

اصلاح شیمیایی سطحی نانوالیاف سلولزی با فتالیمید به منظور ساخت فیلتر هوا برای جذب دی اکسید کربن

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

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

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، پست الکترونیک: mehdi.jonoobi@ut.ac.ir

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

تاریخ دریافت: آبان ۱۳۹۷ تاریخ پذیرش: آذر ۱۳۹۷

چکیده

کاربردهای نانومواد تجدیدپذیر، مانند نانوالیاف سلولزی (CNFs)، به دلیل خواص منحصر به فرد شامل: سطح ویژه بالا، ضریب لاغری بالا، زیست تخریب پذیر، دسترسی آسان و گروه‌های هیدروکسیل واکنش پذیر موجود در سطح اخیراً مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، ساخت فیلترهای نانویی تجدیدپذیر هوا با استفاده از CNFs اصلاح شده با فتالیمید می‌باشد. چون فتالیمید حاوی گروه‌های آمینی می‌باشد که برای جذب دی‌اکسید کربن لازم است. در این تحقیق از روش خشک‌کن انجمادی برای حذف مستقیم آب از ژل CNFs خالص و اصلاح شده با فتالیمید استفاده شد. همچنین خواص آئروژل‌های CNFs خالص و اصلاح شده با فتالیمید به منظور جذب دی‌اکسید کربن بررسی گردید. اصلاح CNFs با فتالیمید در اسید استیک با نسبت CNFs به فتالیمید ۱:۰، ۱:۰.۵، ۱:۱ و ۱:۱/۵ درصد وزنی انجام شد. خصوصیات شیمیایی و مورفولوژیکی CNFs اصلاح شده با تکنیک‌های مختلفی شامل SEM، FTIR-ATR، XRD و TGA بررسی شد. بررسی انجام شده توسط SEM هیچ تغییری در ابعاد و ساختار CNFs اصلاح شده نشان نداد. حضور فتالیمید با ایجاد پیک‌های جدید NH_2 ، C-N و استر (COO^-) بر روی CNFs اصلاح شده با استفاده از آزمون طیف‌سنجی ATR-FTIR تأیید شد. همچنین، نتایج TGA نشان داد که با افزایش مقدار فتالیمید، پایداری حرارتی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده واکنش‌پذیری گروه‌های عاملی فتالیمید با CNFs است. به علاوه اینکه بیشترین جذب دی‌اکسید کربن مربوط به فتالیمید ۱/۵ درصد حدود ۵۰ درصد بود.

واژه‌های کلیدی: آئروژل نانوالیاف سلولزی، فتالیمید، خشک‌کن انجمادی، گروه عاملی، جذب دی‌اکسید کربن.

مقدمه

از فیلترها می‌باشد (Daneleviciute et al., 2010). فیلترها مواد متخلخلی هستند که در فرایند جداسازی یا تغلیظ مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهمترین ویژگی فیلترها، داشتن خلل و فرج‌هایی با اندازه و ابعاد مشخص است. به همین دلیل، فیلتر را یک محیط متخلخل می‌نامند. منافذ درصد بسیار زیادی از حجم فیلتر را دربرمی‌گیرند و شبکه پیچیده‌ای از حفره‌ها را می‌سازند. فیلترها می‌توانند از مواد پلیمری و یا سرامیکی تهیه شوند. در میان موادی که برای ساخت فیلترها

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 مسئله از اهمیت بسزایی برخوردار است (Daly & Zannetti, 2007). امروزه یکی از مهمترین مسائل زیست‌محیطی در ایران مشکل آلودگی هواست. یکی از راه‌های شناخته شده و اقتصادی کاهش آلودگی هوا استفاده

پلی استایرن را با الیاف شیشه مخلوط و نانو شبکه‌هایی ساخت که بتوانند فرایند فیلتراسیون هوا را انجام دهند. این فیلترها با کاربردهای مختلف برای استفاده در یخچال، اتومبیل، محیط خانه و بیمارستان‌ها برای حذف باکتری، قارچ، بو و ترکیبات آلی فرار مورد استفاده قرار می‌گیرند (Liu *et al.*, 2017). همچنین می‌توانند نقش مؤثری در رفع مشکلات گازهای مضر مانند فرمالدئید، تولوئن و بنزن که از مبلمان، موکت، فرش، لوازم چوبی و چرمی، وسایل پلاستیکی، سطوح رنگ‌شده، لوازم آرایش و ... متصاعد می‌شوند، داشته باشند (Cooper *et al.*, 2013). در سال‌های اخیر عمده تحقیقات و مطالعات معطوف به جایگزین کردن نانوالیاف سلولزی (CNFs)^۵ به جای الیاف مصنوعی مثل نانوالیاف شیشه و کربن به‌عنوان ماده تقویت‌کننده و پرکننده برای ساخت محصولات سازگار با محیط‌زیست انجام شده است. CNFs از جمله نانو ذراتی 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، فراوری آسان، قیمت مناسب، زیست تخریب‌پذیر و دارای ویژگی‌های ممانعتی بسیار خوب (عمدتاً به اکسیژن) هستند و می‌توانند با سایر مواد مخلوط و ترکیب شوند و ایجاد فیلم‌های شفاف^۶ و ساختارهای با منفذ نانو^۷ بکنند؛ این‌ها از جمله مهمترین ویژگی‌هایی است که نانوالیاف سلولز را از سایر نانو تقویت‌کننده‌ها متمایز می‌سازد. همچنین ویژگی غیرساینده (زبری کم سطح) آنها قابلیت رقابت‌پذیری با نانوالیاف مصنوعی را فراهم آورده است. از این‌رو، در سال‌های اخیر تأثیر تقویت‌کنندگی این نانوالیاف، در پلیمرها و بیوپلیمرهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است (Cherian *et al.*, 2011; Dobreva *et al.*, 2010; Lavoine *et al.*, 2012; Nair *et al.*, 2013; Rosilo *et al.*, 2013). با توجه به موارد فوق، صنعت تهیه و تولید غشای تصفیه و فیلترهای نانویی یکی از صنایع بسیار

استفاده می‌شود، سلولز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا سلولز فراوان‌ترین ماده خام بیولوژیکی موجود در طبیعت بوده و به راحتی می‌تواند در مقیاس‌های میکرومتر و نانومتر قابل دسترس باشد و ساختار شبکه‌ای تشکیل دهد. علاوه بر اینکه سلولز یک ماده تجدیدپذیر است، یک ماده چند منظوره نیز محسوب می‌شود و به راحتی می‌تواند جایگزین بسیاری از مواد تجزیه‌ناپذیر گردد. همچنین نداشتن اثر مخرب بر روی محیط‌زیست، کم بودن هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری آن و کاهش مصرف انرژی باعث استفاده از سلولز در تولید فیلتر شده است (Saljoughi *et al.*, 2009). سلولز بصورت‌های مختلفی (استات سلولز و نانو الیاف) برای تصفیه هوا استفاده می‌شود (Daneleviciute *et al.*, 2010). در طی سال‌های اخیر، فناوری نانو با سرعت چشمگیری به یک زمینه بین‌رشته‌ای تبدیل شده و در بسیاری از موضوعات تحقیقاتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نانو ساختارها مواد پرکاربردی در صنایع مختلفی مانند الکترونیک (Wang و همکاران، ۲۰۱۰)، شیمی (Chen و همکاران، ۲۰۰۷)، مهندسی زیستی^۱ (Kijenska و همکاران، ۲۰۱۲) و کاربردهای زیست محیطی (Katepalli و همکاران، ۲۰۱۱) هستند. این نانو ساختارها به همراه پلیمرهای آلی، فلزات یا پلیمرهای غیر آلی استفاده می‌شوند. بر اساس پلیمری که با آنها ترکیب می‌شود، صورت‌بندی مورد نظر و فرایند مونتاژ نهایی، روش‌های مختلفی همانند الکتروریسی (Reneker و Doshi، ۱۹۹۵)، جداسازی فاز^۲ (Peng و همکاران، ۲۰۱۳)، قالب‌گیری انجمادی^۳ (Ding و همکاران، ۲۰۱۲) و تبخیر حلال^۴ (Dong و همکاران، ۲۰۱۲) برای ساخت چندسازه‌هایی با ماهیت نانو استفاده می‌شود. یکی از مهمترین کاربردهای نانو الیاف پلیمری استفاده از آنها در فیلتراسیون هوا بوده که در صنایع هوایی کاربرد فراوان دارند (Cooper *et al.*, 2013). به‌عنوان مثال می‌توان نانوالیاف

5- Cellulose nanofibers
6-Transparent films
7-Nanoporous structures

1- Bioengineering
2- Phase separation
3- Self assembly
4- Solvent evaporation

توانایی آنها در تشکیل پیوند هیدروژنی، نقش اصلی را در کنترل ساختار بلورین و خواص فیزیکی این ماده برعهده دارند (Klemm *et al.*, 2003). مهمترین محدودیت نانوالیاف سلولز در تولید نانوکامپوزیت‌ها، ماهیت آبدوست آن می‌باشد که باعث کاهش سازگاری بین سطحی آن با پلیمرهای غیرقطبی مانند پلی‌اولفین‌ها شده و شدت برهم‌کنش بین نانوذرات و رشته‌های پلیمر را کاهش می‌دهد. همچنین خاصیت جذب رطوبت و توده شدن نانوالیاف به دلیل ایجاد پیوندهای هیدروژنی بین رشته‌ای، از دیگر معایب نانوالیاف سلولز به حساب می‌آید (Cunha & Gandini, 2010).

یکی از معایب نانوالیاف سلولز همانند نانوکریستال‌های سلولز، توانایی پراکنش ضعیف آنها در حلال‌های آلی (آبگریز) و تمایل آنها به تجمع به دلیل تعداد زیاد گروه‌های هیدروکسیل است (Espino-perez *et al.*, 2013; Semba *et al.*, 2014). اصلاح سطحی رشته‌های نانوالیاف و نانوکریستال‌های سلولز از جمله راهکارهایی است که می‌تواند در جهت رفع این معایب مفید باشد. در این راستا، تیمارهای مختلفی مانند اکسیداسیون^۱ Habibi و همکاران (۲۰۰۶)، استری کردن^۲ Pasqumi و همکاران (۲۰۰۸)، سایلیل دار کردن^۳ Gousse و همکاران (۲۰۰۴)، آمین دار کردن^۴ Hemraz و همکاران (۲۰۱۳)، استیله کردن^۵ Ashori و همکاران (۲۰۱۴) و برای اصلاح سطحی نانوالیاف و همکاران (۲۰۱۴) و برای اصلاح سطحی نانوالیاف و نانوکریستال‌های سلولزی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به کاربرد مورد نظر، اصلاح شیمیایی نانوالیاف و نانوکریستال‌های سلولز^۶ (CNWs) را می‌توان در گروه‌های هیدروکسیل واحدهای گلوکز روی اسکلت ساختاری کریستالین انجام داد (Lam *et al.*, 2012).

با توجه به مباحث ارائه شده، در این تحقیق CNFs به

مهم می‌باشد که امکان استفاده از CNFs در آن فراهم می‌باشد. یکی از موارد عمده مصرف، فیلترهای نانویی برای تصفیه آلاینده‌های هوا می‌باشد که گام مؤثری در حفظ محیط‌زیست و صرفه‌جویی در انرژی است. فیلترهای نانویی می‌توانند تقریباً منابع آلوده‌کننده هوا را که شامل مونواکسیدکربن، اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای ازت و ذرات معلق هوا می‌باشد، حذف کنند. از دیگر مزایای استفاده از فیلترهای نانویی در تصفیه هوا، پایین بودن هزینه تصفیه و در مجموع نیاز نداشتن به افزودن مواد شیمیایی زیان‌آور برای محیط‌زیست و انسان است. تحقیقات نشان داده است که غشاء نانو فیبر دارای ساختار بسیار متخلخل با سطح بالاست و چون ضخامت کم و تخلخل زیادی دارد، می‌تواند شار بیشتری داشته باشد و ذرات ریز را جذب کند. داشتن مقاومت مکانیکی بالا، وزن اولیه کم و قطر کوچک رشته‌های آن، امکان فیلتراسیون ذرات با ابعاد میکرون و کوچک‌تر از میکرون موجود در گاز، دود و آب را فراهم کرده است (Chen *et al.*, 2011; Spence *et al.*, 2011).

الیاف سلولز از نانوالیاف بزرگ‌تر هستند و فضای خالی بیشتری بین الیاف سلولز وجود دارد که منجر به ورود و عبور آلودگی‌ها شده، بنابراین استفاده از الیاف سلولز موجب کم شدن بازدهی فیلتر می‌شود (Baker, 2004). با استفاده از نانوالیاف تولید شده بر روی سطح فیلترهای غیرسلولزی و یا تولید فیلترهای تمام سلولزی نانویی، ذرات و آلودگی‌های با اندازه کمتر از میکرومتر بر روی سطح فیلترها قرار گرفته و از عبور آن از فیلتر جلوگیری می‌کند (Sivakumar *et al.*, 2006). همچنین پژوهشگران بر این باورند که استفاده از نانوالیاف سلولزی به‌عنوان آئروژل می‌تواند آلاینده‌های هوا را با قدرت ۱۳۰ برابر بیشتر از کربن فعال جذب کند (Chong *et al.*, 2015). آئروژل‌های تولید شده از نانو الیاف، اندازه حفره‌های خیلی کوچکی دارند و متخلخل این غشاها زیاد است، در نتیجه بازده فیلتراسیون در آنها بالاست (Sivakumar *et al.*, 2006). یکی از مشخصه‌های ویژه سلولز این است که هریک از منومرهای آن دارای سه گروه هیدروکسیل می‌باشد؛ این گروه‌های هیدروکسیل و

1- Oxidation
2- Esterification
3- Silylation
4- Amination
5- Acetylation
6- Cationization
7- Cellulose Nanowhiskers

HK) شد. به منظور حذف فتالیمید که بر روی CNFs قرار نگرفته بود، در مرحله بعد محلول آماده شده درون تفلون بر روی استوانه مسی درون نیتروژن مایع در دمای ۱۹۶- درجه سلسیوس قرار گرفت. نمونه‌های منجمد شده توسط خشک‌کن انجمادی (فریز درایر) مدل Alpha ۱-۴ LD plus شرکت کریست آلمان در شرایط دمای ۵۷- درجه سلسیوس، خلا ۰/۱ میلی‌بار و زمان ۴۸ ساعت قرار گرفت. نمونه‌های خشک شده برای اندازه‌گیری خصوصیات مورفولوژیکی سطح الیاف CNFs خالص و اصلاح شده با فتالیمید مورد استفاده قرار گرفت.

میکروسکوپ الکترونی روبشی

ریخت‌شناسی (مورفولوژی) آتروژل‌های CNFs اصلاح شده و خالص توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Phenom Prox (هلند) با ولتاژ ۱۰ کیلووات مورد بررسی قرار گرفت. در آماده‌سازی نمونه‌ها برای تصویربرداری از سطح، ابتدا نمونه‌ها را روی پایه نقره چسبانده و بعد با دستگاه پوشش‌دهنده به مدت ۱۰ دقیقه با طلا به ضخامت ۱۵ نانومتر پوشش داده شدند.

طیف‌سنجی زیر قرمز تبدیل فوریه-انعکاسی کل تضعیف شده^۱ (ATR-FTIR)

برای تأیید اصلاح ساختار CNFs از طیف‌سنجی FTIR استفاده شد. این نوع طیف‌سنجی ابزار بسیار مفیدی برای شناسایی گروه‌های عاملی ترکیبات آلی است. بدین منظور از دستگاه طیف‌سنج زیر قرمز تبدیل فوریه ساخت کمپانی PerkinElmer آمریکا مجهز به ATR مدل Spectrum 400 استفاده شد. کلیه طیف‌ها در این تحقیق به روش طیف‌سنجی انعکاسی کل تضعیف شده مادون قرمز تبدیل فوریه و طی ۱۶ پیمایش با قدرت تفکیک 4 cm^{-1} در محدوده 400 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} ثبت شد. قبل از هر آنالیز، طیف هوا برای حذف طیف زمینه اندازه‌گیری شد.

دلیل ویژگی‌های مقاومتی بالاتر، پراکنش بهتر و همچنین وجود گروه‌های هیدرکسیل و اکشن پذیر در سطح نسبت به سایر نانوالیاف پلیمری ترجیح داده شد. ضمناً به منظور اصلاح خواص سطحی، CNFs با فتالیمید (۳،۱-دی-هیدرو-۳،۱-دی‌اکسی‌ایزو ایندول; $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CO})_2\text{NH}$) که دارای ترکیبات آمینی مناسب می‌باشد) آمین‌دار شد. واکنش آمین‌دار کردن از دو جهت حائز اهمیت می‌باشد: اول آنکه پراکنش CNFs را تقویت می‌کند و دوم اینکه CNFs اصلاح شده می‌تواند به دلیل دارا بودن گروه‌های آمینی واکنش پذیر که منجر به واکنش بین گروه‌های آمینی و دی‌اکسید کربن می‌شود، باعث جذب بیشتر دی‌اکسید کربن شود.

مواد و روش‌ها

CNFs با غلظت ۲/۲ درصد وزن خشک از دانشگاه صنعتی لویلا (سوئد) تهیه شد. فتالیمید (۳،۱-دی‌هیدرو-۳،۱-دی‌اکسی‌ایزو ایندول; $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CO})_2\text{NH}$) برای اصلاح سطحی CNFs از شرکت Merck (آلمان) خریداری شد. همچنین از اسید استیک با خلوص ۹۹/۵ درصد از شرکت سیگما آلد ریچ (آمریکا) برای حل کردن فتالیمید استفاده شد.

اصلاح سطحی CNFs

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 آنجایی که فتالیمید خیلی حساس به حرارت مستقیم می‌باشد، از این رو برای حل شدن آن در درون روغن گلیسرول و در شرایط دمایی ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت روی هیتر قرار گرفت. سپس ژل CNFs با غلظت ۱ درصد وزنی، در دمای اتاق به مدت ۳ ساعت تحت همزن مغناطیسی با سرعت ۴۸۰ دور بر دقیقه آماده شد. آنگاه محلول فتالیمید به ژل CNFs در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت تحت همزن مغناطیسی با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه تهیه شد. pH محلول بر روی ۴ تنظیم شد. محلول حاصل از فتالیمید- CNFs برای مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۲۵۰۰ دور بر دقیقه سانتریفوژ (Hermle آلمان مدل Z 36

آزمون پراش پرتو ایکس^۱

بازدهی CO₂ (η) به طور تجربی بر اساس غلظت ورودی و خروجی بر اساس رابطه ۲ محاسبه گردید.

رابطه (۲)

$$\eta = \frac{C_{CO_2in} - C_{CO_2out}}{C_{CO_2in}} \times 100$$

C_{CO₂in}: غلظت ورودی

C_{CO₂out}: غلظت خروجی

نتایج

SEM مورفولوژی CNFs خالص و اصلاح شده با فتالیمید خصوصیات مورفولوژی آئروژل‌های CNFs خالص و اصلاح شده با SEM بررسی شد و در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۲ (الف) سطح CNFs خالص را نشان می‌دهد. CNFs خالص دارای سطح خیلی صاف می‌باشند، همچنین ماتریس متخلخلی دارند، همان‌طور که مشاهده می‌شود الیاف پراکنش خوبی داشته‌اند، یعنی کلوخه نشده‌اند. شکل ۱ (ب) مورفولوژی سطح CNFs بعد از اصلاح با فتالیمید ۰/۵ درصد را نشان می‌دهد و همان‌طور که مشاهده می‌شود هیچ تغییر معنی‌داری در ساختار و سطح الیاف که با فتالیمید تیمار شده‌اند مشاهده نمی‌شود. شکل ۱ (پ) مورفولوژی سطح CNFs اصلاح شده با فتالیمید ۱ درصد را نشان می‌دهد. به طوری که با افزایش فتالیمید معنی‌داری در سطح الیاف مشاهده شد. در واقع سطح الیاف به‌طور یکنواخت اصلاح شده‌اند و مقدار خلل و فرج و اندازه منافذ کم شده است، همچنین شکل الیاف به‌صورت Sheet-like توسعه یافته‌اند. شکل ۱ (ت) مورفولوژی سطح CNFs اصلاح شده با فتالیمید ۱/۵ درصد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار فتالیمید (۱/۵ درصد)، فتالیمید بیشتری در درون الیاف CNFs قرار گرفته است و باعث بیشتر شدن ساختار Sheet-like شده است که این باعث افزایش سطح ویژه و کاهش خلل و فرج می‌شود.

به منظور مطالعه ساختار CNFs قبل و بعد از اصلاح از آزمون پراش پرتو ایکس استفاده شد. بدین منظور از دستگاه Bruker AXS X-ray diffractometer مدل D2 PHASER Bruker, Massachusetts مجهز به منبع تابش Co-K α ، یا طول موج ۰/۱۷۹ نانومتر، یک آینه سهموی چندلایه در پرتو اولیه و یک تکفام ساز ۲ گرافیت ثانویه استفاده گردید. نمونه‌ها با استفاده از گام ۲ تتا با رنجی از ۱۰ تا ۵۰ درجه و زمان ماندگاری ۲ ثانیه اندازه‌گیری شدند. درصد بلورینگی CNFs بر اساس روش Segal محاسبه شد (Segal *et al.*, 1995).

$$I_c(\%) = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

I_c: درصد بلورینگی

I₀₀₂: شدت طول موج در منطقه کریستالین

I_{am}: شدت طول موج در منطقه بی‌شکل

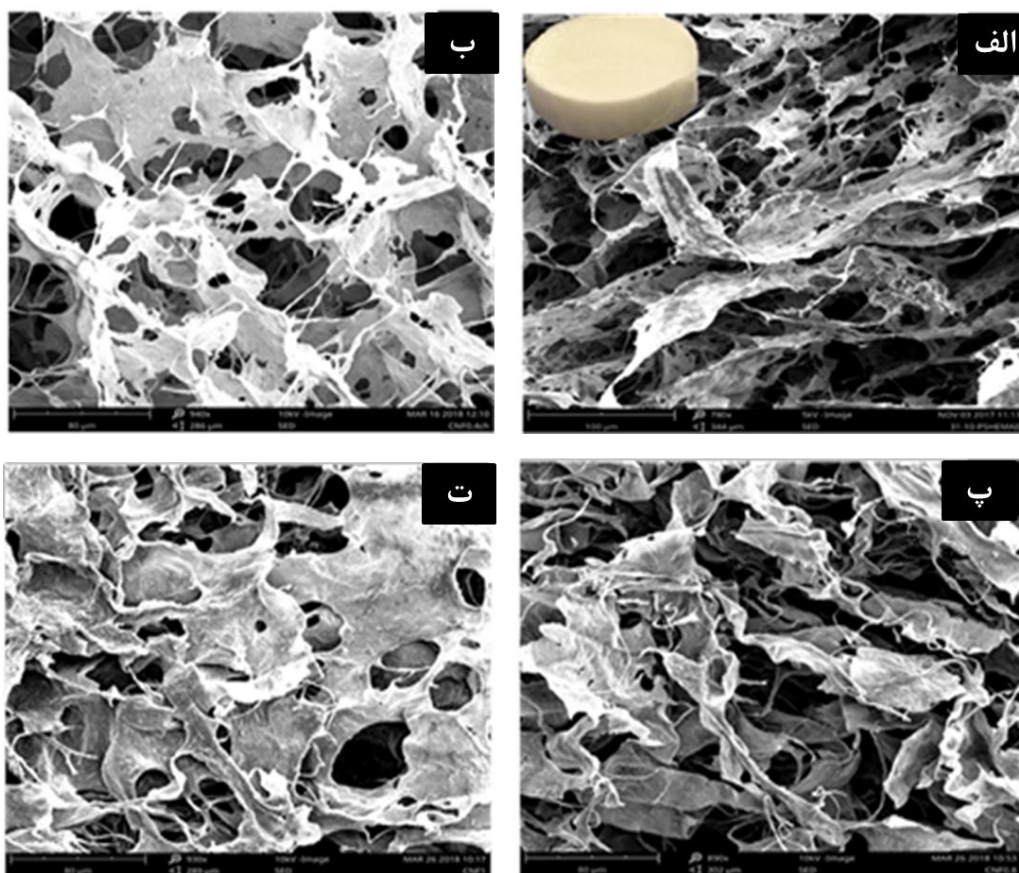
آزمون وزن‌سنجی حرارتی (TGA)

میزان پایداری CNFs اصلاح شده و خالص در برابر حرارت با استفاده از آزمون وزن‌سنجی حرارتی در گستره دمایی ۴۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس و با میزان حرارت‌دهی ۱۰°C/min در محیط نیتروژن توسط دستگاه Ta Q500 شرکت آمریکا با وزنی بین ۱۲ تا ۱۵ میلی‌گرم مورد بررسی قرار گرفت.

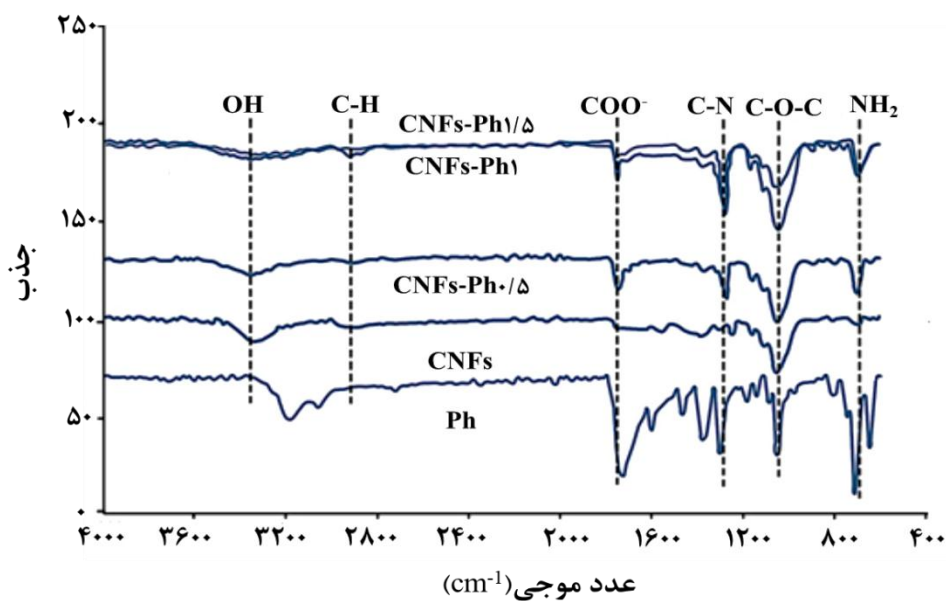
اندازه‌گیری جذب دی‌اکسید کربن (CO₂)

برای ارزیابی ظرفیت جذب CO₂ آئروژل‌های CNFs اصلاح شده و خالص از CO₂ 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 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۰ درصد به مدت ۸ ساعت انجام شد.

1-X-ray diffraction (XRD)
2- Monochromator



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری: الف). CNFs خالص، ب). CNFs اصلاح شده با فتالیمید ۵/۰٪، پ). CNFs اصلاح شده با فتالیمید ۱٪، ت). CNFs اصلاح شده با ۵/۱٪.



شکل ۲- طیف ATR-FTIR نانوالیاف سلولزی خالص و اصلاح شده با فتالیمید

طیف‌سنجی زیر قرمز - تبدیل فوریه

به منظور توصیف ساختار شیمیایی و همچنین تأیید پیوند فتالیمید روی CNFs طیف مادون قرمز مربوط به CNFs قبل و بعد از اصلاح گرفته شد. نتایج طیف‌سنجی در شکل ۲ نشان داده شده است. در CNFs اصلاح شده پیک‌های در محدوده ۱۷۵۰-۱۷۴۰، ۱۲۷۳-۱۲۷۰ و ۷۹۰-۷۸۰ بر سانتی‌متر، به ترتیب مربوط به باندهای استری (COO⁻)، کششی (C-N) و خمشی (NH₂) ظاهر شد؛ بنابراین ظاهر شدن سه پیک جدید در CNFs اصلاح شده وجود گروه‌های عاملی فتالیمید را روی CNFs نشان می‌دهد و بیانگر آن است که فتالیمید به طور موفقیت‌آمیزی روی سطح نانوالیاف سلولز پیوند زده شده است.

آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)

کریستال‌های سلولز همانند کریستال‌های مواد دیگر دارای شناسنامه مخصوص به خود هستند. یکی از

مشخصه‌های بارز کریستال‌های سلولز نوع و تعداد پیک‌های آن در الگوی پراش پرتو ایکس است. ساختار بلورین CNFs توسط پراش اشعه X برای تعیین اثرهای اصلاح مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۳ منحنی پراش پرتو ایکس CNFs را قبل و بعد از اصلاح از زاویه θ^2 ۱۰ تا ۵۰ درجه نشان می‌دهد. درصد بلورینگی CNFs اصلاح شده و خالص بر اساس رابطه ۱ به دست آمد. جدول ۱ درصد بلورینگی برای CNFs خالص و اصلاح شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود درصد بلورینگی CNFs خالص ۷۶ درصد است و با اصلاح کردن CNFs با فتالیمید، به دلیل جایگزینی گروه‌های OH نانوالیاف سلولز با گروه‌های آمینی فتالیمید مقدار درصد بلورینگی کاهش یافت؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تیمار آمین‌دار کردن توسط فتالیمید روی ساختار کریستالین سلولز تأثیر معنی‌داری داشته است.

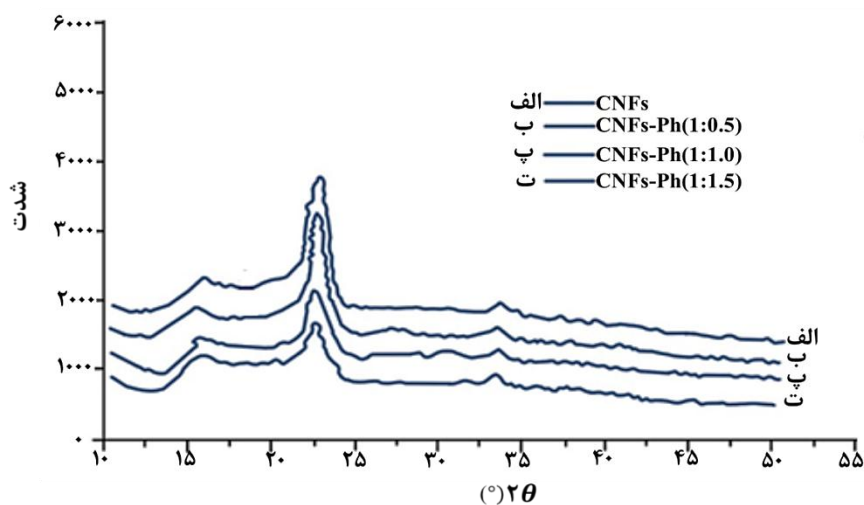
جدول ۱- درصد بلورینگی آئروژل‌های CNFs خالص و اصلاح شده

ردیف	توضیح	تیمارها	درصد بلورینگی (%)
۱	نانوالیاف سلولز	CNFs	۷۶
۲	نانوالیاف سلولز + ۰/۵ درصد فتالیمید	CNFs-Ph0.5	۷۴
۳	نانوالیاف سلولز + ۱/۰ درصد فتالیمید	CNFs-Ph1.0	۶۸/۷
۴	نانوالیاف سلولز + ۱/۵ درصد فتالیمید	CNFs-Ph1.5	۶۵/۲

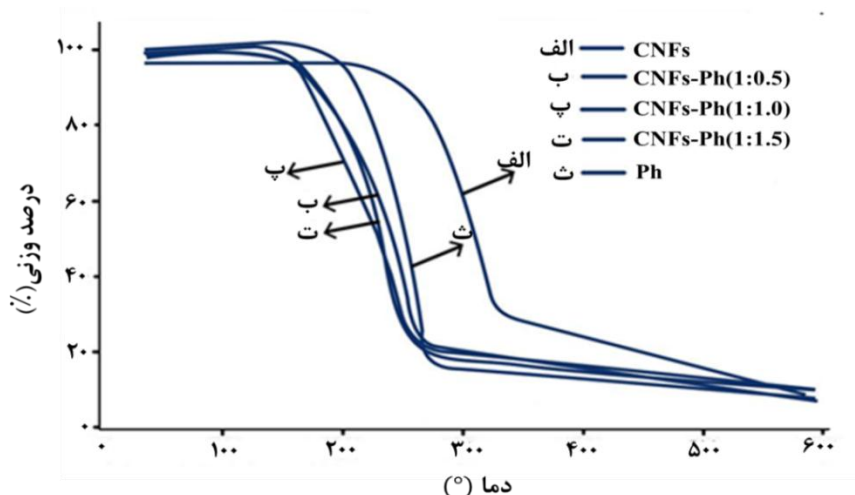
آزمون تجزیه حرارتی

در شکل ۴ آزمون مربوط به TGA برای آئروژل‌های CNFs خالص و اصلاح شده با درصد‌های مختلف فتالیمید نشان داده شده است. TGA در CNFs خالص در دو مرحله کاهش وزن داشت. مرحله کاهش وزن اولیه در دمای کمتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس و مرحله دوم کاهش وزن بین ۲۵۰ - ۳۳۰ درجه سلسیوس به دلیل پیرولیز CNFs اتفاق افتاد

که در این مرحله CNFs به طور کامل دچار تجزیه و تخریب کامل شد. کاهش وزن اولیه در CNFs اصلاح شده با فتالیمید تقریباً در ۱۵۰ درجه سلسیوس اتفاق افتاد. در واقع افزایش مقدار فتالیمید سبب کاهش تجزیه حرارتی می‌شود، زیرا تجزیه حرارتی فتالیمید خالص در دمای کمتر از ۲۵۰ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتاد.



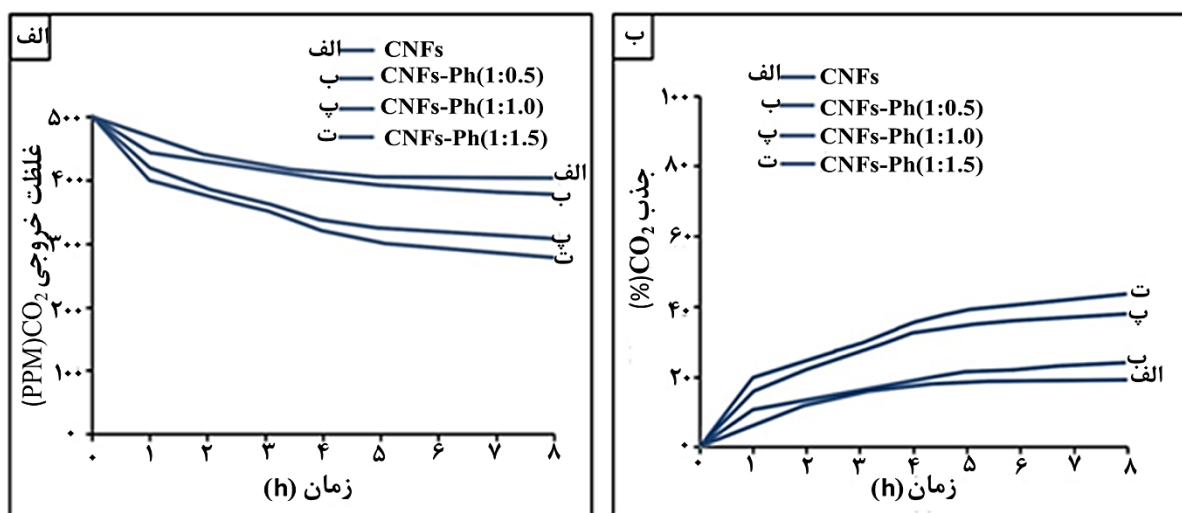
شکل ۳- طیف XRD نانوالیاف سلولزی خالص و اصلاح شده با فتالیمید



شکل ۴- منحنی TGA نانوالیاف سلولزی خالص و اصلاح شده با فتالیمید

آئروژل‌های CNFs را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده شد که میزان جذب CO_2 برای CNFs خالص ۱۹/۲ بود، این مقدار جذب به دلیل گروه‌های هیدروکسیل موجود بر روی CNFs بود که باعث جذب CO_2 می‌شوند. به‌طورکلی، با افزایش زمان میزان غلظت خروجی CO_2 کاهش یافت و میزان جذب آن افزایش یافت، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اثربخشی و بازدهی مواد در طول زمان بیشتر می‌شود.

آزمون اندازه‌گیری جذب CO_2 آئروژل‌های CNFs به دلیل ساختار منحصر به فرد و متخلخل توان مناسبی برای فیلترهای هوا به‌ویژه جذب دی-اکسید کربن دارند. شکل ۵ (الف) میزان غلظت خروجی CO_2 از آئروژل‌های CNFs خالص (بدون فتالیمید) و اصلاح شده با فتالیمید را در زمان‌های مختلف نشان داده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار فتالیمید زمان غلظت خروجی CO_2 کاهش یافته است. شکل ۵ (ب) مقدار جذب CO_2 با افزایش مقدار فتالیمید و زمان در



شکل ۵- (الف) غلظت خروجی CO_2 خشک در CNFs خالص و اصلاح شده با فتالیمید و (ب) میزان جذب CO_2 در CNFs خالص و اصلاح شده با فتالیمید

بحث

بزرگ‌ترین پیک سلولوز نوع I در *et al.*, 2013). همچنین، زاویه پراش بین ۲۲/۵ درجه پدیدار شد (Nazir *et al.*, 2013). نتایج TGA نشان داد که مرحله اولیه کاهش وزن در دمای کمتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس به دلیل بخار شدن گروه‌های آب اتفاق افتاد (Wei *et al.*, 2013; Kumer *et al.*, 2006; Arbelaiz *et al.*, 2014). علاوه بر این، افزایش کاهش وزن در فتالیمید نسبت به CNFs (حدود ۲۵۰ درجه سلسیوس) به دلیل وجود گروه‌های آمینی می‌باشد، زیرا این گروه‌ها معمولاً باعث کاهش پایداری حرارتی می‌شوند (Li *et al.*, 2017). برای شکستن باندهای هیدروکسیل نسبت به باندهای آنیونی نیاز به انرژی بیشتری می‌باشد. چون گروه‌های هیدروکسیل بر روی سطح CNFs طی اصلاح شیمیایی سطحی با گروه‌های آمینی (NH_2) فتالیمید واکنش داده‌اند، به همین دلیل با کاهش گروه‌های هیدروکسیل، پایداری حرارتی آئروژل‌های CNFs اصلاح شده کمتر از CNFs خالص است. در واقع، با افزایش مقدار فتالیمید پایداری حرارتی بیشتر کاهش یافته است که این می‌تواند به دلیل واکنش بیشتر فتالیمید با CNFs باشد. در واقع گروه‌های آمینی بیشتری بر روی سطح CNFs اصلاح شده قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمون جذب CO_2 بعد از

سیگنال‌های در محدوده ۱۶۰۰ بر سانتی‌متر، مربوط به ارتعاش کششی باندهای C=C در حلقه آروماتیکی و سیگنال‌های ۳۳۰۵ و ۱۷۱۳ بر سانتی‌متر به ترتیب به باندهای ارتعاش کششی NH امید نوع دوم و باندهای C=O فتالیمید خالص نسبت داده شد. گروه‌های هیدروکسیل در طیف CNFs اولیه مشاهده گردید (Marzbani *et al.*, 2016). پیک در محدوده ۳۳۴۸ بر سانتی‌متر، مربوط به کشش گروه‌های OH ظاهر شد. اگرچه نمونه‌های FTIR خشک شد، اما حذف کامل آب جذب شده در مولکول‌های سلولوز به دلیل واکنش سلولوز-آب دشوار بود (Han *et al.*, 2013). پیک در محدوده ۲۹۰۱ بر سانتی‌متر، مربوط به ارتعاش کششی باند CH در گروه‌های سلولزی CNFs قبل و بعد از اصلاح بود (Gebald *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2014). براساس نتایج آزمون XRD ملاحظه شد که پیک‌های اصلی سلولوز بین زاویه پراش ۱۰ تا ۵۰ درجه و به تعداد ۳ پیک در زوایای پراش ۱۶، ۲۲/۵ و ۳۴/۵ درجه پدیدار می‌شوند که این حالت مخصوص سلولوز نوع I و مربوط به صفحات کریستالوگرافی (۱۰۱)، (۰۰۲) و (۰۴۰) است (Sun *et al.*, 1999; Ngaadi & Lam, 2014; Tian

حمایت مالی برای انجام هرچه بهتر این پژوهش، تشکر و قدردانی نمایم.

منابع مورد استفاده

- Arbelaiz, A., Fernandez, B., Ramos, J. and Mondragon, I., 2006. Thermal and crystallization studies of short flax fiber reinforced polypropylene matrix composites: Effect of treatments. *Thermochimica Acta*, 440(2): 111–121.
- Ashori, A., Babae, M., Jonoobi, M. and Hamzeh, Y., 2014. Solvent-free acetylation of cellulose nanofibers for improving compatibility and dispersion. *Carbohydrate polymers*, 102(1): 369–375.
- Baker, R.W., 2004. Membranes and modules: 97-178. In: Wiley, J. (Eds.). *Membrane Technology and Application*. Wiley online Library, USA, 118p.
- Chen, L., Bromberg, L., Hatton, T.A. and Rutledge, G.C., 2007. Catalytic hydrolysis of p-nitrophenyl acetate by electrospun polyacrylamidoxime nanofibers. *Polymer*, 48(16): 4675–4682.
- Chen, W., Yu, H., Liu, Y., Chen, P., Zhang, M. and Hai, Y., 2011. Individualization of cellulose nanofibers from wood using high-intensity ultrasonication combined with chemical pretreatments. *Carbohydrate Polymers*, 83(4): 1804–1811.
- Cherian, B.M., Leao, A.L., Souza, S.F., Costa, L.M.M., Olyveira, G.M. and Kottaisamy, M., 2011. Cellulose nanocomposites with nanofibres isolated from pineapple leaf fibers for medical applications. *Carbohydrate Polymers*, 86(4): 1790–1798.
- Chong, L., Po-Chun, H., Hyun-Wook, L., Meng, Y., Guangyuan, Z., Nian, L., Weiyang, L. and Yi, C., 2015. Transparent air filters for high-efficiency PM_{2.5} capture. *Naturecommunications*, 1(10): 1038–1045.
- Cooper, A., Oldinski, R., Ma, H., Bryers, J.D. and Zhang, M., 2013. Chitosan-based nanofibrous membranes for antibacterial filter applications. *Carbohydrate Polymers*, 92(1): 254–259.
- Cunha, A.G. and Gandini, A., 2010. Turning polysaccharides into hydrophobic materials: a critical review. Part 1. Cellulose. *Cellulose*, 17(5): 875–889.
- Daneleviciute, A., Katunskis, J. and Buika, G., 2009. Electrospun PVA Nanofibres for Gas Filtration Applications. *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, 6(77): 40–43.
- Daly, A. and Zannetti, P., 2007. An Introduction to Air Pollution—Definitions, Classifications, and History. Chapter 1 of ambient air pollution. In: Zannetti, P.,

اصلاح CNFs با فتالیمید نشان داد که با افزایش مقدار فتالیمید میزان جذب CO₂ افزایش یافت، به طوری که با میزان فتالیمید ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد میزان جذب CO₂ به ترتیب ۲۴/۴، ۳۸/۲ و ۵۰ درصد اندازه گیری شد. در واقع بیشترین جذب CO₂ مربوط به فتالیمید ۱/۵ درصد بود که این می تواند به دلیل افزایش گروه های آمینی، باندهای C=O و افزایش سطح ویژه که باعث جذب بیشتر CO₂ شده باشد. براساس نتایج حاصل از تحقیقات بیشترین جذب CO₂ مربوط به CNFs اصلاح شده ۲۸ درصد گزارش شده است (Gebald *et al.*, 2011).

در این پژوهش برای اولین بار فتالیمید برای اصلاح سطحی CNFs به منظور جذب CO₂ انجام شد. از روش خشک کن انجمادی برای حذف مستقیم آب از ژل CNFs خالص و اصلاح شده با فتالیمید استفاده شد. نتایج طیف سنجی ATR-FTIR، CNFs اصلاح شده نشان داد که سه پیک جدید COO⁻، C-N و NH₂ وجود دارد که حضور گروه های عاملی روی سطح CNFs را نشان می دهد و بیانگر آن است که فتالیمید به طور موفقیت آمیزی روی سطح CNFs پیوند زده شده است. نتایج SEM نشان داد که مورفولوژی سطح CNFs بعد از اصلاح تغییر یافت و این تغییرات واکنش بین فتالیمید و CNFs را تأیید کرد، همچنین سطح ویژه افزایش یافت و اندازه منافذ کاهش یافت. نتایج حاصل از TGA نشان داد که پایداری حرارتی با افزایش مقدار فتالیمید به دلیل جایگزینی گروه های هیدروکسیل CNFs با گروه های NH₂ فتالیمید کاهش پیدا کرد. به طور کلی با افزایش زمان مقدار فتالیمید میزان جذب CO₂ افزایش یافت. به طوری که در غلظت ۵۰۰ ppm CO₂ در هوا، سرعت عبور هوای ۰/۵ لیتر بر دقیقه، فشار ۱ بار و دمای ۲۱ درجه سلسیوس میزان جذب CO₂ بعد از ۸ ساعت با افزایش مقدار فتالیمید (۱/۵ درصد) به ۵۰ درصد رسید.

سپاسگزاری

در پایان بر خود لازم می دانیم از مسئولان محترم دانشگاه تهران و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو به دلیل

- 171(3): 1194–1200.
- Kijenska, E., Prabhakaran, M.P., Swieszkowski, W., Kurzydowski, K.J. and Ramakrishna, S., 2012. Electrospun bio-composite (PLLA-CL)/collagen I/collagen III scaffolds for nerve tissue engineering. *J. Bio. J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 100(4), 1093–1102.
- Klemm, D., Heublein, B. and Fink, H.P., 2005. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22): 3358–3393.
- Kumar, A., Negi, Y.S., Choudhary, V. and Bhardwaj, N.K., 2014. Characterization of cellulose nanocrystals produced by acidhydrolysis from sugarcane bagasse as agro-waste. *Materials Physics and Chemistry*, 2(1): 1–8.
- Lam, E., Male, K.B., Chong, J.H., Leung, A.C.W. and Luong, J.H.T., 2012. Applications of functionalized and nanoparticle-modified nanocrystalline cellulose. *Trends in Biotechnology*, 30(5): 283–290.
- Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A. and Bras, J., 2012. Microfibrillated cellulose, their barrier properties and applications in cellulosic materials: a review. *Carbohydr*, 90(2). 735–748.
- Li, N., Wang, H., Qu, X. and Chen, Y., 2017. Synthesis of poly (norbornene-methylamine), a biomimetic of chitosan, by ring-opening metathesis polymerization (ROMP). *Marine Drugs*, 15(7). 1–9.
- Liu, X., Souzandeh, H., Zheng, Y., Xie, Y., Zhong, W. H., & Wang, C. 2017. Soy protein isolate/bacterial cellulose composite membranes for high efficiency particulate air filtration. *Composites Science and Technology*, 138, 124-133.
- Marzbani, P., Resalati, H., Ghasemian, A. and Shakeri, A., 2016. Surface modification of talc particles with phthalimide: study of composite structure and consequences on physical, mechanical, and optical properties of deinked pulp. *Bioresource*, 11(4): 8720–8738.
- Nair, S.S., Zhu, J.Y., Deng Y. and Ragauskas, A.J., 2013. Hydrogels prepared from cross-linked nanofibrillated cellulose. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2 (4): 772–780.
- Nazir, M.S, Wahjoedi, B.A., Yussof, A.W. and Abdullah, M.A., 2013. Eco-friendly extraction and characterization of cellulose from oil palm empty fruit bunches. *Bioresources*, 8(2): 2161–2172.
- Ngadi, N.N. and Lani, S., 2014. Extraction and characterization of cellulose from empty fruit bunch (EFB) fiber. *Sciences & Engineering*. Vol 68(5). 35–39.
- Pasquini, D., Teixeira, E.D.M., Curvelo, A.A.D.S., Belgacem, M.N. and Dufresne, A., 2008. Surface esterification of cellulose fibres: processing and characterization of low-density polyethylene/cellulose .Fibers composite. *Composite Science and*
- Al-Ajmi, D. and Al-Rashied, S., (Eds). *The Arab School for Science and Technology (ASST) and the EnviroComp Institute.* 358P.
- 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.
- Dobrevá, T., Benavente, R., Perena, J.M., Perez, E., Avella, M. and Garcia, M., 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.
- Dong, Y., Wang, M., Chen, L. and Li, M., 2012. Preparation, characterization of P(VDF-HFP)/[bmim]BF₄ ionic liquids hybrid membranes and their pervaporation performance for ethyl acetate recovery from water. *Desalination*, 295: 53–60.
- Doshi, J. and Reneker, D. H., 1995. Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *Electrostatics*, 35(2-3): 151–160.
- Espino-Perez, 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*, 49(10): 3144–3154.
- Gebald, C., Wurzbacher, J.A., Tingaut, P., Zimmermann, T. and Steinfeld, A., 2011. Amine-based nanofibrillated cellulose as adsorbent for CO₂ capture from air. *Environmental Science & Technology*, 45(20): 9101–9108.
- 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.
- Habibi, Y., Chanzy, H. and Vignon, M.R., 2006. TEMPO-mediated surface oxidation of cellulose whiskers. *Cellulose*, 13(6): 679–687.
- Han, J., Zhou, C., Wu, Y., Liu, F. and Wu, Q., 2013. Self-Assembling Behavior of Cellulose Nanoparticles during Freeze Drying: Effect of Suspension Concentration, Particle Size, Crystal, Structure, and Surface Charge. *Biomacromolecules*, 14(5): 1529–1540.
- Hemraz, U.D., Boluk, Y. and Sunasee, R., 2013. Amine-decorated nanocrystalline cellulose surface synthesis characterization, and surface properties. *Canadian Journal of Chemistry*, 91(10): 974–98.
- Katepalli, H., Bikshapathi, M., Sharma, C.S., Verma, N. and Sharma, A., 2011. Synthesis of hierarchical fabrics by electrospinning of PAN nanofibers on activated carbon microfibers for environmental remediation applications. *Chemical Engineering*,

2006. Studies on cellulose acetate-polysulfone ultrafiltration membranes II. Effect of additive concentration. *Membrane Science*, 268(2). 208–219.
- Spence, K.L., Venditti, R.A., Rojas, O.J., Habibi, Y., and Pawlak, J.J., 2011. A comparative study of energy consumption and physical properties of microfibrillated cellulose produced by different processing methods. *Cellulose*, 18(4). 1097–1013.
- Sun, R., Fang, J., Mott, M.L. and Bolton, J., 1999. Fractional isolation and characterization of polysaccharides from oil palm trunk and empty fruit bunch fibres. *Holzforschung*, 53(3): 253–260.
- Tian, C., Fu, S., Chen, J., Meng, Q. and Lucia L.A., 2014. Graft polymerization of epsilon-caprolactone to cellulose nanocrystals and optimization of grafting conditions utilizing a response surface methodology. *Nordic Pulp & Paper Research Journal (NPPRJ)*, 29(1): 58–68.
- Wang, X.Q., Zhu, Q., Mahurin, S.M., Liang, C. and Dai, S., 2010. Preparation of free-standing high quality mesoporous carbon membranes. *Carbon*, 48(2). 557–570.
- Wei, L., McDonald, A.G., Freitag, C. and Morrell, J.J., 2013. Effects of wood fiber esterification on properties, weatherability and biodurability of wood plastic composites. *Polymer Degradation Stability*, 98(7): 1348–1361.
- Technology, 68(1): 193–201.
- Peng, Y., Dong, Y., Fan, H., Chen, P., Li, Z. and Jiang, Q., 2013. Preparation of polysulfone membranes via vapor-induced phase separation and simulation of direct-contact membrane distillation by measuring hydrophobic layer thickness. *Desalination*, 316: 53–66.
- 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.
- 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.
- Segal, L., Creely, J., Martin, A. and Conrad, C., 1959. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. *Textile Research*, 29. 786–794.
- 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. *Applied Polymer Science*, 131. 40920–40928.
- Sivakumar, M., Mohan, D.R. and Rangarajan, R.,

Surface chemical modification of cellulose nanofibers with phthalimide used as air filter to adsorb carbon dioxide

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

1- Ph.D., Department of Wood and Paper Science and Technology, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Iran

2*-Associate Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Iran,
Email: mehdi.jonoobi@ut.ac.ir

3- Prof., Department of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran

Received: Nov., 2018

Accepted: Dec., 2018

Abstract

The applications of renewable nanomaterial's, such as cellulose nanofibers (CNFs), have recently been of great interest due to their unique properties, including high surface area, high aspect ratio, biodegradable, easy access and reactive hydroxyl groups on the surface. The purpose of this study was to fabricate refined air nano filters using phthalimide- modified CNFs. Because phthalimide contains amine groups that are needed to adsorb carbon dioxide, in this study, a freeze drying method was used for direct removal of water from pure CNFs gel and phthalimide -modified. Also, the properties of pure CNFs aerogels and phthalimide-modified (containing amine groups) were investigated to adsorption carbon dioxide. Modification of CNFs with phthalimide in 4% (v/v) acetic acid, with ratios of CNFs to phthalimide 1: 0, 1: 0.5, 1: 1 and 1: 1.5 wt %. Chemical properties and morphology of modified CNFs were investigated using various techniques including SEM, FTIR-ATR, XRD and TGA. Based on the results, the SEM test did not show any change in the size and structure of the modified CNFs. The presence of phthalimide was confirmed by the creation of new pitches NH_2 , C-N and ester COO on modified CNFs using the ATR-FTIR spectroscopy test. Also, the results of TGA indicated that increasing the amount of phthalimide reduces the thermal stability, indicating the reactivity of the functional groups of phthalimide with CNFs. In addition, the highest carbon dioxide adsorption of 1.5% phthalimide was about 50%.

Keywords: Cellulose nanofibers aerogels, phthalimide, freeze drying, functional group, carbon dioxide adsorption.