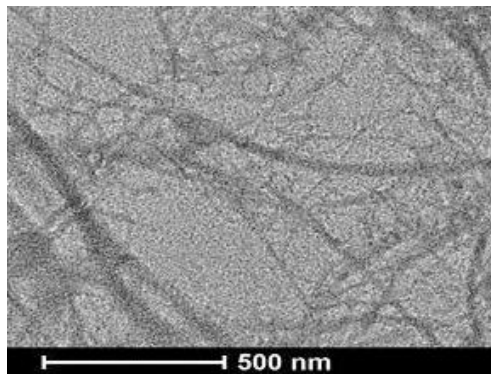
ویژه، تخلخل و اندازه منافذ) مقاومت‌های مکانیکی و میزان جذب دی‌اکسیدکربن است.

مواد و روش‌ها

مواد

نانوالیاف سلولز استفاده شده در این تحقیق به روش مکانیکی سوپر آسیاب با منبع آلفا-سلولز از دانشگاه صنعتی لویا (سوئد) به صورت ژل سفید رنگی با غلظت ۲/۲ درصد وزن خشک و با قطری کمتر از ۱۰۰ نانومتر تهیه شد. فتالیمید (۳،۱-دی‌هیدرو-۳،۱-دی‌اکسی‌ایزو ایندول؛ $C_6H_4(CO)_2NH$) برای اصلاح سطحی نانوالیاف سلولز از شرکت Merck (آلمان) تهیه گردید. همچنین از اسید استیک با خلوص ۹۹/۵ درصد از شرکت سیگما آلدریچ (آمریکا) و آب مقطر برای حل کردن فتالیمید استفاده شد.

شکل ۱ پراکنش و اندازه قطر نانوالیاف سلولز را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی انتقالی، FEI Tecnai 20 Sphera نشان می‌دهد. با توجه به تصویر میکروسکوپ الکترونی انتقالی نانوالیاف سلولز در مقیاس نانو می‌باشند، به طوری که قطر الیاف در بازه‌ی ۲۰ تا ۵۰ نانومتر بودند.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی انتقالی نانوالیاف سلولز (تهیه شده از دانشگاه صنعتی لویا (سوئد) باروش مکانیکی سوپر آسیاب).

ژل نانوالیاف سلولز با غلظت ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی، در دمای اتاق به مدت ۳ ساعت تحت همزن مغناطیسی با سرعت ۴۸۰ دور بر دقیقه برای پراکنش بهتر آن آماده شد. سپس 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. در نهایت، به منظور حذف فتالیمید که بر روی نانوالیاف سلولز قرار نگرفته بود.

این‌ها از جمله مهمترین ویژگی‌هایی است که نانوالیاف سلولز را از سایر نانو تقویت‌کننده‌ها متمایز می‌سازد و همچنین ویژگی غیرساینده (زبری کم سطح) آنها قابلیت رقابت‌پذیری با نانوالیاف مصنوعی را فراهم آورده است [۱۵]. در این پژوهش برای ساخت فیلترهای هوا از روش خشک‌کن انجمادی استفاده شد، همچنین به منظور جذب دی-اکسیدکربن، نانوالیاف سلولز با فتالیمید (۳،۱-دی-هیدرو-۳،۱-دی‌اکسی‌ایزو ایندول؛ $C_6H_4(CO)_2NH$ ، که دارای ترکیبات آمینی می‌باشد) اصلاح شد. نانوالیاف سلولز اصلاح شده می‌تواند بواسطه‌ی دارا بودن گروه‌های آمینی واکنش‌پذیر با دی‌اکسیدکربن واکنش دهد و منجر به جذب بیشتر دی‌اکسیدکربن شود و همچنین حضور گروه‌های آمینی در سطح نانوالیاف سلولز باعث پراکنش بهتر آنها می‌شود [۱۵]. با توجه به تأثیر غلظت پلیمر روی میزان تخلخل، سطح ویژه و حجم منافذ فیلترهای هوا، هدف از این پژوهش استفاده از نانوالیاف سلولز اصلاح شده با غلظت‌های مختلف و تأثیر آن بر روی خصوصیات مورفولوژیکی، میکروساختارها (سطح

اصلاح سطحی نانوالیاف سلولز

ابتدا پودر فتالیمید با نسبت ۱/۵ درصد وزنی با آب و اسید استیک با نسبت ۹۶ به ۴ درصد حجمی به ترتیب، تهیه شد. به دلیل این‌که فتالیمید خیلی حساس به حرارت مستقیم می‌باشد، بنابراین برای حل شدن آن در درون روغن گلیسرول و تحت شرایط دمایی ۸۰ درجه‌ی سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت روی هیتر قرار گرفت. سپس

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 منجمد شده توسط خشک کن انجمادی (ALPHA 1-4 LD CHRIST) تحت شرایط: دمای ۵۷- درجه‌ی سلسیوس، خلأ ۰/۱ میلی‌بار و زمان ۴۸ ساعت برای خشک شدن کامل نمونه‌ها قرار گرفت. نمونه‌های خشک شده نانوالیاف سلولز اصلاح نشده و اصلاح شده با فتالیمید برای مشاهده و اندازه‌گیری خصوصیات مورفولوژیکی، مکانیکی، میزان جذب دی-اکسیدکربن و نفوذپذیری هوا مورد استفاده قرار گرفتند.

سوسپانسیون حاصل از فتالیمید و نانوالیاف سلولز به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۲۵۰۰ دور بر دقیقه سانتریفوژ (Hermle آلمان مدل Z 36 HK) شد.

ساخت فیلتر

یک لوله تفلونی با قطر ۳۰ میلی‌متر روی سطح عرضی یک استوانه مسی با قطر ۴۰ و طول ۱۰۰ میلی‌متر ثابت شد. استوانه مسی تا یک سوم ارتفاع آن در نیتروژن مایع در دمای ۱۹۶- درجه‌ی سلسیوس قرار داده شد. سپس مخلوط‌های آماده شده (فتالیمید و نانوالیاف سلولز) به

جدول ۱- کدگذاری نمونه‌ها

توضیحات	کد نمونه‌ها
نانوالیاف سلولز خالص ۱ درصد	C
نانوالیاف سلولز ۱ درصد + فتالیمید	C1
نانوالیاف سلولز ۱/۵ درصد + فتالیمید	C2
نانوالیاف سلولز ۲ درصد + فتالیمید	C3

دانسیتته نانوالیاف سلولز (ρ_c) با استفاده از معادله زیر تعیین شد [۱۹]:

$$\text{Porosity}\% = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_c}\right) \times 100 \quad (1)$$

سطح ویژه و اندازه منافذ

سطح ویژه با استفاده از دستگاه TriStar II Micromeritics (آمریکا) با روش BET اندازه‌گیری شد. ابتدا (۰/۲-۰/۱ گرم) آئروژل‌ها درون لوله استوانه‌ای شیشه‌ای در دمای ۱۱۵ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت خشک (رطوبت زدایی) شدند. سپس لوله استوانه‌ای شیشه‌ای حاوی نمونه‌ها در دمای ۱۱۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۸ ساعت درون نیتروژن مایع با دمای ۱۹۶- درجه سلسیوس با جذب نیتروژن گاززدایی شدند. تجزیه و تحلیل BET با فشار بخار نسبی (P/P_0) از ۰-۱ در ۱۹۶- درجه سلسیوس انجام شد. میانگین قطر منافذ نمونه‌ها براساس واجذب نیتروژن با تجزیه و تحلیل BJH تخمین شد.

بررسی خصوصیات فیلترها

مورفولوژی

ریخت شناسی (مورفولوژی) آئروژل‌های نانوالیاف سلولز اصلاح نشده و اصلاح شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Phenom Prox (هلند) با ولتاژ ۱۰ کیلو وات مورد بررسی قرار گرفت. در آماده‌سازی نمونه‌ها برای تصویربرداری از سطح، ابتدا نمونه‌ها روی پایه نقره‌ای توسط چسب‌های نواری دوطرف رسانا چسبانده شدند و با دستگاه پوشش‌دهنده به مدت ۱۰ دقیقه با طلا به ضخامت ۱۵ نانومتر پوشش داده شدند.

دانسیتته و تخلخل

دانسیتته (ρ_a) با اندازه‌گیری وزن و حجم استوانه‌ای آئروژل‌ها محاسبه شد. وزن آئروژل‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم Mettler Toledo (آمریکا) اندازه‌گیری شد. ابعاد (قطر و ارتفاع) آئروژل‌ها با استفاده از کالیپر دیجیتالی (کولیس) در چهار موقعیت مختلف اندازه‌گیری شد. تخلخل آئروژل‌ها از دانسیته آئروژل‌ها (ρ_a) و

¹ Brunauer-Emmett-Teller

² Barrett-Joyner-Halender

هیدروژنی که بین خودشان وجود دارد به طور خود مختار به همدیگر متصل شده‌اند تا یک شبکه سه بعدی ایجاد شود. افزایش غلظت نانوالیاف سلولز منجر می‌شود که ساختار آئروژل‌ها فشرده‌تر و محکم‌تر شوند. ساختار متراکم‌تر در آئروژل‌های اصلاح شده نسبت به اصلاح نشده می‌تواند به دلیل حضور فتالیمید در بین زنجیره‌های نانوالیاف سلولزی باشد و باعث ایجاد ساختار صفحه ماندی^۱ می‌شود، که این باعث افزایش سطح ویژه و کاهش تخلخل می‌شود [۱۵].

دانسیته، تخلخل، سطح ویژه و اندازه منافذ

نتایج آنالیز واریانس دانسیته، تخلخل، سطح ویژه و اندازه منافذ آئروژل‌های اصلاح نشده و اصلاح شده در جدول ۲ خلاصه شده است. با افزایش غلظت نانوالیاف سلولز، دانسیته آئروژل‌های اصلاح شده و سطح ویژه افزایش یافتند، اما میزان تخلخل و اندازه منافذ کاهش یافتند (شکل ۲). غلظت نانوالیاف سلولز یکی از عواملی است که بر روی میزان تخلخل و دانسیته تأثیر می‌گذارد. به طوری که با افزایش غلظت پلیمر ساختار متراکم‌تر و فشرده‌تر می‌شود که این منجر به افزایش دانسیته و کاهش تخلخل می‌شود [۱۹، ۲۱]. سطح ویژه، اندازه منافذ و تخلخل سه پارامتر مهم در میزان جذب ذرات، کیفیت و افت فشار فیلترهای هوا می‌باشند [۲۲]. نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که غلظت نانوالیاف سلولز بر روی دانسیته، تخلخل، سطح ویژه و اندازه منافذ آئروژل‌ها در سطح اطمینان آماری ۹۵ درصد معنی‌دار بوده است. به طوری که با افزایش غلظت نانوالیاف سلولز اصلاح شده نسبت به اصلاح نشده سطح ویژه افزایش یافت، این افزایش به دلیل افزایش دانسیته و حضور فتالیمید بوده است [۱۵، ۲۳]. همچنین همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانوالیاف سلولز اصلاح شده اندازه منافذ کاهش یافت که این به دلیل دانسیته زیاد می‌باشد که باعث فشرده شدن و متراکم‌تر شدن آئروژل‌ها می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد کاهش اندازه منافذ باعث افزایش کیفیت و کاهش افت فشار فیلترهای هوا می‌باشد.

ویژگی‌های مکانیکی

مقاومت فشاری و مدول الاستیک خطی (یانگ) آئروژل‌های استوانه‌ای شکل با قطر حدود ۲۸ میلی‌متر و طول ۱۲ میلی‌متر (با تکرار ۳ نمونه) با دستگاه آزمون مدل 42 MTS Criterion (آمریکا) طبق استاندارد ASTM 685-91 با لودسل ۲۰۰ N و سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه با فشاری (ε) ۸۰ تا درصد ارتفاع نمونه‌ها انجام شدند.

اندازه‌گیری جذب دی‌اکسیدکربن

برای ارزیابی ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن آئروژل‌های نانوالیاف سلولز اصلاح شده و خالص از دی‌اکسیدکربن با غلظت ۵۰۰ ppm استفاده شد. این آزمون در یک نسبت جریان هوا با ۰/۵ لیتر بر دقیقه، در فشار ۱ بار در دمای ۲۱ درجه‌ی سانتیگراد و رطوبت نسبی ۳۰ درصد به مدت ۸ ساعت انجام شد. راندمان دی‌اکسیدکربن (η) به‌طور تجربی بر اساس غلظت ورودی و خروجی بر اساس معادله ۲ محاسبه گردید [۲۰].

آنالیز آماری

برای تحلیل داده‌ها از برنامه آماری SPSS (ورژن ۲۰،۰) استفاده شد. داده‌ها به روش تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) مورد ارزیابی قرار گرفتند و تفاوت بین میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{CO_2 out}}{C_{CO_2 in}}\right) \times 100 \quad (2)$$

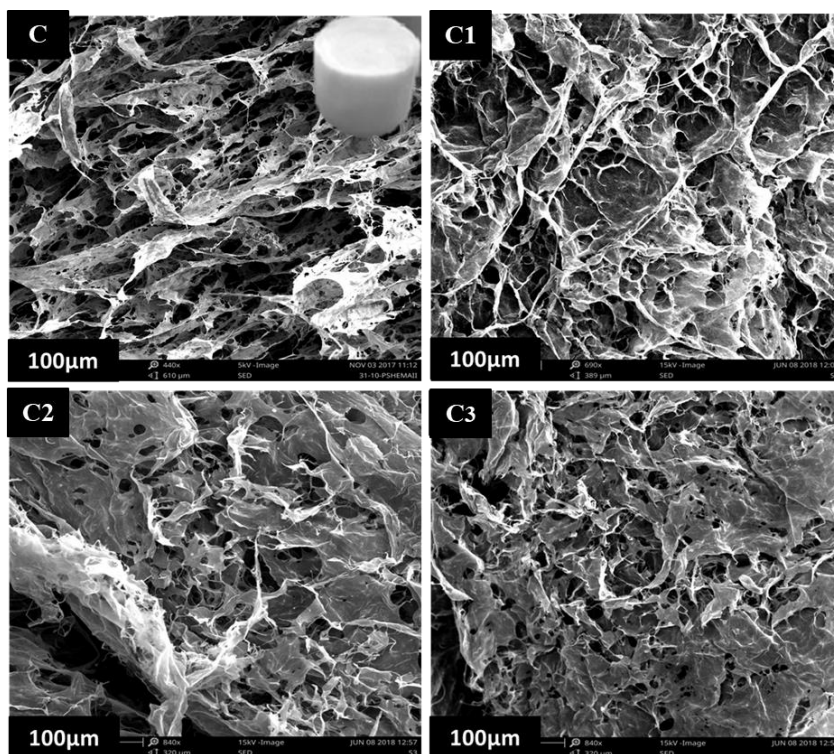
$C_{CO_2 in}$: غلظت ورودی و $C_{CO_2 out}$: غلظت خروجی.

نتایج و بحث

مورفولوژی

خصوصیات مورفولوژی آئروژل‌های اصلاح نشده و اصلاح شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد و در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همه‌ی نمونه‌ها دارای ساختار بسیار متخلخل هستند، همچنین شامل یک شبکه سلولزی یکپارچه هستند که نشان می‌دهد نانوالیاف سلولز از طریق پیوند

¹ Sheet-like



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از آنروژل‌های ساخته شده نانوالیاف سلولز خالص (C)، نانوالیاف سلولز ۱ درصد اصلاح شده با فتالیمید (C1)، نانوالیاف سلولز ۱/۵ درصد اصلاح شده با فتالیمید (C2) و نانوالیاف سلولز ۲ درصد اصلاح شده با فتالیمید (C3).

جدول ۲- دانسیته، تخلخل، سطح ویژه و اندازه منافذ آنروژل‌های اصلاح نشده و اصلاح شده نانوالیاف سلولز

گروه	دانسیته (g/cm ³)	تخلخل (%)	سطح ویژه (m ² /g)	اندازه منافذ (nm)	حجم کل منافذ (cm ³ /g)
C	۰/۰۱۳۴ ^a	۹۹/۵ ^a	۳۰۸ ^a	۱۰/۵ ^a	۰/۸۶ ^a
C1	۰/۰۱۵۷ ^b	۹۹/۱ ^b	۳۲۲ ^b	۷/۸ ^b	۰/۷۸ ^b
C2	۰/۰۱۷۶ ^c	۹۸/۵ ^c	۳۳۷ ^c	۵/۴ ^c	۰/۷۱ ^c
C3	۰/۰۱۸۴ ^d	۹۸/۳ ^d	۳۵۸ ^c	۲/۸ ^d	۰/۶۴ ^d

*حروف کوچک در هر ستون جدول نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در ($P < 0.05$)

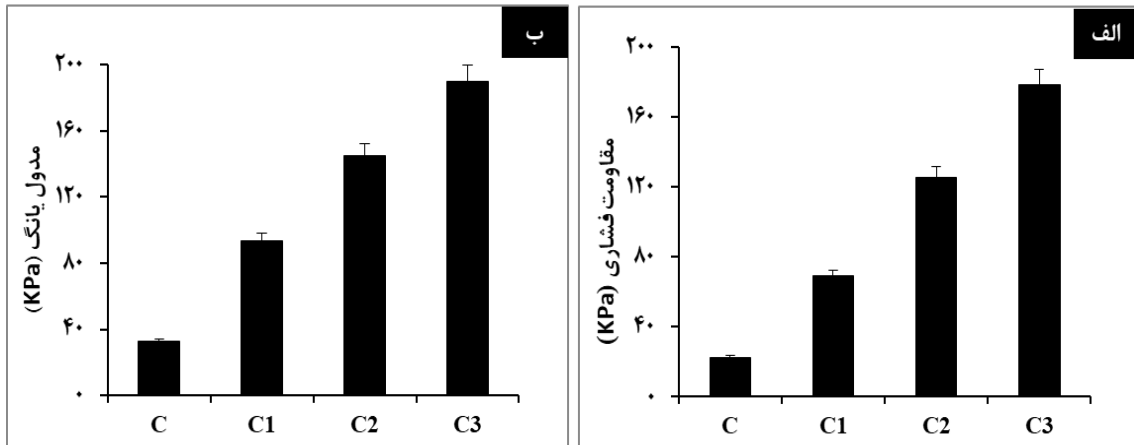
سلولز اصلاح نشده (نمونه C، ۲۲ KPa) می‌باشد (۰/۰۵) $P < 0.05$. آنروژل‌های ساخته شده با غلظت بیشتر به خاطر داشتن دانسیته بیشتر زمانی که تحت فشارهای بیشتر قرار می‌گیرند به علت شکست پیوندهای کووالانسی در قسمت‌های مزوپور تغییر شکل می‌دهند در این هنگام با توجه به تراکم ساختار متخلخل آنروژل‌ها، دیواره‌های کوچک شروع به لمس یکدیگر می‌کنند که این باعث قدرت تحمل بار بیشتر آنها می‌شود این نتایج مطابق با مطالعات قبلی در مورد آنروژل‌های نانوالیاف سلولز اصلاح شده است [۱۹، ۲۴، ۲۵]. شکل ۳ (ب) مدول ینگ در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده

ویژگی‌های مکانیکی

ویژگی‌های مکانیکی برای آنروژل‌های نانوالیاف سلولز با غلظت‌های مختلف انجام شد و نتایج به دست آمده در شکل ۳ نشان داده شده است. غلظت نانوالیاف سلولز به شدت مقاومت فشاری و مدول ینگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل ۳ (الف) مقاومت فشاری در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانوالیاف سلولز مقاومت فشاری به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نانوالیاف سلولز اصلاح شده (نمونه C3، ۱۷۸ KPa) و کمترین مربوط به نانوالیاف

منافذ دیواره‌های سلولی تحت بارگذاری و الاستیسیته بودن مواد باشد. در واقع افزایش مدول یانگ را می‌توان به تراکم زیاد و تخلخل کم آئروژل‌ها نسبت داد [۱۹].

می‌شود بیشترین مدول یانگ نمونه C3 (۱۹۰ KPa) و کمترین نمونه C (۳۲ KPa) می‌باشد ($P < 0/05$). مدول یانگ (مدول الاستیسیته) به دلیل افزایش تراکم ساختار آئروژل‌ها افزایش یافت که می‌تواند به دلیل نزدیک‌تر شدن

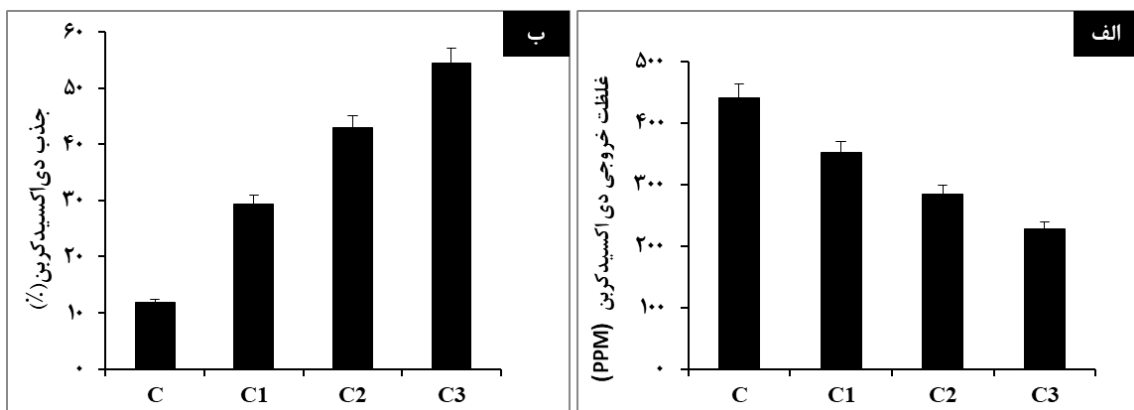


شکل ۳- تأثیر غلظت‌های مختلف نانوالیاف سلولز اصلاح شده و نشده بر ویژگی‌های مکانیکی آئروژل‌های ساخته شده. الف) مقاومت فشاری و ب) مدول یانگ.

افزایش غلظت نانوالیاف سلولز مقدار جذب دی‌اکسیدکربن نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت به طوری که بیشترین میزان جذب دی‌اکسیدکربن مربوط به نمونه C3 (۵۵ درصد) است. به‌طور کلی، افزایش غلظت نانوالیاف سلولز باعث افزایش دانسیته آئروژل‌ها می‌شود که این منجر به افزایش سطح ویژه می‌شود و هرچه سطح ویژه زیاد می‌شود میزان جذب دی‌اکسیدکربن نیز زیاد می‌شود. علاوه بر این، جایگزینی بیشتر گروه‌های آمینی فتالیمید با گروه‌های هیدروکسیل موجود بر روی سطح نانوالیاف سلولز باعث جذب بیشتر دی‌اکسیدکربن می‌شوند [۱۵].

جذب دی‌اکسید کربن

آئروژل‌های نانوالیاف سلولز به دلیل ساختار بسیار متخلخل، کاهش اندازه منافذ و سطح ویژه زیاد پتانسیل مناسبی برای فیلترهای هوا بخصوص جذب دی‌اکسیدکربن می‌باشند. شکل ۴ الف) میزان غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن از آئروژل‌های نانوالیاف سلولز در غلظت‌های مختلف را نشان داده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش غلظت نانوالیاف سلولز میزان غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن نسبت به نمونه شاهد به طور معنی‌داری کاهش یافت. شکل ۵ ب) نشان می‌دهد که با



شکل ۴- الف) غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن و ب) میزان جذب دی‌اکسیدکربن در غلظت‌های مختلف نانوالیاف سلولز

نتیجه‌گیری

از جذب دی‌اکسیدکربن نشان داد که با افزایش غلظت نانوالیاف سلولز، به خاطر حضور گروه‌های آمینی و گروه‌های هیدروکسیل بیشتر در سطح که باعث می‌شوند میزان جذب دی‌اکسیدکربن بیشتر شود، به طوری که آئروژل‌های ساخته شده با غلظت ۲ درصد دارای بیشترین میزان جذب دی‌اکسیدکربن (۵۵ درصد) بودند.

سپاسگزاری

در پایان نویسندگان این مقاله از Prof. Jos Dr. Florent Gauvin و Dr. Qingliang Yu, Brouwers ساختمان مهندسی مواد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه صنعتی آینده‌ون، هلند، همچنین Prof. Kristiina Oksman ساختمان مهندسی مواد، دانشکده فنی، دانشگاه لولئا سوئد، سوئد، به خاطر فراهم آوردن امکانات آزمایشگاهی و از مسئولین دانشگاه تهران و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو به خاطر حمایت مالی برای انجام هرچه بهتر این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

در این تحقیق برای ساخت آئروژل‌های نانوالیاف سلولز با غلظت‌های مختلف به منظور جذب دی‌اکسیدکربن از روش خشک‌کن انجمادی استفاده شد. روش خشک‌کن انجمادی باعث حذف مستقیم آب و ایجاد ساختار متخلخل به‌هم پیوسته آئروژل‌های نانوالیاف سلولز شد. مطالعه مورفولوژی آئروژل‌های نانوالیاف سلولز ساخته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که با افزایش غلظت نانوالیاف سلولز میزان تخلخل و اندازه منافذ کاهش می‌یابد اما سطح ویژه و دانسیته افزایش می‌یابد به‌طوری‌که هیچ گونه تغییری در ساختار و ابعاد الیاف مشاهده نشد. نتایج بدست آمده از آزمون BET نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی را تأیید کرد. رفتار مکانیکی آئروژل‌های ساخته شده یک هم‌بستگی قوی بین غلظت نانوالیاف سلولز با مقاومت فشاری نشان داد، به همین شکل مدول یانگ که برای آئروژل‌ها با افزایش غلظت، عدد بزرگتری داشت. همچنین نتایج به‌دست آمده

منابع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Ansaloni, L., Salas-Gay, J., Ligi, S. and Baschetti, M. G., 2017. Nanocellulose-based membranes for CO₂ capture. *Membrane Science*, 522, 216-225.
- [4] Darunte, L.A., Walton, K.S., Sholl, D.S. and Jones, C.W., 2016. CO₂ capture via adsorption in amine-functionalized sorbents. *Chemical Engineering*, 12: 82-90.
- [5] 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.
- [6] Hornbostel, M. D., Bao, J., Krishnan, G., Nagar, A., Jayaweera, I., Kobayashi, T. and Dubois, L., 2013. Characteristics of an advanced carbon sorbent for CO₂ capture. *Carbon*, 56: 77-85.
- [7] Daneleviciute, A., Katunskis, J. and Buika, G., 2009. Electrospun PVA Nanofibres for Gas Filtration Applications. *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, 6(77): 40-43.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Mahfoudhi, N. and Boufi, S., 2017. Nanocellulose as a novel nanostructured adsorbent for environmental remediation: a review. *Cellulose*, 24(3), 1171-1197.
- [12] Sehaqui, H., Morimune, S., Nishino, T. and Berglund, L.A., 2012. Stretchable and strong cellulose nanopaper structures based on polymer-coated nanofiber networks: an alternative to nonwoven porous membranes from electrospinning. *Biomacromolecules*, 13:3661-3667.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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).
- [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] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Souzandeh, H., Scudiero, L., Wang, Y. and Zhong, W. H., 2017. A disposable multi-functional air filter: paper towel/protein nanofibers with gradient porous structures for capturing pollutants of broad species and sizes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(7), 6209-6217.
- [23] Jiang, F. and Hsieh, Y. L., 2014. Amphiphilic superabsorbent cellulose nanofibril aerogels. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(18): 6337-6342.
- [24] Yang, X. and Cranston, E. D., 2014. Chemically cross-linked cellulose nanocrystal aerogels with shape recovery and superabsorbent properties. *Chemistry of Materials*, 26(20): 6016-6025.
- [25] Si, Y., Yu, J., Tang, X., Ge, J. and Ding, B., 2014. Ultralight nanofibre-assembled cellular aerogels with superelasticity and multifunctionality. *J. Nature communications*, 5 (5802): 1-9.

The effect of concentration of modified cellulose nanoFibers by phthalimide on the adsorption rate of carbon dioxide (CO₂)

Abstract

The purpose of this study is to fabricate air filters with various concentrations of cellulose nanofibres (CNFs) in order to evaluate its ability in the process of adsorbing (to adsorb) carbon dioxide (CO₂). In this study, we make use of freezing drying method for making filters with three different concentrations (1, 1.5 and 2%). SEM results show that increasing the concentration of CNFs increase the surface area but decreases the porosity and pore diameter. The results are also confirmed by the BET test. Also, mechanical properties and CO₂ adsorption test were investigated. The results show that decreasing the concentration of CNFs decreases mechanical strength and carbon dioxide adsorption such that the minimum mechanical strength and adsorption of CO₂ were for unmodified CNFs with 1% concentration and the highest adsorption of CO₂ is associated with the modified 2% concentration CNFs.

Keywords: air filters, concentration, freeze drying, cellulose nanofibers, adsorption CO₂.

S. Sepahvand¹
M. Jonoobi^{2*}
A.R. Ashori³

¹ Ph.D. student, 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 Professor, Department of chemical technologies, Iranian research organization for science and technology (IROST), Tehran, Iran

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

Received: 2019/04/11
Accepted: 2019/05/07