

Review of New Methods For Removing Particulate Matter From Air Based on Nanofibers.

Mohammad Hassan Amini, Mitra Mohammadzadeh Ahani

Chemistry & Chemical Engineering Research Center Of Iran, Environmental Research Center and Clean Technologies, Tehran, Iran

Abstract

Air pollutants such as particulate matter (PM) with different diameters, chemical mixtures and microbiological particles have increasingly been considered in determining air quality, especially air quality in closed environments, over the past decade. Based on their sizes, they are mainly classified into two types as $PM_{2.5}$ and PM_{10} . $PM_{2.5}$ is particularly hazardous due to its extremely small size, which can easily penetrate into human lungs and Bronchi.

Recently, the development of nanostructured materials has increased the use of nanomaterials, especially nanofibers, in air purification. Electrospinning and electrostatic sprays are very much considered in the various methods of making nanofibers. In this paper, the various nanofibers that have been produced by researchers for the removal of particles below $2.5 \mu m$ over the last few years, were reviewed.

Keywords: Air pollution, electrospinning, electrostatic spray, particulate matter, nanofibers

مقدمه

به طور کلی برای کاهش آلودگی ذرات می‌توان از استراتژی‌هایی بهره‌برداری کرد. یکی از آن‌ها استفاده از فیلترهای ذرات مختلف مانند فیلترهای سرامیک وال-فلو^۳ [۲۴، ۲۵]، فیلترهای فوم جامد^۴ [۲۶] و فیلترهای فیبری^۵ می‌باشد [۲۷، ۲۸] که به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و به عنوان یک تکنیک موثر در کنترل انتشار ذرات در نظر گرفته می‌شود. همچنین روش ته‌نشینی الکترواستاتیک جذابیت قابل توجهی برای جذب ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون با کارایی بالا دارد [۳۲-۲۹].

به رغم تلاش‌های قابل توجهی که برای جذب ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون انجام شده است غلظت این ذرات در اکثر کشورهای در حال توسعه همچنان به شدت بالاتر از دستورالعمل‌های کیفیت هوا در سازمان بهداشت جهانی یعنی ۱۰ میلی گرم بر متر مکعب (میانگین سالیانه) و ۲۵ میلی گرم بر متر مکعب (میانگین روزانه) می‌باشد [۳۳]. بنابراین استفاده از فناوری‌های جدید موثر در کاهش آلودگی این ذرات که مزایای سادگی، راحتی و کارایی بالا را داشته باشند، همیشه مورد توجه دانشمندان قرار می‌گیرد.

به طور کلی برای رسیدن به یک کارایی بالا برای فیلترها همیشه لازم است که اندازه کانال‌ها و عناصر ساختاری در مواد فیلتر با اندازه ذرات قابل جذب مطابقت داشته باشند [۳۴]. بنابراین، نانوفیبرها به دلیل اینکه از نظر اندازه و سطح ویژه بالا برای گیر انداختن ذرات معلق مناسب می‌باشند، به وفور در ساخت فیلترهای هوا به کار برده می‌شوند [۳۵-۳۷]. در میان روش‌های مختلف ساخت نانوفیبرها، اسپری الکترواستاتیک و الکترورسی با توجه به ویژگی‌هایی که دارند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. تفاوت اصلی بین این دو روش گرانروی پیش ماده مورد استفاده در فرایند تهیه نانوذرات و نانوفیبر است. روش اسپری الکترواستاتیک با توجه به تنظیم ساده، ارزان و پیش ماده غیر سمی، بازده تولید بالا و کنترل آسان

یکی از آلودگی‌های اصلی هوا مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه، ذرات معلق^۱ می‌باشد. ذرات معلق مخلوط پیچیده‌ای از ذرات جامد و ترکیبات مایع با قطر کم می‌باشد و از اجزای شیمیایی متنوعی شامل مواد معدنی (مثل سیلیکات، سولفات و نترات) و مواد آلی (مثل کربن آلی و کربن خالص عنصری) تشکیل شده است [۶-۸]. عمدتاً از طریق احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی، سوخت زیستی و خروجی آگروز خودروها تولید می‌شود [۹، ۱۰]. ذرات معلق به طور جدی بر محیط زندگی ما تاثیر دارد. این اثرات به صورت کاهش کیفیت هوا، قدرت دید و انرژی تابش خورشید و همچنین اثرات بر روی اقلیم‌ها و اکوسیستم‌ها قابل ملاحظه می‌باشد. این ذرات به دلیل این‌که قطر کمی داشته توسط بدن جذب شده و در نهایت در سیستم گردش خون انسان یا سیستم تنفسی قرار می‌گیرند، خطرناک می‌باشند [۱۱-۱۴]. به طور کلی ذرات معلق به صورت ذرات درشت، ریز و فوق العاده ریز با قطر آیرودینامیکی در حدود کمتر از ۲/۵ میکرون تا ۱۰ میکرون گروه بندی می‌شوند.

کارهای تحقیقاتی متعددی نشان داده است که مواجه شدن با آلودگی ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون به مدت طولانی با بیماری و مرگ و میر ناشی از بیماری‌های تنفسی و قلبی و عروقی همراه است [۱۵-۱۸]. ذرات با اندازه کمتر از ۲/۵ میکرون به علت این‌که اندازه‌های کوچکی دارند در ریه‌ها و نایژه‌های انسانی نفوذ کرده و بسیار مضر می‌باشند. علاوه بر این ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون به طور قابل توجهی بر آب و هوای کره زمین از طریق جذب و پراکندگی تابش نور خورشید تاثیر می‌گذارند که به دلیل تشکیل دانه های ابر^۲ در هوا می‌باشد [۱۹-۲۳]. بنابراین دانشمندان تلاش‌های زیادی برای از بین بردن یا کاهش ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون در هوای پیرامون ما انجام داده‌اند.

^۳ Wall-flow ceramic filter

^۴ Solid foam filters

^۵ Fiber filters

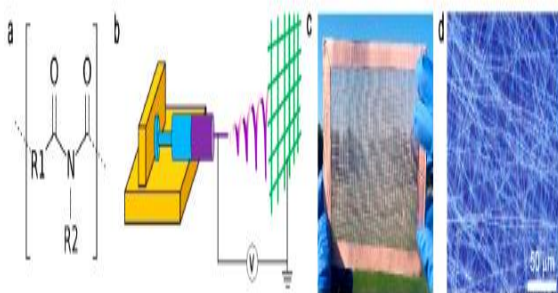
^۱ Particulate matter

^۲ Cloud seeds

ساخت نانو فیبرهای پلی‌ایمید و ساختار میکروسکوپی و ماکروسکوپی آن قابل مشاهده می‌باشد.

مورفولوژی نانوذرات تولید شده، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۳۸]. همچنین الکتروریسی به عنوان یک روش ساده و همه جانبه برای تولید نانو فیبرهای مختلف از جمله مواد پلیمری، کامپوزیت و سرامیک تایید شده است [۳۹-۴۱].

بررسی نانوفیبرهای مختلف در جذب ذرات معلق

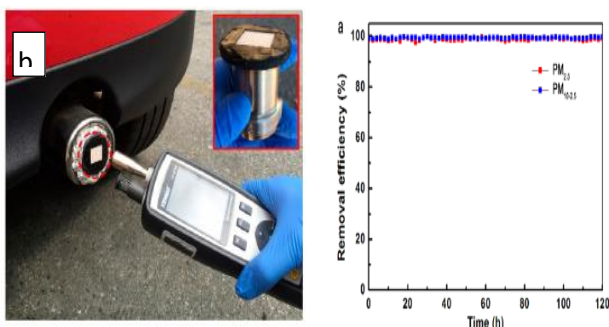


شکل ۱ (a) ساختار مولکولی پلی‌ایمید (b) طرحی از آماده سازی فیلترهای شفاف پلی‌ایمید با استفاده از الکتروریسی (c) عکسی از یک فیلتر هوای معمولی شفاف پلی‌ایمید با شفافیت ۷۰ درصد. (d) تصویر میکروسکوپ نوری از یک فیلتر هوای شفاف پلی‌ایمید [۵]

در این مطالعه برای نشان دادن توانایی نانو فیلتر تولید شده، آن را بر روی خروجی اگزوز خودرو که دمایی حدود ۵۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد دارد قرار دادند و مقدار ذرات معلق را قبل و بعد از حضور نانوفیلتر در خروجی اگزوز اندازه‌گیری کردند و مشاهده شد که تا حدود ۹۹ درصد از انواع ذرات معلق با قطرهای متفاوت توسط این نانوفیلتر جذب می‌گردد که در شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است.

در مطالعه‌ای سوئی^۱ و همکارانش از نانوفیبرهای از جنس پلی‌ایمید که پایداری حرارتی بالایی دارند برای حذف ذرات در دمای بالا استفاده کردند که در محدوده دمایی بین ۲۵-۳۷۰ درجه سانتی‌گراد قابل استفاده می‌باشند [۵]. وقتی که دما از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرد هر دو پارامتر قطر و مورفولوژی نانو فیبر پلی‌ایمید بدون تغییر باقی‌ماند که پایداری حرارتی بالای آن را نشان می‌دهد. در این فیلتر افت فشار جریان هوا بسیار کم می‌باشد. برای مقایسه آن‌ها فیلترهای هوای ساخته شده از پلیمرهای دیگر را نیز مورد آزمایش قرار دادند که شامل فیلترهایی از جنس پلی‌آکریلونیتریل، پلی‌وینیل‌پیرولیدون و سه نوع از فیلترهای هوای معمولی می‌باشند و نشان داده شد که در میان شش نوع متفاوت از فیلترها، فیلتر پلی‌ایمید کارایی فیلتراسیون بهتری را در دمای بالا نشان می‌دهد.

برای تهیه فیلترهای نانوفیبر پلی‌ایمید از روش الکتروریسی با استفاده از محلول دی‌متیل‌فرمامید استفاده شده است. الکتروریسی یک تکنیک تهیه فیلترهای نانوفیبری یکنواخت با ابعاد قابل کنترل از محلول‌های پلیمر گوناگون می‌باشد [۴۲]. همچنین در این مطالعه برای تولید ذرات معلق از سوزاندن عود استفاده شده است و برای محاسبه مقدار ذرات معلق از دستگاه شمارنده ذرات معلق^۲ استفاده شد. محلول‌های پلیمری مورد استفاده برای تکنیک الکتروریسی در این مطالعه شامل رزین پلی‌ایمید ۱۵ درصد حجمی در دی‌متیل‌فرمامید، پلی‌آکریلونیتریل ۱۰ درصد حجمی در دی‌متیل‌فرمامید و پلی‌وینیل‌پیرولیدون ۸ درصد حجمی در اتانول بود. در **Error! Reference source not found.** نحوه



شکل ۲ (a) راندمان حذف ذرات معلق کمتر از ۲/۵ و بین ۲/۵ تا ۱۰ میکرون در مدت زمان کوتاه با استفاده از فیلترهای نانوفیبری پلی‌ایمید، (b) اندازه‌گیری میزان غلظت ذرات معلق در اگزوز خودرو با فیلتر هوا، قرار دادن یک لوله فولادی ضد زنگ با یک فیلتر پلی‌ایمید توسط دایره قرمز نشان داده شده است. [۵]

Cue ۱

PM particle counter ۲

برای اندازه‌گیری راندمان فیلتر، دانسیته ذرات معلق در ورودی و خروجی به وسیله حسگر شمارنده ذرات نصب شده در سمت چپ محفظه اندازه‌گیری شد. زمانی که ولتاژ یون‌کننده روی ۵ ولت و ولتاژ اعمالی بر فیلتر روی ۱۰ ولت تنظیم می‌شود مشاهده می‌گردد که ۹۹/۹۹ درصد از ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون توسط فیلتر جذب می‌گردد. در صورتی که وقتی ولتاژ خاموش می‌باشد ذرات به راحتی از فیلتر عبور می‌کنند. این روش علاوه بر مزیت‌های گفته شده در بالا، افت فشار خیلی کمی هم دارد که به دلیل قطر بزرگ حفره‌های بین توری فیلتر می‌باشد. همچنین به علت استفاده از نانو ذرات نقره که خاصیت میکروب‌کشی دارد، میکروب‌های موجود در هوا را نیز از بین می‌برد. بنابراین یک روش نسبتاً ساده برای تصفیه هوا بوده که قابلیت استفاده مجدد در دفعات بعدی پس از شست و شو را هم دارد. برای این‌که قابلیت استفاده دوباره از فیلتر را بررسی کنند فرایند تمیز کردن فیلتر بعد از فیلتراسیون ذرات معلق به وسیله شستن با حلال قطبی انجام می‌شود. بدین صورت که فیلتر بعد از استفاده برای چندین ثانیه در اتانول، آب دیونیزه و اتیلن‌گلیکول به ترتیب خیس می‌خورد تا تمیز گردد. مشخص شد که راندمان تمیز کردن با افزایش ممان دو قطبی محلول‌ها افزایش پیدا می‌کند.

در حالی که حفاظت از هوای داخل ساختمان معمولاً به دستگاه‌های فیلتراسیون گران و مصرف انرژی بالا نیاز دارد، فیلتر مستقیم ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون روی سطح پنجره‌ها توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. به تازگی، شبکه‌های نانوفیبر پلیمری به عنوان فیلتر شفاف برای حذف ذرات معلق با کارایی بالا ساخته شده‌اند. با این حال، هنوز پوشش یکنواخت نانوفیبرها بر روی پنجره‌ها در مقیاس بالا و قیمت پائین چالش محققین می‌باشد. در مطالعه‌ای، سویی و همکارانش یک تکنیک ضربه زدن-چرخش^۴ را گزارش کردند که سریع، کارآمد و بدون استفاده از ولتاژ بالا برای پوشش مستقیم نانو فیبر در مقیاس بزرگ بر روی سطح پنجره برای

در مطالعه‌ای دیگر آقای لی^۱ و همکارانش برای اولین بار از شبکه نفوذپذیر نقره برای تهیه نانوفیلترها استفاده کردند که مزایای شفاف بودن، قابل استفاده مجدد و کارآمد برای حذف ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون را دارد[۳]. در مقایسه با کارهای قبلی که از نیروی بین مولکولی نسبتاً ضعیف در ساختار نانو فیبرها جهت گیرانداختن ذرات معلق استفاده می‌شد در این روش از نیروی الکترواستاتیک قوی شبکه نانو ذرات نقره باردار شده برای جذب ذرات معلق استفاده می‌شود که بسیار کارآمد، شفاف، با مصرف انرژی کم و ضد باکتری می‌باشد و بعد از شست و شوی آسان قابل استفاده مجدد است. در این روش ابتدا نانو سیم‌های نقره توسط فرایند پلی ال^۲ اصلاح شده سنتز شدند و سپس بر روی توری نایلونی با قطر ۴۷ میلی‌متر و منافذ ۵۳ میکرومتری با استفاده از روش فیلتراسیون خلا قرار می‌گیرد.

آزمایش در دو محفظه شیشه‌ای تقسیم شده راه اندازی شده بود. یک حسگر شمارنده ذرات معلق که چگالی ذرات معلق را اندازه‌گیری می‌کند در سمت چپ محفظه قرار گرفته است و در سمت راست محفظه یک یون‌کننده^۳ منفی برای شارژ ذرات قرار دارد. فیلتر در وسط دو محفظه قرار می‌گیرد. قبل از شروع آزمایش ذرات معلق که از سوختن عود بدست آمده است در قسمت راست محفظه پر شده و توسط یون‌کننده باردار می‌شود که پس از عبور از فیلتر توسط شبکه نانو سیم‌های نقره گیر انداخته می‌شود. روش کار به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ تصویر مراحل آزمایش، و نحوه قرار گرفتن اجزای مختلف

Lee ۱

Polyol process ۲

Ionizer ۳

blow-spinning ۴

پنجره مشبک واقعی با ابعاد 29×133 سانتی‌متر با یک لایه نازک از نانوفیبرهای پلی‌آکریلونیتریل پوشش داده شده است. در آزمایش فیلتر هوای شفاف، آنها موفق به کارایی حذف $92/6$ ، $91/2$ و $90/6$ درصد برای ذرات معلق کم‌تر از 10 میکرون، بین 10 - $2/5$ میکرون و ذرات معلق کم‌تر از $2/5$ میکرون در طی یک دوره زمانی 12 ساعته شدند.

در این آزمایش، یک مش نایلون تجاری به دلیل ماهیت انعطاف پذیر و به منظور تسهیل رول کردن مستمر و باز شدن بعدی آن استفاده می‌شود. همچنین، پایداری آن در برابر حلال دی‌متیل‌فرمامید در دمای اتاق یک عامل کلیدی برای انتخابش است. پلی‌آکریلونیتریل در دی‌متیل‌فرمامید به عنوان ماده پوشش فیبر استفاده شده است. پاشیدن مداوم محلول پلی‌آکریلونیتریل بر روی این مش پلیمری و رول کردن با سرعت خاص منجر به تشکیل یک پوشش فیبر شفاف می‌شود. از طریق این فرآیند، پوششی از الیاف در شبکه توری پلیمر به طول $2/5$ متر در مدت کوتاه 3 دقیقه به دست می‌آید. در این مطالعه روش تولید چرخش-ضربه برای ساخت فیلترهای هوا فیبری پلیمری استفاده شد که مزایای منحصر به فردی نظیر عدم وجود ولتاژ بالا در تهیه نانو فیبر و عدم ریسک استفاده از بستر فلزی به منظور ایجاد غشای یکنواخت با قطر قابل کنترل را داشت. فیلترهای هوا با پلیمرهای مختلف و شفافیت‌های متفاوت، آماده شدند. پلیمرهای معمول موجود مانند پلی‌آکریلونیتریل، پلی‌وینیل‌پیرولیدون، پلی‌(متیل‌متاکریلات) و نایلون 66 با کمترین هزینه انتخاب شدند. در تحقیق حاضر، دود به وسیله سوزاندن چوب عود معطر تولید می‌شود. سوزاندن مناسب عود می‌تواند ذرات معلق با غلظت بیش از 45 میلی‌گرم در گرم تولید کند و محاسبه راندمان حذف با مقایسه مقادیر ذرات قبل و بعد از فیلتراسیون انجام شد.

محلول‌های پلیمری مورد استفاده در این مقاله شامل 10 درصد وزنی پلی‌آکریلونیتریل در دی‌متیل‌فرمامید، 10 درصد

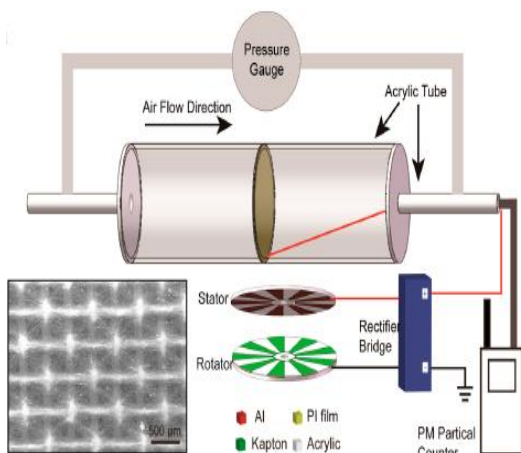
محافظت از آلودگی در محیط‌های بسته به کار می‌رود. با این روش آنها توانستند یک فیلتر شفاف هوا با عبور نور 80 درصد و کارایی حذف استاندارد 99 درصد برای ذرات معلق کم‌تر از $2/5$ میکرون به دست آورند [۴۳].

آزمایش بر روی یک پنجره واقعی (1 متر \times 2 متر) در پکن ثابت کرده است که فیلتر هوای شفاف نانوفیبری، کارایی حذف ذرات معلق را به میزان $90/6$ درصد در طی 12 ساعت در شرایط هوا بسیار آلوده با غلظت بیشتر از 708 میکروگرم بر مترمکعب برای ذرات معلق کمتر از $2/5$ میکرون دارد. علاوه بر این، آنها نشان دادند که نانو فیبرهایی که بدین صورت بر روی پنجره‌ها پوشش داده شده‌اند را می‌توان با تمیز کردن پنجره پس از روزهای آلوده از سطح شیشه حذف کرد.

اخیراً محققان دریافته‌اند که غشاهای نانوفیبر پلیمرهای قطبی مانند پلی‌آکریلونیتریل، نایلون و پلی‌آمید راندمان حذف ذرات معلق بسیار بالاتری نسبت به پلیمرهای پلی‌پروپیلن غیر قطبی که در غشاهای فیلتراسیون موجود استفاده می‌شوند را دارند [۴۵، ۴۴، ۴۵]. توانایی جذب بالای غشاء نانوفیبر پلیمری قطبی امکان استفاده از یک غشاء نانوفیبری نازک را بر روی سطح یک پنجره فراهم کرده است، که می‌تواند بسیار شفاف و مقاوم در برابر جریان هوا باشد. تکنولوژی‌های پیشین برای تولید نانوفیبرها شامل پاشیدن حلال و ذوب شدن است [۴۶، ۴۷]. اما هر یک از این‌ها دارای معایب خاص خود هستند. تصور می‌شود که الکتروریسی دارای بیشترین پتانسیل و روش قابل اعتماد برای ساخت نانوفیبرهای تجاری است. با این حال تولید کم، ریسک ولتاژ بالا، سازگاری حلال با توجه به ثابت دی‌الکتریک، شرایط عملیاتی پیچیده و مدت زمان طولانی، مانع جدی برای پوشش در مقیاس بالای پنجره‌های واقعی می‌باشد. با توجه به همه این عوامل، سوئی و همکارانش یک روش جدید چرخش ضربه‌ای برای تولید فیلتر هوای شفاف پنجره ارائه کردند. این روش نه تنها در استفاده از ولتاژ بالا آزاد است بلکه سریع، بسیار کارآمد و آسان می‌باشد. علاوه بر این، با تنظیم تمام این پارامترها، یک

ته‌نشینی الکترواستاتیک از طریق ایجاد میدان الکتریکی بالا و بردار کردن ذرات به صورت الکتریکی ذرات معلق را جذب می‌کند [۴۸] یکی از مهم‌ترین اشکالات ته‌نشینی الکترواستاتیک این است که آن‌ها هوا را به شدت یونیزه می‌کنند از این رو تولیدکننده ازن هستند که باعث ایجاد اثرات منفی بر سلامت انسان با احتمال خطر ابتلا به سرطان می‌باشد [۴۹، ۵۰].

برای تست عملکرد حذف ذرات از فیلترهای نانوفیبری آماده‌سازی شده پلی‌ایمید استفاده شد، آنها یک دستگاه تست را طراحی کردند که در شکل ۴ نشان داده شده است. یک فیلم نانو فیبر پلی‌ایمید درون یک لوله اکریلیک قرار داده شده است و با سیستم تست عملکرد فیلتر مرتبط است. برای اندازه‌گیری افت فشار در سرعت‌های مختلف گاز برای تمام فیلترهای نانوفیبر پلی‌ایمید، از یک فشار سنج استفاده شد. شمارنده ذرات معلق برای اندازه‌گیری غلظت ذرات مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۴ تصویری از راه‌اندازی دستگاه برای اندازه‌گیری را

راندمان حذف ذرات معلق [۲]

نانوژنراتورهای چرخان تریبوالکتریک برای بردار کردن فیلم‌های نانوفیبری پلی‌ایمید استفاده شد که عمدتاً از یک صفحه چرخان و یک بخش ثابت تشکیل شده است و صفحه چرخان و بخش ثابت از الکترودهای مشبک از جنس آلومینیوم می‌باشد.

وزنی پلی وینیل‌پیرولیدون در اتانول، ۳۰ درصد وزنی پلی‌متیل‌متاکریلات در دی‌متیل‌فرمامید و ۳۰ درصد وزنی نایلون ۶۶ در اسید فرمیک می‌باشد. تمام محلول‌های پلیمری در یک سرنگ ۱ میلی‌لیتر بارگذاری شدند. سرنگ در یک پمپ سرنگ نصب شد و نوک خمیدگی آن در مقابل یک لوله توخالی که به طور پیوسته از آن هوا خارج می‌شود تنظیم شد.

آنالیز کمی حذف ذرات معلق با قطرهای متفاوت نشان داد که نانوفیلتر ساخته شده از پلی‌اکریلونیتریل بالاترین کارایی حذف برای تمامی این ذرات را دارد که احتمالاً مربوط به ممان دوقطبی بالای پلیمر می‌شود. بدین طریق که با بالا رفتن ممان دو قطبی احتمالاً جذب ذرات به سطح پلیمرها افزایش یافته و کارایی حذف بالا می‌رود. همچنین نشان داده شد که با فیلترهای نانوفیبر با شفافیت ۲۰ درصد در عبور نور، جذب حدود ۹۹/۹ درصد برای انواع ذرات معلق بدست می‌آید.

لین وانگ^۱ و همکارانش یک فیلتر هوای نانوفیبر پلی‌ایمیدی با استفاده از یک نانوژنراتور تریبوالکتریک چرخان^۲ با کارایی بالا برای حذف ذرات معلق در محیط توسعه دادند. هنگامی که نانوژنراتور متصل است، راندمان حذف فیلتر افزایش می‌یابد، به ویژه هنگامی که قطر ذرات کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر است. بالاترین راندمان حذف ۹۰/۶ درصد برای ذرات با قطر ۳۳/۴ نانومتر می‌باشد و بیشترین افزایش کارایی ۲۰۷/۸ درصد در قطر ۷۶/۴ نانومتر است که در آن راندمان حذف از ۲۷/۱ به ۸۳/۶ افزایش می‌یابد. از مزیت‌های این تکنولوژی این است که هیچ ازنی را انتشار نمی‌دهد و افت فشار پایینی دارد که روشی مناسب برای تصفیه کردن هوا ارائه می‌دهد. [۲]

امروزه ته‌نشینی الکترواستاتیک و فیلترهای فیبری برای حذف ذرات معلق بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

Lin Wang ۱

rotating triboelectric nanogenerator ۲

فعال برای جذب باکتری ایجاد کنند [۵۳]. در واقع، شناخته شده است که علاوه بر این گروه‌های یونیزه، پروتئین سویا حاوی بسیاری از گروه‌های کاربردی دیگر، از جمله گروه‌های قطبی، غیر قطبی، آب‌گریز و آب‌دوست می‌باشد. این گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل (-OH)، کربوکسیل (-COOH)، آمین ($\text{NH}_2 - \text{NH}_3^+$) و گروه‌های متیل (CH_3) می‌باشد که پروتئین سویا را یک ماده بسیار جذاب با توانایی برهم‌کنش با ذرات مختلف یا مواد شیمیایی می‌سازد.

مواد اولیه و آماده سازی محلول مورد استفاده در این مطالعه شامل پودر ایزوله پروتئین سویا با مقدار حاوی ۹۰ درصد پروتئین، گرانول‌های پلی‌وینیل‌الکل و اسید استیک با درصد خلوص ۹۹/۹ درصد می‌باشد.

در این مطالعه دو روش اصلی برای تولید فیبرهای نانوکامپوزیت به کار رفتند که یک روش مبتنی بر پودر و روش دیگر مبتنی بر محلول می‌باشد. از طریق آزمایش معلوم شد که نمونه‌های تهیه شده از طریق روش محلول همواره از نمونه‌های تهیه شده توسط روش پودر بهتر می‌باشند. برای روش مبتنی بر محلول، پروتئین سویا ایزوله در محلول (آب دیونیزه / اسید استیک با نسبت ۸۰ به ۲۰) در غلظت ۸/۵ درصدوزنی در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۴ ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی مخلوط شد (۴۰۰ دور در دقیقه). پلی‌وینیل‌الکل به صورت جداگانه در یک حلال با غلظت ۸/۵ درصدوزنی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲ ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی (۴۰۰ دور در دقیقه) حل شد. سپس محلول پروتئین سویای تغییر ماهیت یافته به محلول پلی‌وینیل‌الکل با نسبت‌های مختلف اضافه شد و مخلوط به مدت ۲۴ ساعت با استفاده از یک میکسر هم زده می‌شود.

نانوفیبرهای مبتنی بر پروتئین سویا با روش الکترورسی ساخته شدند. محلول نانوکامپوزیت پروتئین سویا / پلی‌وینیل‌الکل در یک سرنگ قرار داده شد. ولتاژ ۱۶ تا ۲۱ کیلوولت برای الکترورسی اعمال شد و توسط یک منبع ولتاژ بالا کنترل شد. یک پمپ سرنگ یکنواخت، برای پمپاژ پروتئین سویا / پلی‌وینیل‌الکل مورد استفاده قرار گرفت. مش مشبک آلومینیومی با قطر سیم ۰/۱۱

از مقایسه راندمان حذف فیلترهای نانوفیبر پلی‌ایمیدی با نانوذراتورهای چرخان تریبولکتریک و بدون آن در سرعت گاز مختلف بین ۵-۱ متر بر ثانیه معلوم شد راندمان حذف با افزایش سرعت گاز ثابت باقی‌ماند که پایداری فیلتر را نشان می‌دهد. در این مطالعه فیلتر نانوفیبر پلی‌ایمید دارای راندمان حذف بالا برای ذرات معلق با قطر بزرگتر از ۰/۵ میکرون است که هنگام کار کردن با نانوذراتور چرخان تریبولکتریک راندمان حذف به خصوص در محدوده با قطر ذرات معلق کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر افزایش می‌یابد. مهم‌تر از همه افت فشار فیلتر افزایش پیدا نمی‌کند و از آن هم تولید نمی‌شود. این مطالعه روش مناسب برای تصفیه هوا با معرفی نانوذراتور تریبولکتریک بر روی یک فیلتر پلی‌ایمید را پیشنهاد می‌کند.

در یکی دیگر از مطالعات بررسی شده، آقای وانگ^۱ و همکارانش به بررسی نانوفیبرهای ساخته شده از پروتئین سویا برای فیلتراسیون هوا که بسیار کارآمد و چند منظوره می‌باشند پرداختند [۴]. پروتئین‌ها به علت وجود گروه‌های عاملی فعال فراوان در طول زنجیره پلی‌پپتیدی شناخته شده‌اند. انواع گروه‌های عاملی پروتئین‌ها، پتانسیل خوبی برای برهم‌کنش با آلاینده‌های هوا با ویژگی‌های سطحی مختلف دارند. در این مطالعه پروتئین سویا که یک نوع پروتئین گیاهی فراوان می‌باشد برای اولین بار در ساخت مواد چند منظوره تصفیه هوا استفاده می‌شود. برای استفاده از گروه‌های عاملی پروتئین سویا در فیلتراسیون هوا، پروتئین سویا ابتدا به شکل زنجیرهای پلی‌پپتید باز شده و تغییر ماهیت داده شده درآمد، سپس با کمک پلی‌وینیل‌الکل به صورت نانوفیبر ساخته شد. تغییر ماهیت همراه با مورفولوژی نانو فیبرها می‌تواند تا حد زیادی چگالی سایت‌های فعال موجود در برهم‌کنش با آلاینده‌ها را افزایش دهد. گروه‌های یونیزه‌کننده آن مانند اسید گلوتامیک، لیزین و هیستیدین، برای خواص ضد باکتری بسیار مهم هستند [۵۱، ۵۲]. گزارش شده است که گروه‌های یونیزه‌کننده در پروتئین سویا می‌توانند مکان‌های

Wang ۱

denaturation ۲

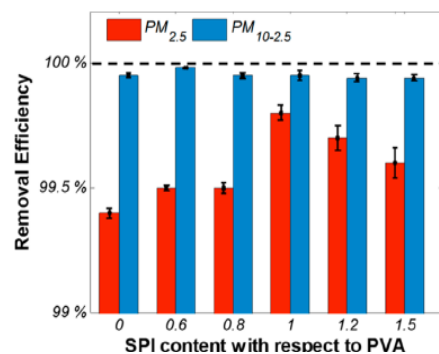
به‌طور خاص در نانوفیبرهای پلی‌وینیل‌الکل خالص راندمان حذف ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون را ۹۹/۴۵ درصد نشان می‌دهد در حالی‌که نانوکامپوزیت پروتئین سویا / پلی‌وینیل‌الکل با نسبت یک به یک منجر به راندمان بالاتر ۹۹/۸۰ درصد برای ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون می‌شود. نتایج فوق نشان می‌دهد که وجود پروتئین سویا برای بهبود راندمان حذف ذرات با اندازه‌های کوچک‌تر از اندازه منافذ حیاتی است. هنگامی که نسبت پروتئین سویا به پلی‌وینیل‌الکل از یک به یک بالاتر رفت نانوفیبرها شکننده شدند که منجر به تشکیل منافذ بزرگ در ساختار نانوفیبر بعد از مرحله الکترورسی یا در طول آزمایش فیلتراسیون می‌شود. مشخص شده است که نانوساختارهای تولید شده کارایی فیلتراسیون بالا را نه تنها برای ذرات معلق با طیف گسترده‌ای از اندازه نشان می‌دهند بلکه همچنین برای مواد شیمیایی مختلف سمی مانند فرمالدئید و مونوکسیدکربن نیز عملکرد فیلتراسیون بالا است و این یک قابلیت است که توسط مواد فیلتر هوای معمولی بدست نمی‌آید. این مطالعه نشان می‌دهد که نانو ساختارهای مبتنی بر پروتئین، نانومواد امیدوارکننده‌ای برای کاربردهای چند منظوره در ساخت فیلترهای هوا هستند.

در کار دیگری از نانوساختارهای کیتوزان که با استفاده از روش الکترواسپین در محل سنتز می‌شوند برای جذب ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون با کارایی بالا مورد بررسی قرار گرفتند [۱]. در این تحقیق، آن‌ها روش جدیدی را ارائه کردند بدین صورت که نانوساختارهای کیتوزان از محلول آبی توسط روش الکترواسپین مستقیم به داخل آلودگی ذرات معلق اسپری می‌نمایند و بدین طریق کارایی حذف ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند. جالب توجه است که آن‌ها متوجه شدند که این روش نسبت به روش‌های دیگر شامل نانوفیبرها و روش الکترواستاتیک کارایی بالاتری در جذب ذرات معلق دارد که ممکن است به دلایل زیر باشد: (۱) قطبیت قوی ترکیتوزان باعث می‌شود

اینچی و اندازه حفره مش ۱ میلی‌متر × ۱ میلی‌متر برای جمع آوری الیاف مورد استفاده قرار گرفت.

دو منبع مختلف آلودگی برای تهیه نمونه‌های آلاینده هوا استفاده شده است که شامل دود سیگار و محصولی از سوزاندن مواد گیاهی می‌باشد. دود سیگار شامل ذرات معلق با اندازه‌ای از ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر می‌باشد و تقریباً ۷۰۰۰ ماده شیمیایی مختلف دارد که از صدها ماده سمی مانند فرمالدئید و مونوکسیدکربن تشکیل شده است. یک شمارنده ذرات ساخت شرکت سم^۱ برای اندازه‌گیری غلظت ذرات معلق و مواد سمی فرمالدئید و مونوکسیدکربن استفاده شد.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، کارایی حذف برای ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون و ذرات بزرگ بین ۱۰- ۲/۵ میکرون برای نانوکامپوزیت پروتئین سویا/ پلی‌وینیل‌الکل با نسبت متفاوت پروتئین سویا/ پلی‌وینیل‌الکل مقایسه شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که راندمان حذف ذرات بین ۱۰- ۲/۵ میکرون صرف نظر از درصد پروتئین سویا در محدوده یکسان ۹۹/۹۰-۹۹/۹۹ باقی می‌ماند. این نتیجه نشان می‌دهد که ذرات بزرگ به طور عمده براساس مکانیزم بازدارندگی اندازه حفره‌های فیلتری گیر می‌افتند. با این حال، برای ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون، راندمان حذف به نسبت پروتئین سویا/ پلی‌وینیل‌الکل بستگی دارد و در محدوده ۴۰/۸۰-۹۹/۹۹ قرار می‌گیرد.



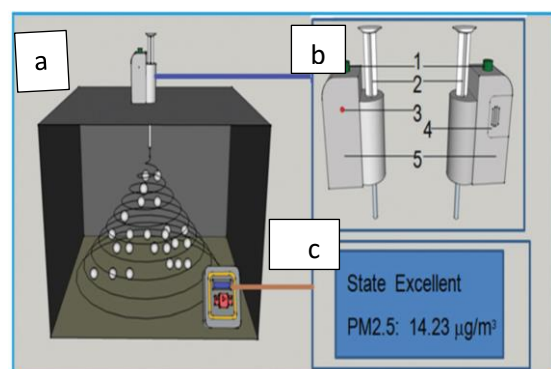
شکل ۵ کارایی حذف ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون و بین ۲/۵ تا ۱۰ میکرون از نانوکامپوزیت های فیلتر هوا پلی وینیل الکل و پروتئین سویا در مقادیر مختلف پروتئین [۴]

برای طراحی دستگاه تجربی از یک جعبه محصور با استفاده از شیشه شفاف با اندازه $25 \times 30 \times 35$ سانتی‌متر استفاده شد (در شکل ۶a نشان داده شده است). جعبه محصور شامل یک وسیله الکترورسی دستی (که در شکل ۶b نشان داده شده است) در مرکز بالای جعبه شیشه و ابزار تشخیص غلظت ذرات کم‌تر از $2/5$ میکرون با صفحه نمایش مادون قرمز در پایین جعبه شیشه C ای در شکل ۶c نشان داده شده است.

به‌طور معمول از سوزاندن عود برای تولید آلاینده‌های ذرات معلق استفاده می‌شود تا راندمان حذف ذرات معلق کم‌تر از $2/5$ میکرون ارزیابی شود. قبل از انجام الکترواسپین، دود عود به داخل یک جعبه محصور انتقال داده شد تا آن‌که به سطح غلظت 400 میکروگرم بر متر مکعب برسد. پلی‌آکریلونیتریل، پلی‌وینیل‌پیرولیدون، پلی‌استایرن و کیتوزان به طور جداگانه به داخل جعبه محصور حاوی ذرات معلق وارد شدند و غلظت ذرات معلق در فواصل زمانی مختلف به طور منظم اندازه‌گیری شد.

برای پیدا کردن مواد موثرتر برای حذف ذرات معلق کم‌تر از $2/5$ میکرون، چندین پلیمر با خواص شیمیایی مختلف برای جذب آلودگی ذرات معلق به‌وسیله روش پاشیدن مستقیم استفاده شد. این پلیمرهای انتخاب شده، از جمله کیتوزان، پلی‌آکریلونیتریل، پلی‌وینیل‌پیرولیدون و پلی‌استایرن به‌طور گسترده ای برای تولید نانوکامپوزیت با استفاده از الکترواسپین برای کاربرد های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. قطبیت و آب‌گریزی هر کدام از پلیمرها با توجه به واحدهای تکرارکننده که گروه‌های عاملی گوناگونی را حمل می‌کنند متفاوت است. تمام پلیمرها تحت شرایطی مشابه همانند غلظت پیش ماده، ولتاژ اعمال شده و غلظت اولیه و نهایی ذرات معلق تحت الکترواسپین قرار گرفتند. الکترواسپین با ولتاژ 10 کیلوولت، غلظت پیش ماده 5 درصد وزنی و ذرات معلق اولیه و نهایی با غلظت 400 میکروگرم در متر مکعب و 50 میکروگرم در متر مکعب انجام شد. نرخ حذف با

که کیتوزان به راحتی قطبش شود و این باعث افزایش بار بیشتر بر روی سطح نانوذرات می‌شود که به طور قابل توجهی ترکیب ذرات معلق را با نانوذرات کیتوزان افزایش می‌دهد. وجود تعداد زیادی از گروه‌های باردار مثبت NH_3^+ بر روی زنجیره اصلی کیتوزان می‌تواند ترکیبی سریع از نانوذرات بر پایه کیتوزان و اجزای بار دار منفی در ذرات معلق کم‌تر از $2/5$ مانند SO_4^{2-} ، NO_3^- ، Cl^- و ... ایجاد کند. (۳) نانو فیبرهای با قطر کوچک‌تر می‌توانند به مدت طولانی به دلیل خواص سبک وزنی خود در هوا باقی بمانند، که باعث افزایش زمان در دسترس برای جذب ذرات معلق کم‌تر از $2/5$ میکرون می‌شوند. مهم‌تر از همه، کیتوزان، پلی‌ساکارید غیر سمی و زیست تخریب پذیر مشتق شده از کیتین دارای ویژگی بسیار خوبی است که می‌تواند رشد قارچ‌ها، مخمرها و باکتری‌ها را مهار کند [۵۴]. بنابراین، روش تزریق نانوذرات به‌طور مستقیم در محل می‌تواند یک محیط مطبوع و سالم ایجاد کند. به عنوان یک مقایسه، آنها همچنین از روش‌های دیگر برای حذف ذرات کم‌تر از $2/5$ میکرون مانند اسپری الکترواستاتیک، ته‌نشینی الکترواستاتیک و رسوب طبیعی استفاده کردند. برای نشان دادن کارایی این روش همچنین آزمایش‌های میدانی انجام شده است و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از آزمایش همخوانی دارد.



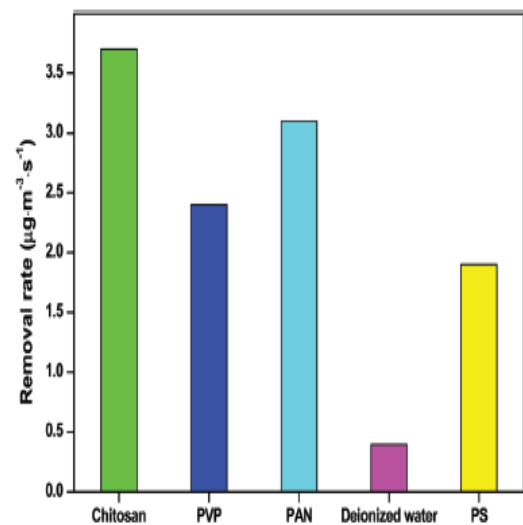
شکل ۱- a طرح نانو ساختارهای کیتوزان مستقیمی به وسیله الکترورسی در محل برای جذب ذرات کم‌تر از $2/5$ میکرون در یک جعبه محصور با چسبندگی سطح قوی و جذب الکترواستاتیک قوی شکل گرفته است b طرحی از وسیله دستی الکترواسپین (۱: سوئیچ قدرت، ۲: سرنگ، ۳: سوئیچ چراغ نشانگر، ۴: باتری خشک، ۵: برگرداننده ولتاژ بالا). c طرح اولیه صفحه نمایش دستگاه اندازه‌گیری ذرات معلق کم‌تر از $2/5$ میکرون [۱]

باردار شده تکنیک‌های دیگری می‌باشند که توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته و با این روش کارایی جذب ذرات معلق به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. اخیراً استفاده از مواد زیستی مثل پروتئین‌ها به صورت نانوفیبر کامپوزیتی مورد توجه قرار گرفته است که مزیت جذب ذرات معلق و آلاینده‌های دیگر را با هم دارد. در نهایت به نظر می‌رسد استفاده از نانوفیبرها در ساخت جاذب‌های ذرات معلق کم‌تر از ۲/۵ میکرون به دلیل مزایایی که دارند اجتناب‌ناپذیر است و در آینده نزدیک با تولید انبوه و اقتصادی شدن آن جایگزین موفق‌تری برای فیلترهای هوای کنونی خواهند بود.

منابع

1. Zhang, B., et al., *Chitosan nanostructures by in situ electrospinning for high-efficiency PM2.5 capture*. *Nanoscale*, ۲۰۱۷. ۹(۱۲): p. ۴۱۶۱-۴۱۵۴.
2. Gu, G.Q., et al., *Triboelectric nanogenerator enhanced nanofiber air filters for efficient particulate matter removal*. *ACS nano*, ۲۰۱۷. ۱۱(۶): p. ۶۲۱۷-۶۲۱۱.
3. Jeong, S., et al., *High efficiency, transparent, reusable, and active PM2.5 filters by hierarchical Ag nanowire percolation network*. *Nano letters*, ۲۰۱۷. ۱۷(۷): p. ۴۳۴۶-۴۳۳۹.
4. Souzandeh, H., et al., *Soy-protein-based nanofabrics for highly efficient and multifunctional air filtration*. *ACS applied materials & interfaces*, ۲۰۱۶. ۸(۳۱): p. ۲۰۰۳۱-۲۰۰۲۳.
5. Zhang, R., et al., *Nanofiber air filters with high-temperature stability for efficient PM2.5 removal from the pollution sources*. *Nano letters*, ۲۰۱۶. ۱۶(۶): p. ۳۶۴۹-۳۶۴۲.

استفاده از اختلاف غلظت این ذرات تقسیم بر زمان محاسبه شد. مقایسه راندمان حذف در شکل ۷ نشان می‌دهد که کیتوزان بالاترین راندمان حذف را در بین پلی‌آکریلونیتریل، پلی‌وینیل‌پیرولیدون، پلی‌استایرن و آب مقطر دارد. به‌طور کلی کارایی جذب پلیمر به قطبش الکتریکی مربوط می‌شود زیرا قطبش الکتریکی پلیمرهای مختلف می‌تواند قطعاً تفاوت‌های کارایی را توضیح دهد.



شکل ۲ راندمان حذف پلیمرهای مختلف [1]

نتیجه‌گیری

در این گزارش، مقالاتی که بر روی استفاده از نانوفیبر برای حذف ذرات معلق به ویژه ذرات معلق کم‌تر از ۲/۵ میکرون بودند مورد بررسی قرار گرفته شد. ملاحظه گردید که در بین نانوفیبرهای مختلف آن‌هایی که قطبی‌تر می‌باشند و ممان دوقطبی بالاتری دارند برای گیرانداختن ذرات معلق مناسب‌تر می‌باشند و افت فشار در فیلترهایی که براساس نانومواد ساخته می‌شوند مسأله مهمی می‌باشد که در تمام مطالعات مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بین روش‌های تولید نانوفیبر روش الکتروروسی روشی مناسب و آسان می‌باشد اما از معایب این روش استفاده از ولتاژ بالا بوده است که در مطالعه‌ای این نقص با معرفی روش چرخش - ضربه اصلاح شده است و در مدت زمان کم می‌توان نانوفیبر را در مقیاس بالا تولید کرد. استفاده از تکنیک باردار کردن ذرات معلق و استفاده از نانوفیبرهای

- Heart Association. *Circulation*, ۲۰۰۴. ۱۰۹(۲۱): p. ۲۶۵۵-۲۶۷۱.
۱۶. Brook, R.D., et al., *Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association*. *Circulation*, ۲۰۱۰. ۱۲۱(۲۱): p. ۲۳۳۱-۲۳۷۸.
 ۱۷. Pope III, C.A. and D.W. Dockery, *Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect*. *Journal of the air & waste management association*, ۲۰۰۶. ۵۶(۶): p. ۷۰۹-۷۴۲.
 ۱۸. Dockery, D.W., et al., *An association between air pollution and mortality in six US cities*. *New England journal of medicine*, ۱۹۹۳. ۳۲۹(۲۴): p. ۱۷۵۳-۱۷۵۹.
 ۱۹. Pope, C.A., et al., *Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults*. *American journal of respiratory and critical care medicine*, ۱۹۹۵. ۱۵۱(۳): p. ۶۶۹-۶۷۴.
 ۲۰. Betha, R., S.N. Behera, and R. Balasubramanian, *2013 Southeast Asian smoke haze: fractionation of particulate-bound elements and associated health risk*. *Environmental science & technology*, ۲۰۱۴. ۴۸(۸): p. ۴۳۲۷-۴۳۳۵.
 ۲۱. Wu, S., et al., *Association of cardiopulmonary health effects with source-appointed ambient fine particulate in Beijing, China: a combined analysis from the Healthy Volunteer Natural Relocation (HVNR) study*. *Environmental science & technology*, ۲۰۱۴. ۴۸(۶): p. ۳۴۳۸-۳۴۴۸.
 ۲۲. Timonen, K.L., et al., *Effects of ultrafine and fine particulate and gaseous air pollution on cardiac autonomic control in subjects with coronary artery disease: the ULTRA study*. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, ۲۰۰۶. ۱۶(۴): p. ۳۳۲.
 ۲۳. Bardouki, H., et al., *Chemical composition of size-resolved atmospheric aerosols in the eastern*
 ۶. Seinfeld, J.H., *Urban air pollution: state of the science*. *Science*, ۱۹۸۹. ۲۴۳(۴۸۹۲): p. ۷۴۵-۷۵۲.
 ۷. Zhang, R., et al., *Chemical characterization and source apportionment of PM 2.5 in Beijing: seasonal perspective*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ۲۰۱۳. ۱۳(۱۴): p. ۷۰۵۳-۷۰۷۴.
 ۸. Maricq, M.M., *Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review*. *Journal of Aerosol Science*, ۲۰۰۷. ۳۸(۱۱): p. ۱۰۷۹-۱۱۱۸.
 ۹. Chow, J.C. and J.G. Watson, *Review of PM2.5 and PM10 apportionment for fossil fuel combustion and other sources by the chemical mass balance receptor model*. *Energy & Fuels*, ۲۰۰۲. ۱۶(۲): p. ۲۲۲-۲۶۰.
 ۱۰. Xie, M., M.P. Hannigan, and K.C. Barsanti, *Impact of gas/particle partitioning of semivolatile organic compounds on source apportionment with positive matrix factorization*. *Environmental science & technology*, ۲۰۱۴. ۴۸(۱۶): p. ۹۰۵۳-۹۰۶۰.
 ۱۱. Donaldson, K., et al., *Ambient particle inhalation and the cardiovascular system: potential mechanisms*. *Environ Health Perspect 109 (suppl 4)*: ۵۲۳-۵۲۷. ۲۰۰۱.
 ۱۲. Kampa, M. and E. Castanas, *Human health effects of air pollution*. *Environmental pollution*, ۲۰۰۸. ۱۵۱(۲): p. ۳۶۲-۳۶۷.
 ۱۳. Nelin, T.D., et al., *Direct and indirect effects of particulate matter on the cardiovascular system*. *Toxicology letters*, ۲۰۱۲. ۲۰۸(۳): p. ۲۹۳-۲۹۹.
 ۱۴. Pinkerton, K.E., et al., *Distribution of particulate matter and tissue remodeling in the human lung*. *Environmental Health Perspectives*, ۲۰۰۰. ۱۰۸(۱۱): p. ۱۰۶۳.
 ۱۵. Brook, R.D., et al., *Air pollution and cardiovascular disease: a statement for healthcare professionals from the Expert Panel on Population and Prevention Science of the American*

۳۲. Han, C.B., et al., *Removal of particulate matter emissions from a vehicle using a self-powered triboelectric filter*. *Acs Nano*, ۲۰۱۵. ۹(۱۲): p. ۱۲۵۵۲-۱۲۵۶۱.
۳۳. Chan, C.K. and X. Yao, *Air pollution in mega cities in China*. *Atmospheric environment*, ۲۰۰۸. ۴۲(۱): p. ۱-۴۲.
۳۴. Qin, X.H. and S.Y. Wang, *Filtration properties of electrospinning nanofibers*. *Journal of Applied Polymer Science*, ۲۰۰۶. ۱۰۲(۲): p. ۱۲۸۵-۱۲۹۰.
۳۵. Barhate, R.S. and S. Ramakrishna, *Nanofibrous filtering media: filtration problems and solutions from tiny materials*. *Journal of membrane science*, ۲۰۰۷. ۲۹۶(۱-۲): p. ۱-۸.
۳۶. Podgórski, A., A. Bałazy, and L. Gradoń, *Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters*. *Chemical Engineering Science*, ۲۰۰۶. ۶۱(۲۰): p. ۶۸۰۴-۶۸۱۵.
۳۷. Ahn, Y., et al., *Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers*. *Current Applied Physics*, ۲۰۰۶. ۶(۶): p. ۱۰۳۰-۱۰۳۵.
۳۸. Li, X. and C. Wang, *Engineering nanostructured anodes via electrostatic spray deposition for high performance lithium ion battery application*. *Journal of Materials Chemistry A*, ۲۰۱۳. ۱(۲): p. ۱۶۵-۱۸۲.
۳۹. Li, D. and Y. Xia, *Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel?* *Advanced materials*, ۲۰۰۴. ۱۶(۱۴): p. ۱۱۵۱-۱۱۷۰.
۴۰. Huang, Z.-M., et al., *A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites*. *Composites science and technology*, ۲۰۰۳. ۶۳(۱۵): p. ۲۲۲۳-۲۲۵۳.
۴۱. Wu, J., et al., *Electrospinning of multilevel structured functional micro-/nanofibers and their applications*. *Journal of Materials Chemistry A*, ۲۰۱۳. ۱(۲۵): p. ۷۲۹۰-۷۳۰۵.
۴۲. Thavasi, V., G. Singh, and S. Ramakrishna, *Electrospun nanofibers Mediterranean during summer and winter*. *Atmospheric Environment*, ۲۰۰۳. ۳۷(۲): p. ۱۹۵-۲۰۸.
۲۴. Serrano, J., et al., *Pre-DPF water injection technique for loaded DPF pressure drop reduction and control*. *Appl. Energy*, ۲۰۱۵. ۱۴۰: p. ۲۳۴-۲۴۵.
۲۵. Wu, G., A.V. Kuznetsov, and W.J. Jasper, *Distribution characteristics of exhaust gases and soot particles in a wall-flow ceramics filter*. *Journal of Aerosol Science*, ۲۰۱۱. ۴۲(۷): p. ۴۴۷-۴۶۱.
۲۶. Vanhaecke, E., C. Pham-Huu, and D. Edouard, *Simulation and experimental measurement of dynamic behavior of solid foam filter for diesel exhaust gas*. *Catalysis today*, ۲۰۱۲. ۱۸۹(۱): p. ۱۰۱-۱۱۰.
۲۷. Zhang, S., et al., *Microwave structured polyamide-6 nanofiber/net membrane with embedded poly (m-phenylene isophthalamide) staple fibers for effective ultrafine particle filtration*. *Journal of Materials Chemistry A*, ۲۰۱۶. ۴(۱۶): p. ۶۱۴۹-۶۱۵۷.
۲۸. Wang, N., et al., *Ultra-light 3D nanofibre-nets binary structured nylon ۶-polyacrylonitrile membranes for efficient filtration of fine particulate matter*. *Journal of Materials Chemistry A*, ۲۰۱۵. ۳(۴۷): p. ۲۳۹۴۶-۲۳۹۵۴.
۲۹. Fisher, G.L., D. Chang, and M. Brummer, *Fly ash collected from electrostatic precipitators: microcrystalline structures and the mystery of the spheres*. *Science*, ۱۹۷۶. ۱۹۲(۴۲۳۹): p. ۵۵۳-۵۵۵.
۳۰. Chen, T.-M., et al., *An efficient wet electrostatic precipitator for removing nanoparticles, submicron and micron-sized particles*. *Separation and Purification Technology*, ۲۰۱۴. ۱۳۶: p. ۲۷-۳۵.
۳۱. Yamamoto, T. and H. Velkoff, *Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator*. *Journal of Fluid Mechanics*, ۱۹۸۱. ۱۰۸: p. ۱-۱۸.

- emission from indoor corona devices.* Environmental science & technology, ۲۰۱۰. ۴۴(۱۶): p. ۶۳۳۷-۶۳۴۲.
۵۰. Chen, J. and J.H. Davidson, *Ozone production in the negative DC corona: the dependence of discharge polarity.* Plasma chemistry and plasma processing, ۲۰۰۳. ۲۳(۳): p. ۵۰۱-۵۱۸.
۵۱. Dickson, J.S. and M. Koohmaraie, *Cell surface charge characteristics and their relationship to bacterial attachment to meat surfaces.* Applied and Environmental Microbiology, ۱۹۸۹. ۵۵(۴): p. ۸۳۲-۸۳۶.
۵۲. Hermansson, M., et al., *Hydrophobic and electrostatic characterization of surface structures of bacteria and its relationship to adhesion to an air-water interface.* Archives of Microbiology, ۱۹۸۲. ۱۳۱(۴): p. ۳۰۸-۳۱۲.
۵۳. Lubasova, D., et al., *Bacterial filtration efficiency of green soy protein based nanofiber air filter.* Journal of nanoscience and nanotechnology, ۲۰۱۴. ۱۴(۷): p. ۴۸۹۱-۴۸۹۸.
۵۴. Felt, O., P. Buri, and R. Gurny, *Chitosan: a unique polysaccharide for drug delivery.* Drug development and industrial pharmacy, ۱۹۹۸. ۲۴(۱۱): p. ۹۷۹-۹۹۳.
- in energy and environmental applications.* Energy & Environmental Science, ۲۰۰۸. ۱(۲): p. ۲۰۵-۲۲۱.
۴۳. Khalid, B., et al., *Direct blow-spinning of nanofibers on a window screen for highly efficient PM2.5 removal.* Nano letters, ۲۰۱۷. ۱۷(۲): p. ۱۱۴۰-۱۱۴۸.
۴۴. Liu, C., et al., *Transparent air filter for high-efficiency PM 2.5 capture.* Nature communications, ۲۰۱۵. ۶: p. ۶۲۰۵.
۴۵. Xu, J., et al., *Roll-to-roll transfer of electrospun nanofiber film for high-efficiency transparent air filter.* Nano letters, ۲۰۱۶. ۱۶(۲): p. ۱۲۷۰-۱۲۷۵.
۴۶. Mcintyre, J. and T. Nakajima, *Advanced fiber spinning technology.* ۱۹۹۴, Technomic Publishing Co.: Lancaster.
۴۷. Kayser, J.C. and R.L. Shambaugh, *The manufacture of continuous polymeric filaments by the melt-blowing process.* Polymer Engineering & Science, ۱۹۹۰. ۳۰(۱۹): p. ۱۲۳۷-۱۲۵۱.
۴۸. Feng, Z., Z. Long, and T. Yu, *Filtration characteristics of fibrous filter following an electrostatic precipitator.* Journal of Electrostatics, ۲۰۱۶. ۸۳: p. ۵۲-۶۲.
۴۹. Bo, Z., et al., *Nanoscale discharge electrode for minimizing ozone*