منسوجات فنی

راهکاری موثر برای حفظ سلامت شهروندان شهرهای مدرن و پر ترافیک امروزی
(تهیه فیلترهوا با استفاده از تکنولوژی نانو)

دکتر مژده قهرمانی | مدیریت واحد تحقیق و توسعه شرکت صنعتی لایی‌ساز

در تهیه فیلتراسیون ذرات ریز معلق در هوا از لایه نشانی نانو الیاف (که تهیه آن از سوزن استفاده نشده) بر روی سطح بی بافت (Nonwoven) استفاده می شود. در این راستا از نانوالیاف پلی وینیل الکل با قطر متوسط حدود ۱۰۰ نانومتر جهت لایه نشانی استفاده می گردد. بازدهی یا عملکرد فیلتر تولید شده از طریق اندازه گیری فیلتراسیون نانوذرات کلرید سدیم (۲۰-۷۵ نانومتر) با عبور از لایه فیلتر تهیه شده، ارزیابی می گردد. در این تحقیق مشخص گردیده است که راندمان فیلتراسیون نانوذرات، با افزایش ضخامت لایه کامپوزیتی تهیه شده افزایش یافته است. افزایش ضخامت لایه فیلتر از طریق مدت زمان لایه نشانی نانو الیاف بر روی سطح فیلتر قابل کنترل می باشد. جهت افزایش راندمان فیلتراسیون می توان از چندد لایه با آرایش یافتگی متفاوت در تهیه فیلتر کامپوزیتی استفاده نمود تا راندمان فیلتراسیون بالا رفته به حداکثر ۹۹/۹۵٪ برسد که با فیلترهای تجاری هوا با راندمان بالا قابل مقایسه می باشد (البته با کیفیت بالاتر و جرم کمتر)

مقدمه:

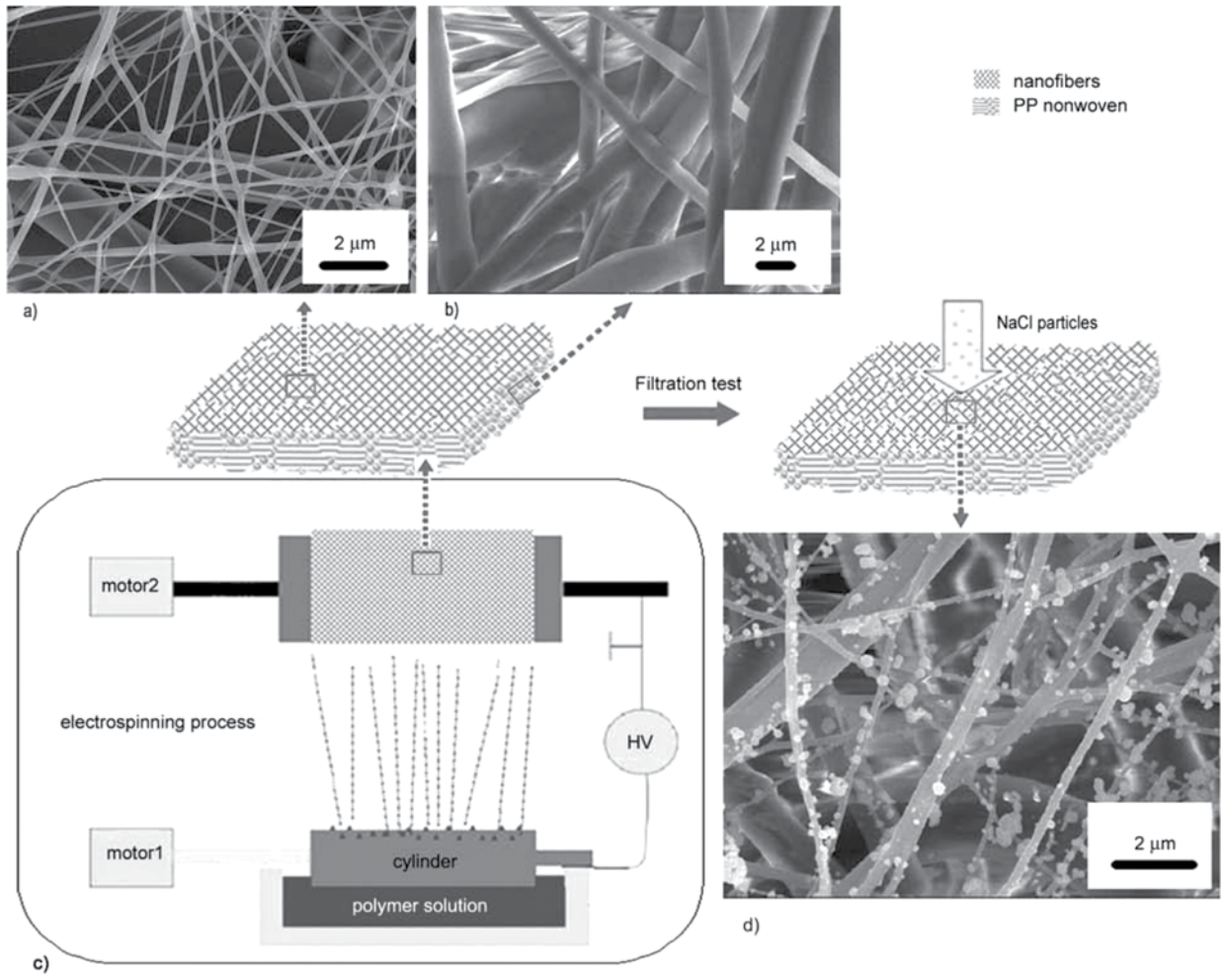
آلودگی هوا بویژه آلودگی مه جدی و جدی‌تر می‌شود. مه از ذرات ریز ایجاد می‌شود که قبل از رسیدن به ناظر، نور را پراکنده و جذب می‌کند. به‌طور خاص، ذرات ریز موجود در هوا بویژه با ابعاد PM ۲/۵ (به عنوان ذرات خاص با قطر ایرودینامیکی کمتر از ۲/۵ میکرومتر تعریف شده است) یکی از جدی‌ترین منابع ذرات ریز است. ذرات با ابعاد PM ۲/۵ و مشتقات آن می‌توانند بسیاری از بیماری‌های انسانی را به وجود آورند. بنابراین، برای جلوگیری از نانوذرات مضر که بر سلامت انسان اثر می‌گذارد، نیاز به توسعه فناوری‌های فیلتراسیون را جدی‌تر نموده است. یکی از روش‌های معتبر حذف ذرات از جریان هوا یا گاز بکارگیری فیلترهای متشکل از الیاف می‌باشد. مطابق با تئوری‌های فیلتراسیون، بکارگیری الیاف با قطر کوچکتر منجر به تولید لایه فیلتراسیون با راندمان بالاتر می‌گردد.

نانو الیاف با قطر کم و سطح جانبی بالا از طریق روش الکتروریسی قابل تولید است نانوالیاف دارای وزن کم، نفوذپذیری زیاد و سطح جانبی بالایی می‌باشند که این خواص و ویژگی‌ها آنها را برای بحث فیلتراسیون و جداسازی کاملاً مناسب و ایده‌آل نموده است.

اقدامات زیادی در جهت بهبود قابلیت فیلتراسیون لایه‌های حاوی نانوالیاف الکتروریسی شده انجام شده است. با وجود راندمان بالای فیلتراسیون به دست آمده در کارهای تحقیقاتی انجام شده، مشخص گردیده که نانوالیاف تولید شده از طریق سوزن عملکرد پایین‌تری را در فیلتراسیون نشان می‌دهند. تولید نانوالیاف با استفاده از سوزن نرخ تولید بسیار پایینی دارد و در نتیجه اسپینرت اغلب در هنگام فرایند الکتروریسی مسدود می‌گردد.

اخیراً، روش الکتروریسی نانو الیاف بدون استفاده از سوزن با هدف افزایش راندمان تولید مورداستقبال قرار گرفته است. جت‌های بی‌شماری به‌طور همزمان در اسپینرت بدون اثر مویرگی تشکیل می‌شود، که باعث افزایش بهره‌وری و تولید نانوالیاف می‌گردد. پلی(وینیل الکل) (PVA) یک پلیمر آبدوست با زیست سازگاری بالا، عدم سمیت و با پایداری شیمیایی و حرارتی خوب می‌باشد که می‌توان آن را به‌راحتی با اصلاح ساختار تبدیل به ژل نمود. در این تحقیق از یک دستگاه الکتروریسی بدون سوزن که با یک غلتک فولادی ضدزنگ به عنوان اسپینرت مجهز گردیده استفاده شده است.

بعد از عملیات الکتروریسی بر روی غلتک جمع‌کننده که با یک لایه بی‌بافت پوشش داده شده است نانو الیاف PVA با قطر میانگین ۱۰۰ نانومتر لایه‌نشانی می‌شود تا یک فیلتر کامپوزیتی بدست آید. نتیجه کار با فیلتر بدست آمده (با



شکل ۱- ساختار کلی فرایند تولید نانو کامپوزیت و نحوه لایه نشانی

لایه‌نشانی به ضخامت ۲/۳ میکرومتر در ۱۰ ثانیه) جهت فیلتراسیون نانوذرات کلرید سدیم معلق در هوا، راندمان بالا و افت فشار را نشان داده است.

با لایه‌نشانی‌های بیشتر نانوالیاف بر روی سطح منسوج بی‌بافت (با آرایش یافتگی‌های متفاوت) راندمان فیلتراسیون تا ۹۹/۹۵٪ افزایش می‌یابد که با فیلترهای تجاری هوا (HEPA) با راندمان بالا قابل مقایسه می‌باشد (البته با کیفیت بالاتر و جرم کمتر)

مواد و روش‌ها

مواد بکار رفته:

PVA با وزن مولکولی معمول Mw ۱۱۸۰۰۰–۱۲۴۰۰۰، ۸۶–۹۰٪ هیدرولیز از شرکت Chang Technology Co Zhong Ke Guo، لایه بی‌بافت از الیاف PP با ضخامت ۹۵ میکرومتر از شرکت Handan Hengyong Protective & Clean Products Co., Ltd و تهیه فیلتر تجاری (CZU500W) ذرات هوا (HEPA) با راندمان بالا از شرکت Chongqing Paper Industry Research and Design Institute Co., Ltd و آب دیونیزه شده از شرکت Millipore milli-Q water purification system

استفاده از تکنولوژی الکتروریسی بدون سوزن و تهیه نانو فیلتر کامپوزیتی

در شکل ۱ ساختار کلی فرایند تولید نانو کامپوزیت و نحوه لایه‌نشانی مشخص گردیده است.

روش استفاده از غلتک فلزی به‌عنوان spinneret از زمان اختراع چالوپک Cha-loupek و همکارانش موردتوجه قرار گرفته است.

تنظیمات آزمایشگاهی ما در شکل ۱c نشان داده شده است:

یک غلتک از جنس استیل ضدزنگ در مخزن محلول پلی‌ترا فلورو اتیلن قرار گرفته که به عنوان ژنراتور تولید جت مورد استفاده قرار گرفته است. زمانی‌که غلتک چرخشی تا حدی در محلول پلیمری غوطه‌ور شد، محلول پلیمر روی سطح بالایی غلتک قرار می‌گیرد.

در ولتاژ بالا تعداد زیادی از جت‌ها می‌توانند در سطح غلتک تولید شوند. یک غلتک دیگر نیز که به زمین متصل است جهت جمع‌آوری نانو الیاف تولید شده مورداستفاده قرار می‌گیرد.

غلظت‌های مختلفی از PVA (از ۶ تا ۱۰ درصد وزنی) از طریق حل نمودن (با کمک همزن) پلیمر PVA در آب دیونیزه در ۶۰ درجه سانتیگراد تهیه شده است. محلول بدست آمده از طریق روش الکتروریسی بدون سوزن تبدیل به نانو الیاف

می‌گردد. در این راستا محققان بسیاری پروسه تولید و خصوصیات نانو الیاف تشکیل شده را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

بعد از اضافه نمودن محلول پلیمری به مخزن مربوطه، ولتاژ ۷۰ کیلو ولت (Spell-man SL130 P300) برای غلتک مثبت الکتروریسی تأمین می‌شود. فاصله بین غلتک مثبت و غلتک جمع‌کننده ثابت و ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد. نانوالیاف تولید شده بر روی بستر منسوج نبافته از جنس PP که سطح غلتک جمع‌کننده را پوشانده است قرار می‌گیرد و در نهایت فیلتر کامپوزیتی تشکیل می‌شود و عملیات خشک کردن لایه جهت حذف حلال باقیمانده برای تست فیلتراسیون در خلاء انجام می‌گیرد.

محلول PVA می‌تواند به صورت فیزیکی تشکیل ژل بدهد که خاصیت چسبندگی خوبی دارد. بنابراین بعد از تبخیر حلال، نانوالیاف PVA به خوبی می‌تواند بدون نیاز به چسب، بر روی منسوج نبافته PP قرار گیرد.

تعیین مشخصات

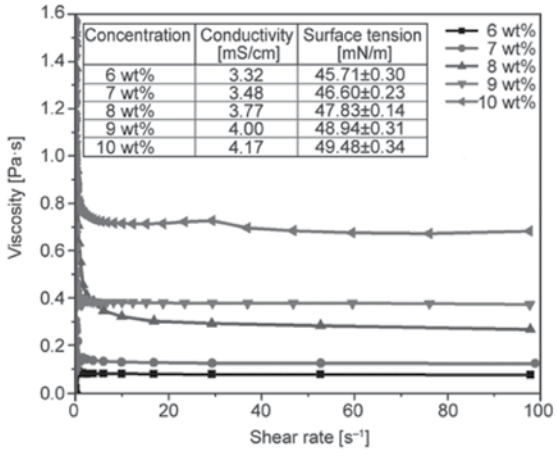
رسانایی و ویسکوزیته محلول‌های PVA به ترتیب توسط دستگاه (DDS 11A از کمپانی Shanghai REX Instrument، چین) و HAAKE Rotational Rheometer (MARS2) اندازه‌گیری شده است. کشش سطحی نیز از طریق روش اندازه‌گیری زاویه تماس با قطره آب (DSA100، آلمان) تعیین گردیده است.

مورفولوژی نانوالیاف تولید شده نیز از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM 4800S، هیتاچی، ژاپن) مشاهده گردیده است. قبل از اندازه‌گیری با SEM، بر روی سطح نمونه نانوالیاف ذرات فلز طلا لایه نشانی می‌گردد تا از تجمع بار الکترونی جلوگیری شود. جرم الیاف از طریق ترازوی الکترونیکی (WA10005, Shanghai Fangrui Istrument Co.Ltd. China) اندازه‌گیری شده است.

ضخامت غشاء توسط ضخامت سنج (CH-12.7-STSX, Shanghai Chuan-lu Mesuring ToolsCo., Ltd.) ساخت چین اندازه‌گیری شده است.

تستر فیلتر خودکار TSI (مدل ۸۱۳۰) برای اندازه‌گیری راندمان فیلتراسیون و افت فشار استفاده شده است. TSI 8130 می‌تواند ذرات جامد مونو دیسپرس خنثی معلق در هوا را (NaCl) با قطر متوسط ۲۰±۷۵ نانومتر تولید نماید.

انحراف استاندارد هندسی کوچکتر از ۱/۸۳ گزارش شده است. ذرات NACL معلق در هوا با استفاده جریان هوای ثابت $32\ L.min^{-1}$ از داخل فیلتر عبور می‌کند. زمان آزمایش هر نمونه ۱۰ ثانیه می‌باشد.



شکل ۲- تغییر ویسکوزیته، رسانایی و کشش سطحی با ایجاد تغییر در ویسکوزیته محلول PVA

نتایج و بحث

استفاده از روش الکتروریسی بدون بکارگیری سوزن در تهیه نانو الیاف PVA

محلول‌های PVA با غلظت‌های مختلف (از ۶ تا ۱۰ درصد وزنی) جهت انجام عملیات الکتروریسی تهیه و مورداستفاده قرار گرفته‌اند. در نتایج بررسی‌های انجام شده مشخص گردیده که پارامترهایی مانند ویسکوزیته ، رسانایی و کشش سطحی همراه با افزایش غلظت پلیمر افزایش یافته است که در شکل ۲ نشان داده شده است.

گرماژ نانو الیاف تولید شده می‌تواند تا ۱۰g/h برسد. در شکل ۳ تصاویر SEM بدست آمده از نانوالیاف PP تولید شده با غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطورکه در تصاویر مشاهده می‌شود مرفولوژی و قطر نانو الیاف تولید شده به‌طور قابل ملاحظه‌ای وابسته به غلظت محلول بکار رفته می باشد.

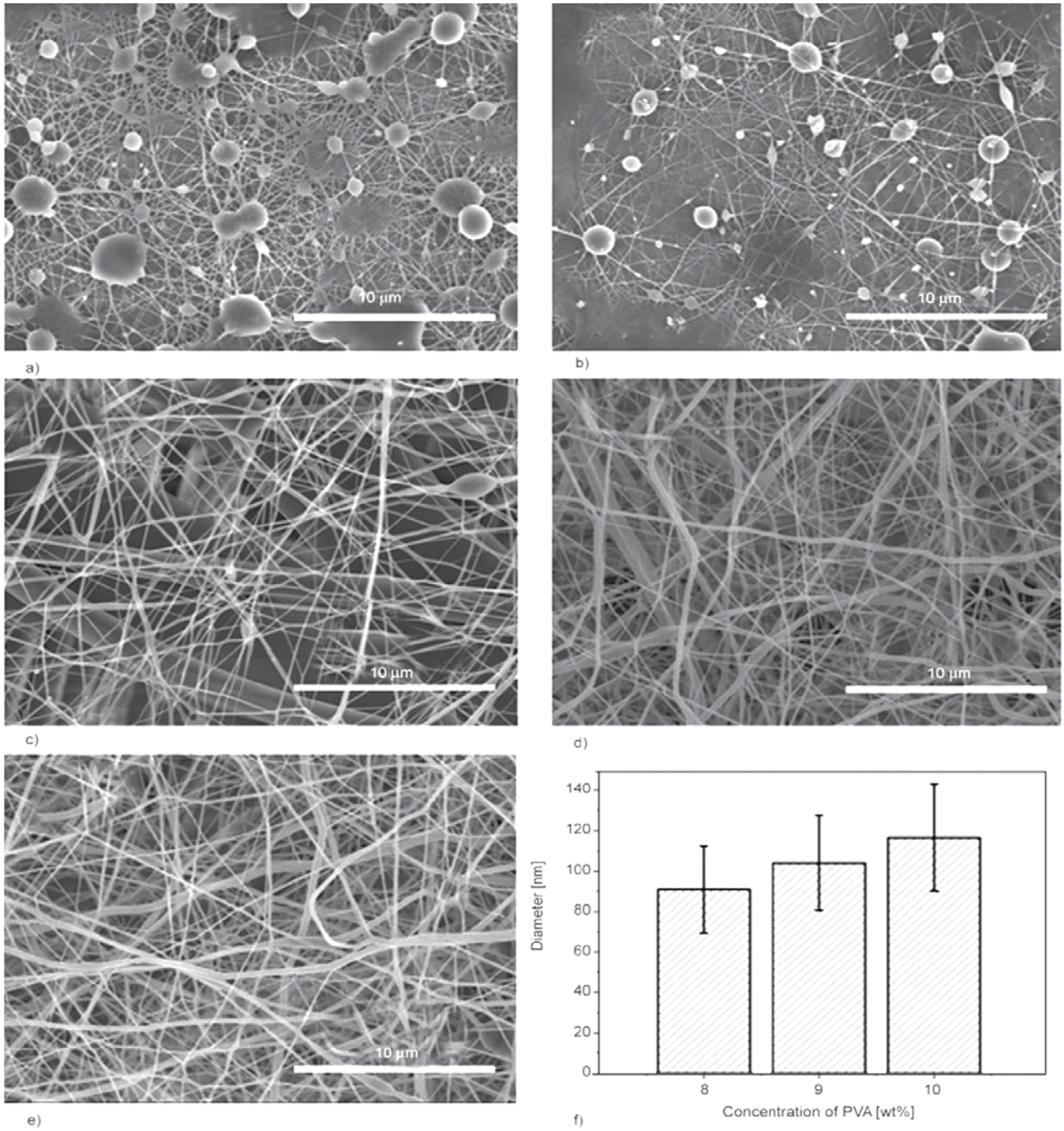
در غلظت ۶ درصد وزنی الیاف ناپیوسته و تعداد زیادی قطره مشاهده می‌شود، تعدادی از این قطرات دانه‌ها در ۷ درصد وزنی نیز قابل مشاهده می‌باشد. تصاویر مربوط به این بررسی‌ها در شکل ۳a، ۳b نشان داده شده است. علت این ناپیوستگی، کاهش به هم پیوستگی زنجیرهای پلیمری در غلظت‌های پایین‌تر محلول می‌باشد.

با هر حال، الیاف یکنواخت در غلظت‌های بالاتر از ۷ درصد وزنی بدست آمده است. قطر الیاف همراه با افزایش غلظت پلیمر افزایش می‌یابد. برای ۸ درصد وزنی در محدوده ۲۱±۹۱ نانومتر، برای ۹ درصد وزنی در محدوده ۲۴±۱۰۴ نانومتر و برای ۱۰ درصد وزنی در محدوده ۲۷±۱۱۷ نانومتر مطابق با شکل ۳f می‌باشد. همانطورکه در شکل ۳f مشخص شده الیاف ضخیم‌تر در غلظت بالاتر بدست آمده است. علت این امر اتصالات بیشتر زنجیرهای پلیمری و در نتیجه آزادی حرکت کمتر زنجیرها در غلظت‌های بالا می‌باشد. با توجه به ظرافت و یکنواختی نانو الیاف، محلول PVA (۸ درصد وزنی) برای این مطالعه مورداستفاده قرار گرفته است.

فیلتر کامپوزیتی هوا

لایه بی‌بافت با ضخامت بیشتر از ۲ میکرومتر به عنوان بستر لایه‌نشانی نانو الیاف مورداستفاده قرار گرفته است. بدیهی است که ضخامت نانوالیاف بستگی به زمان الکتریسی دارد. لایه‌های نانوالیاف با ضخامت حدود ۲/۳، ۶/۳، ۱۳/۲، ۱۸/۸، ۲۴/۶ میکرومتر توسط الکتروریسی در مدت زمان ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ ثانیه به‌ترتیب به دست آمده است.

فیلترهای کامپوزیتی با غشای نانو لیفی با ضخامت‌های مختلف ۲/۳، ۶/۳، ۱۳/۲، ۱۸/۸، ۲۴/۶ میکرومتر به ترتیب به عنوان Nn (N1، N2، N3، N4 و N5)

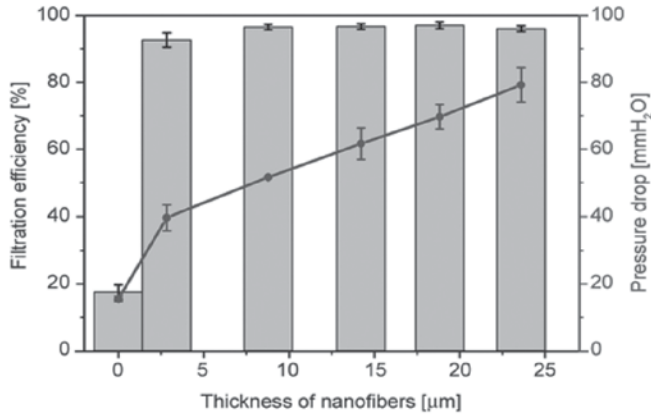


شکل ۳- تغییر قطر نانو الیاف تولیدی همراه با تغییر غلظت محلول‌های بکار رفته

مشخص شده‌اند. تصاویر SEM بدست آمده از غشاهای کامپوزیت و بستر PP به ترتیب در شکل ۱a و ۱b نشان داده شده است.

عملکرد فیلتراسیون به‌طور کلی توسط دو پارامتر اصلی مشخص می‌شود: راندمان فیلتراسیون و افت فشار. شکل ۴ راندمان فیلتراسیون و افت فشار فیلتر کامپوزیتی را در مقابل ضخامت نانوالیاف نشان می‌دهد.

منسوجات بی‌بافت PP راندمان فیلتراسیون کمتر از ۱۷/۵٪ را نشان می‌دهد درحالی‌که بعد از لایه‌نشانی سطح با نانو الیاف این رقم به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و به بیش از ۹۲٪ می‌رسد. راندمان فیلتراسیون فیلتر کامپوزیتی در مقابل افزایش ضخامت نانو الیاف (۲/۳، ۶/۳، ۱۳/۲، ۱۸/۸، ۲۴/۶ میکرومتر) به ترتیب معادل ۹۲/۶۱، ۹۶/۴۴، ۹۶/۶، ۹۶/۹ و ۹۵/۹۵ درصد (شکل ۴) گزارش شده است. بدیهی است که راندمان فیلتراسیون همراه با افزایش ضخامت لایه افزایش یافته است. راندمان فیلتراسیون با لایه‌نشانی یک لایه نازک از نانوالیاف با ضخامت ۲/۳ میکرومتر با مدت زمان الکتروریسی ۱۰ ثانیه به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.



شکل ٤- راندمان فیلتراسیون و افت فشار فیلترهای کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف

عملکرد فیلتراسیون متشکل از چند لایه فیلتر نانوالیاف

به‌منظور دستیابی به راندمان بالاتر، فیلترهای کامپوزیتی تهیه شده به روش‌های مختلفی کنار هم قرار گرفته‌اند. در این تحقیق فیلتر نانوالیاف چندلایه پیشنهاد شده است که می‌تواند راندمان فیلتراسیون بالاتر و افت فشار کمتر را ارائه دهد. در این راستا فیلترهای چندلایه با طراحی (۳×N1، ۲×N2، N2+N3، ۲×N3) و (Nn+PP) مطابق شکل ۵a تهیه و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فیلتر کامپوزیتی بعد از قرار قرار گرفتن بر روی لایه PP مشابه، راندمان فیلتراسیون بالاتر از ۹۵٪ را نشان می‌دهد. در حالی‌که برای دو لایه PP بدون لایه‌نشانی نانو الیاف این مقدار در حدود ۳۵٪ (شکل ۵a) گزارش شده است.

در شکل ۵a کارآیی فیلترهای چندلایه (۳×N1، ۲×N2، N2+N3، ۲×N3) برابر با ۹۹/۹۵، ۹۹/۶۰، ۹۹/۶۳، ۹۹/۷۸ درصد گزارش شده است. همچنین راندمان فیلتراسیون نانوذرات با استفاده از HEPA تجاری تحت شرایط مشابه مورد بررسی قرار گرفته است.

همانطور که در شکل ۵a مشاهده می‌شود راندمان فیلتراسیون HEPA تجاری معادل ۹۹/۹۵٪ ولی با افت فشار بسیار بالاتر از فیلترهای کامپوزیتی چندلایه متشکل از نانوالیاف می‌باشد. عملکرد خوب فیلتراسیون وابسته به راندمان بالاتر و افت فشار پایین‌تر می‌باشد. ضریب کیفیت (QF) به عنوان یک پارامتر جامع برای اندازه‌گیری عملکرد فیلتراسیون از معادله زیر قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

$$QF = -\frac{In(1-\eta)}{\Delta P} \qquad (1)$$

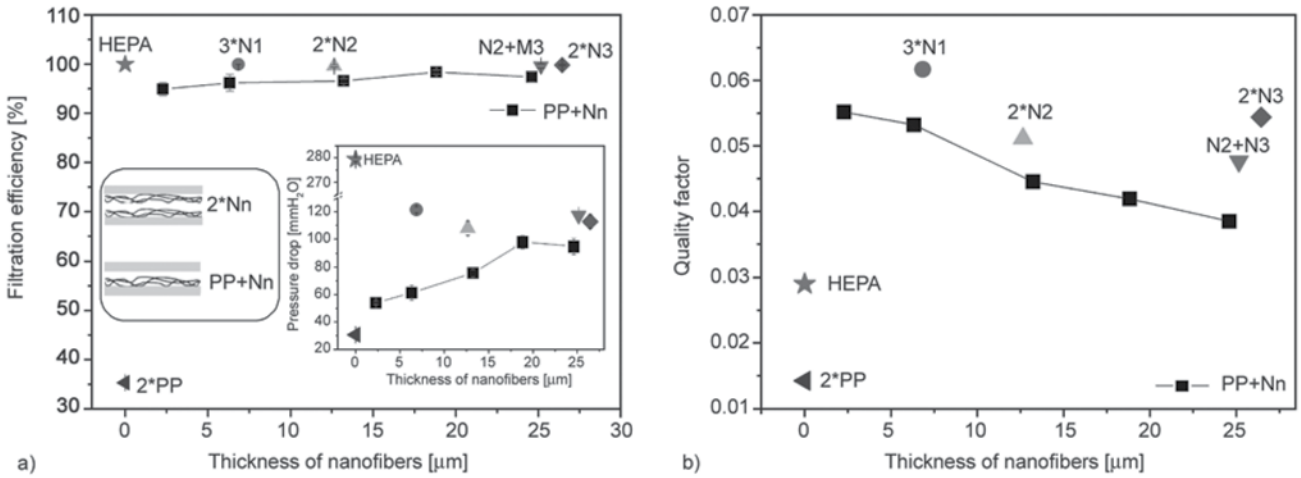
در معادله بالا: η و PΔ به ترتیب راندمان فیلتراسیون و افت فشار می‌باشند. همانطور که در شکل ۵b نشان داده شده است QF از معادله فوق برای فیلترهای مورد بررسی قابل محاسبه می‌باشد. QF فیلترهای کامپوزیتی چندلایه بسیار بالاتر از HEPA بدست آمده است. بنابراین مشخص می‌شود که فیلترهای چندلایه کامپوزیتی عملکرد بهتری از HEPA برای تصفیه نانوذرات نشان می‌دهند. ممکن است از این ماده برای تصفیه ذرات کوچک مانند ویروس و باکتری استفاده شود.

نتیجه‌گیری

الکتروریسی الیاف یکنواخت و پیوسته در غلظت های بالاتر از ۸ درصد وزنی قابل دستیابی می‌باشد. جهت تهیه فیلترهای کامپوزیتی از سطح نبافته با جنس PP به عنوان بستر استفاده شده و روی آن نانوالیاف PVA لایه نشانی شده است.

راندمان فیلتراسیون با لایه نشانی یک لایه نازک از نانوالیاف (تنها با ضخامت ۲/۳ میکرومتر) با انجام الکتروریسی به مدت ۱۰ ثانیه به طور قابل توجهی بهبود یافت. ضخامت نانو الیاف تولید شده با مدت زمان الکتروریسی قابل کنترل می‌باشد.

فیلترهای کامپوزیتی نانوالیاف چند لایه، راندمان فیلتراسیون بالایی (۹۹/۹۵٪) را در ارتباط با نانوذرات نشان داده است ولی افت فشار بسیار کمتری نسبت به HEPA تجاری گزارش شده است که نشان‌دهنده کیفیت بالاتر فیلترهای تهیه شده به این روش نسبت به فیلترهای تجاری HEPA می‌باشد.



شکل ٥: (a) راندمان فیلتراسیون و افت فشار و (b) ضریب کیفیت فیلتر کامپوزیتی چند لایه متشکل از نانو الیاف در مقابل ضخامت نانو الیاف