

Preparation of cellulosic air filter from bamboo fibers

Zahra Kazemi Karchangi^{1*}, Nouredin Nazarnezhad² and Seyed Hassan Sharifi³

1*-Corresponding Author, Ph.D. candidate of Wood and Cellulose Product, Sari Agricultural science and Natural Resources University, Sari, Iran, E-mail: zkazemi71@yahoo.com

2-Associate professor, Wood and Cellulose Product Department, Sari Agricultural science and Natural Resources University, Sari, Iran

3-Assistant professor, Wood and Cellulose Product Department, Sari Agricultural science and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: August 2024

Revised: November 2024

Accepted: December 2024

Abstract

Background and purpose: Nowadays, with the rapid development of human society, the pollution of particulate matter (PM) in the atmosphere has increased. Suspended particles easily enter the human respiratory system and have serious effects on health, they are considered as one of the critical and risky issues in modern urban societies. Air filters play a key role in reducing the emission of these particles and preventing their harmful effects on human health. Due to the growing importance of air pollution and its harmful effects on human health and the environment, the use of effective and environmentally friendly filters has received more attention. In this regard, natural and biodegradable materials such as bamboo fibers have been considered as a suitable alternative to synthetic polymer materials in making filters. This research focuses on the preparation and evaluation of cellulose air filter using bamboo fibers to deal with air pollution.

Materials and methods: To prepare the filter, bamboo was first pulped using the soda anthraquinone process with 25% sodium hydroxide, pulping time 2 hours and temperature 175 degrees Celsius with 0.2% anthraquinone (AQ). Then the pulp was bleached applying D₀ED₁ sequence. In the next step, the oxidation process was carried out with 3% hydrogen peroxide, 3% sodium silicate at the ratio of sodium hydroxide to hydrogen peroxide 0.8. Then 3% polyvinyl alcohol was added to the resulting suspension and stirred for 10 minutes with the same retention time for all treatments. The suspension was homogenized with an Ultra Thorax homogenizer and dried in a freeze dryer at -110°C for 72 hours to prepare the cellulose filter.

Results: The results showed that oxidation and addition of PVA have a positive effect on the mechanical and structural characteristics of the filter. The tensile strength of filters improved significantly after oxidation and adding PVA and increased from 0.236 Nm/g to 0.528 Nm/g. The amount of porosity and air permeability were also affected by oxidation and PVA addition, after oxidation, the porosity and air permeability increased by increasing the number of carboxyl groups and improving the dispersion of cellulose fibers. While the addition of PVA created strong hydrogen bonds and reduced porosity and air permeability. Electron microscopic images (SEM) also clearly showed the structural changes caused by oxidation. After oxidation and adding PVA, the density of the fiber network increased and improved the uniform dispersion of fibers and created a more coherent structure while small pores between fibers still existed. The specific surface area and the average pore size of the filters were checked using the BET method, which

shows that the specific surface area increased in the oxidized and PVA-containing filters, and the pore size was maintained in the nano scale in all filters.

Conclusion: These results show that the combination of oxidized bamboo fibers containing PVA leads to the production of efficient air filters with improved characteristics that can help reduce air pollution because these filters are able to prevent the passage of PM suspended particles by having pores at the nanoscale.

Keywords: Air filter, oxidation, polyvinyl alcohol, bamboo fibers.

تهیه فیلتر سلولزی هوا از الیاف بامبو

زهرا کاظمی کرچنگی^{۱*}، نورالدین نظرزاد^۲ و سید حسن شریفی^۳

*- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری مهندسی صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران،

پست الکترونیک: zkazemi71@yahoo.com

۲- دانشیار، گروه صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

۳- استادیار، گروه صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۳

تاریخ اصلاح نهایی: آبان ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: آذر ۱۴۰۳

چکیده

سابقه و هدف: امروزه با توسعه سریع جامعه انسانی، آلودگی ذرات معلق (PM) در جو افزایش یافته است. ذرات معلق به راحتی وارد سیستم تنفسی انسان شده و اثرهای جدی بر سلامت دارند و به‌عنوان یکی از مسائل بحرانی و مخاطره‌آمیز در جوامع شهری مدرن مطرح هستند. فیلترهای هوا نقشی کلیدی در کاهش انتشار این ذرات و جلوگیری از اثرهای مضر آنها بر سلامت انسان ایفا می‌کنند. با توجه به اهمیت روزافزون مسئله آلودگی هوا و اثرهای مخرب آن بر سلامت انسان و محیط‌زیست، استفاده از فیلترهای مؤثر و سازگار با محیط‌زیست بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، مواد طبیعی و زیست‌تجزیه‌پذیر مانند الیاف بامبو، گزینه مناسبی برای جایگزینی با مواد پلیمری مصنوعی در ساخت فیلتر محسوب می‌شوند. این تحقیق بر تهیه و ارزیابی فیلتر سلولزی هوا با استفاده از الیاف بامبو برای مقابله با آلودگی هوا متمرکز است.

مواد و روش‌ها: برای تهیه فیلتر، الیاف بامبو ابتدا از طریق فرایند سودا آنتراکینون با هیدروکسید سدیم ۲۵ درصد، مدت زمان پخت ۲ ساعت و دمای پخت ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد با مقدار آنتراکینون (AQ) ۰/۲ درصد خمیرسازی شد، سپس طی توالی DoED₁ به‌وسیله دی‌اکسید کلر و سود رنگ‌بری شد. در مرحله بعد فرایند اکسیداسیون با مقادیر پراکسید هیدروژن ۳ درصد، سیلیکات سدیم ۳ درصد و نسبت هیدروکسید سدیم به پراکسید هیدروژن ۰/۸ انجام شد. سپس ۳ درصد پلی‌وینیل‌الکل به سوسپانسیون حاصل اضافه گردید و به مدت ۱۰ دقیقه با زمان ماندن یکسان برای همه تیمارها هم زده شد. سوسپانسیون با یک هم‌ژنایزر اولترا توراکس هم‌گن شد و برای تهیه فیلتر سلولزی در خشک‌کن انجمادی در دمای ۱۱۰- درجه سانتی‌گراد در طول ۷۲ ساعت خشک گردید.

نتایج: نتایج نشان داد که اکسیداسیون و افزودن PVA تأثیر مثبت بر ویژگی‌های مکانیکی و ساختاری فیلتر دارد. مقاومت کششی فیلترها پس از اکسیداسیون و افزودن PVA بهبود قابل‌توجهی یافته و از ۰/۲۳۶ نیوتن بر گرم به ۰/۵۲۸ نیوتن بر گرم افزایش یافت. میزان تخلخل و نفوذپذیری هوا نیز تحت تأثیر اکسیداسیون و افزودن PVA قرار گرفتند که پس از اکسیداسیون، با افزایش تعداد گروه‌های کربوکسیل و بهبود پراکندگی الیاف سلولزی، تخلخل و نفوذپذیری هوا افزایش یافتند. در حالی که افزودن PVA، پیوندهای هیدروژنی قوی ایجاد نمود و تخلخل و نفوذپذیری هوا کاهش یافت. تصاویر میکروسکوپی الکترونی (SEM) نیز تغییرات ساختاری ناشی از اکسیداسیون را به‌وضوح نشان دادند، پس از اکسیداسیون و افزودن PVA تراکم شبکه فیبری افزایش یافت و پراکندگی یکنواخت الیاف را بهبود داد و ساختاری منسجم‌تر در حالی که منفذهای کوچک میان الیاف همچنان وجود داشتند ایجاد کرد. سطح ویژه و اندازه متوسط منافذ فیلترها با استفاده از روش BET بررسی شد که نشان می‌دهد در فیلترهای اکسید شده و حاوی PVA سطح ویژه بیشتر شد و اندازه منافذ در همه فیلترها در مقیاس نانو حفظ گردید.

نتیجه‌گیری: این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب الیاف بامبو اکسید شده حاوی PVA به تولید فیلترهای هوای کارآمد با ویژگی‌های بهبود یافته منجر می‌شود که می‌تواند به کاهش آلودگی هوا کمک کند، زیرا این فیلترها با دارا بودن منافذ در مقیاس نانو قادر به جلوگیری از عبور ذرات معلق PM هستند.

واژه‌های کلیدی: فیلتر هوا، اکسیداسیون، پلی‌وینیل‌الکل، الیاف بامبو.

مقدمه

با توسعه سریع جامعه انسانی و افزایش شهرنشینی و صنعتی شدن، آلودگی ذرات معلق در جو افزایش یافته است (Pui et al., 2014). این آلودگی هوا به عنوان یکی از نگرانی‌های جدی برای محیط‌زیست و سلامت عمومی، به ویژه در مناطق شهری، مطرح شده است (Zhu et al., 2021). این یک قاتل نامرئی است که در اطراف ما پنهان شده و بر نسل جوان و پیر تأثیر می‌گذارد. براساس گزارش سازمان جهانی بهداشت سالانه ۷ میلیون نفر بر اثر آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند. آسیب‌شناسی‌هایی که بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند، بیماری مزمن انسدادی ریه، سرطان ریه و عفونت‌های تنفسی از جمله پنومونی، سکنه مغزی و بیماری‌های قلبی هستند. از هر ۱۰ نفر ۹ نفر هوا را با ترکیبات آلوده تنفس می‌کنند که به عمق بافت ریه و علاوه بر آن در سیستم قلبی عروقی نفوذ می‌کند (Tiotiu et al., 2018; World Health Organization 2018; Ghebreyesus, 2018).

براساس گزارش سازمان جهانی بهداشت (WHO)، ذرات معلق (PM) مهمترین آلاینده‌های هوا در شهرهای بزرگ جهان هستند. ذرات معلق هم از نظر جنس و هم از نظر اندازه بسیار متنوع می‌باشند. با توجه به اندازه آنها به سه نوع ذرات درشت (PM_{10})، ذرات ریز ($PM_{2.5}$) و ذرات بسیار ریز ($PM_{0.1}$) تقسیم می‌شوند. ذرات معلق $PM_{2.5}$ دارای قطر $2/5$ میکرون و یا کمتر می‌باشند، به نحوی که می‌توانند به کوچک‌ترین مجاری ریه‌ها نفوذ کنند و حتی وارد جریان خون شوند. این ذرات شامل مواد غیر آلی مانند دی‌اکسیدسیلیکون (SiO_2)، سولفات (SO_4^{2-}) و نیترات (NO_3^-)، مواد آلی مانند کربن آلی و عناصر کربنی می‌باشند. این ذرات به دلیل توانایی نفوذ به عمق ریه‌ها و سیستم گردش خون، خطرات بهداشتی جدی‌ای را به همراه دارند. قرار گرفتن طولانی مدت در معرض افزایش غلظت آلودگی $PM_{2.5}$ می‌تواند باعث بیماری‌های تنفسی و قلبی عروقی شود و عملکرد ذهنی را کاهش دهد (Zhu et al., 2020). آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده، اولین استاندارد را برای ذرات معلق کمتر از $2/5$

میکرومتر ($PM_{2.5}$) در سال ۱۹۹۷، در نتیجه نگرانی در مورد اثرهای بهداشتی ذرات ریز در هوا ایجاد کرد (Pui et al., 2014). بسیاری از محققان توجه قابل ملاحظه‌ای به توسعه فیلترهای هوا با بازدهی فیلتراسیون بالا برای جداسازی ذرات معلق از هوای آلوده داشته‌اند (Zhao et al., 2016). فیلتر به هر وسیله‌ای گفته می‌شود که در آن جدایی سایر اجزای یک سوسپانسیون یا محلول، در یک سیال مایع یا گاز حاصل شود. البته جداسازی در آن به وسیله ابزارهای مکانیکی و بدون تغییر فاز ایجاد می‌شود. فیلتراسیون تقریباً به طور کامل مشخصه اندازه ذره، قطره یا مولکول جدا شده است. (Purchas & Sutherland, 2002). فیلتراسیون یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده برای تصفیه هواست. کاربرد آن در طیف گسترده‌ای از زمینه‌ها از جمله حفاظت تنفسی، تصفیه هوای احتراق پساب‌ها، پردازش مواد هسته‌ای و خطرناک، اتاق‌های تمیز (Alexandrescu et al., 2016)، فیلترهای هوای کابین، موارد خانگی و ساختمانی گسترش یافته است (Macfarlane et al., 2012).

رسانه‌های فیلتر هوا معمولاً از پلیمرهای الیاف مصنوعی ساخته می‌شوند. این مواد به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خود و طول عمر زیاد، به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. با این حال، الیاف پلیمری مصنوعی دارای معایب جدی و قابل توجهی هستند. اولین مشکل عمده این الیاف، غیرقابل بازیافت و غیرقابل تجزیه بودن آنهاست. پلیمرهای مصنوعی برای محیط‌زیست مشکلات بزرگی ایجاد می‌کنند، زیرا هزاران سال طول می‌کشد تا در طبیعت تجزیه شوند. این موضوع منجر به افزایش حجم زباله‌های پلاستیکی در محیط‌زیست شده و آسیب‌های جبران‌ناپذیری به اکوسیستم‌ها وارد می‌کند (Suriaman et al., 2022). این موضوع مدیریت زباله‌های صنعتی و شهری را پیچیده‌تر می‌کند و نیاز به راهکارهای دفع مؤثر و سازگار با محیط‌زیست را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نگرانی‌های بهداشتی نیز وجود دارد. الیاف مصنوعی مانند الیاف پشم‌شیشه، توسط آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان، به عنوان سرطان‌زاهای احتمالی برای انسان در نظر گرفته می‌شوند. این موضوع می‌تواند

فرایند اکسیداسیون خمیر

قبل از انجام اکسیداسیون، خمیر برای حذف فلزات سنگین کیلیت شد. در مرحله اول، ۶ گرم خمیر با ۳ درصد خشکی (براساس وزن خشک)، ۰/۵ درصد DTPA در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه و pH ۵/۵-۵ کیلیت شده و با آب مقطر شسته شد. سپس برای اکسیداسیون مقادیر پراکسید هیدروژن ۳ درصد، سیلیکات سدیم ۳ درصد و نسبت هیدروکسید سدیم به پراکسید هیدروژن ۰/۸ به خمیر اضافه شد. خمیر با ۱۰ درصد خشکی در حمام آب با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۹۰ دقیقه قرار داده شد و با آب مقطر شسته شد (Li et al., 2016).

تهیه فیلتر سلولزی

ابتدا برای آماده‌سازی پلی وینیل الکل ۴ PVA در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. ۳ درصد از پلی وینیل الکل به سوسپانسیون اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه با زمان ماندن یکسان برای همه تیمارها هم زده شد. سوسپانسیون با یک هم‌وزن‌ایزر اولترا توراکس (IKA T25) در ۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفت تا همگن شود. مخلوط‌های با ۱ درصد وزنی در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد و ۲۴ ساعت منجمد شدند و در خشک‌کن انجمادی در دمای ۱۱۰- درجه سانتی‌گراد در طول ۷۲ ساعت خشک گردیدند.

آزمون نمونه‌ها

اندازه‌گیری مقاومت کششی

اندازه‌گیری مقاومت کششی براساس آیین‌نامه T494-om96 استاندارد TAPPI انجام شد. حداکثر نمونه کششی که بر پهنای نمونه وارد شده و سبب گسیختگی آن می‌شود، مقاومت کششی می‌گویند. برای محاسبه شاخص مقاومت کشش از رابطه زیر استفاده گردید.

$$T_{ei} = T_e/G \quad \text{رابطه ۱}$$

$$T_{ei} = \text{شاخص مقاومت کششی (N.m/gr)}$$

$$G = \text{وزن پایه (gr/m}^2\text{)}$$

سلامتی کارگران و مصرف‌کنندگانی را که با این مواد در تماس هستند به خطر بیندازد (Long et al., 2018). در نتیجه، نیاز به توسعه و استفاده از مواد جایگزین با ویژگی‌های محیط‌زیستی و بهداشتی بهتر از جمله الیاف طبیعی یا پلیمرهای زیست‌تجزیه‌پذیر به شدت احساس می‌شود. برخلاف الیاف مصنوعی، الیاف طبیعی مانند سلولز مزایای بسیار زیادی دارند. آنها به‌طور طبیعی تولید می‌شوند و به راحتی به دست می‌آیند. الیاف سلولزی یک منبع تجدیدپذیر و زیست‌سازگار هستند و به جذب آلودگی هوا کمک می‌کنند. تولید فیلترهای هوا به منبع قابل‌اعتمادی از مواد خام نیاز دارد و یک جایگزین امیدوارکننده برای پلیمرهای مصنوعی، استفاده از الیاف گیاهی طبیعی است (Suriaman et al., 2022).

Sepahvand و همکاران (۲۰۲۱) توانستند از ترکیب نانوالیاف سلولزی و کیتوزان فیلتر سلولزی تهیه کنند که کارایی بالایی در جذب CO₂ و PM نشان داد.

مواد

در این مطالعه از ساقه بامبو گونه *Bambusa Vulgaris* استفاده شد که از جنگل آموزشی دانشکده منابع طبیعی ساری تهیه و تبدیل به قطعات ۳-۴ سانتی‌متر گردید. مواد شیمیایی مورد استفاده از شرکت Merk تهیه شد.

روش‌ها

فرایند خمیرسازی و رنگ‌بری

در فرایند خمیرسازی از هیدروکسید سدیم ۲۵ درصد، نسبت مواد شیمیایی به خرده چوب ۵:۱، مدت زمان پخت ۲ ساعت و دمای پخت ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد با مقدار آتراکینون (AQ) ۰/۲ درصد در نظر گرفته شد. پس از پخت، خمیر شسته شد تا عاری از مواد شیمیایی باقیمانده شود و طی توالی D₀ED₁ به وسیله دی‌اکسید کلر و سود رنگ‌بری شد. خمیر برای رسیدن به درجه روانی حدود ۴۰۰ میلی‌لیتر با پالاینده آزمایشگاهی PFI Mill پالایش گردید (Karchangi et al., 2024; Masrol et al., 2018).

$T_e =$ مقاومت در برابر کشش (KN/m)

میزان حجم گاز نیتروژن جذب و واجذب شده توسط سطح ماده در دمای ثابت نیتروژن مایع (۷۷ درجه کلوین) است.

میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM

برای بررسی مورفولوژی سطح فیلترهای سلولزی تولید شده از دستگاه SEM مدل Quant 250FEG ساخت شرکت Hillsboro آمریکا استفاده شد.

طرح آماری

مقایسه میانگین تیمارهای این پژوهش با روش ANOVA در نرم افزار SPSS انجام شد و گروه بندی نتایج حاصل با روش دانکن انجام گردید.

درصد تخلخل فیلتر سلولزی

ابتدا چگالی ظاهری (ρ_a) با اندازه گیری جرم و حجم هر فیلتر محاسبه شد. وزن فیلتر با استفاده از ترازوی تحلیلی (با خوانایی ۰/۰۰۰۱ گرم) تعیین شد و ابعاد (قطر و ارتفاع) فیلتر با استفاده از کولیس دیجیتالی در چهار موقعیت مختلف اندازه گیری گردید. تخلخل فیلتر با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

$$P\% = (1 - P_a/P_c) \times 100$$

رابطه ۲

P: درصد تخلخل

P_a : چگالی ظاهری

P_c : چگالی جرمی

میزان عبور هوا

نفوذپذیری هوا، فیلتر معیاری است که نشان می دهد چقدر به هوا اجازه می دهد از فیلتر عبور کند. این آزمایش براساس آئین نامه ISO 9237 و به وسیله دستگاه MOBILAIR مدل FX 3320 انجام شد. سرعت هوا به کمک جریان سنج اندازه گیری و برحسب میلی متر بر ثانیه خوانده می شود.

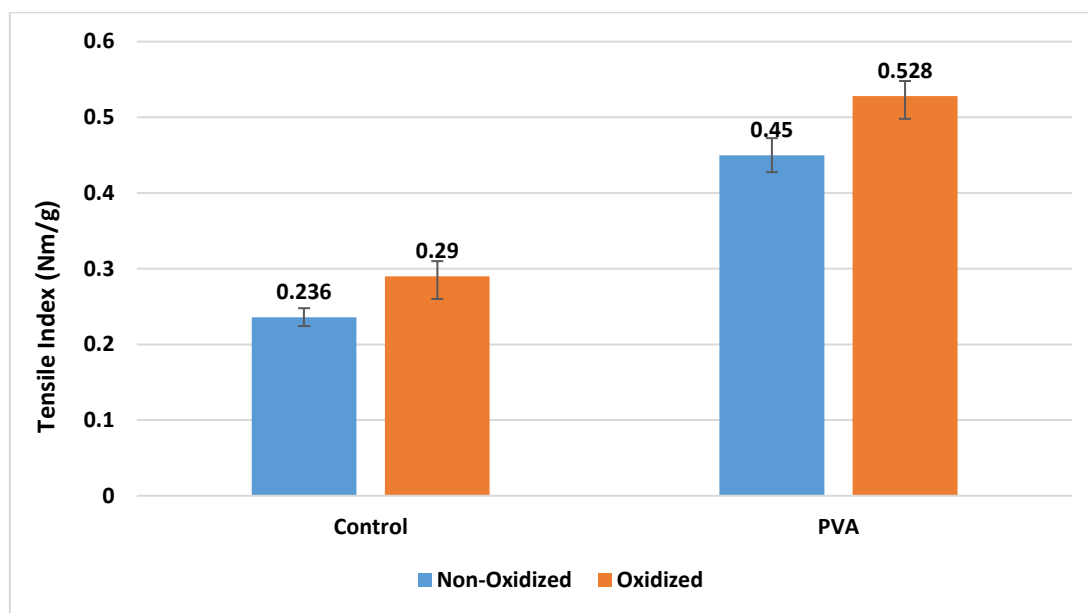
اندازه گیری سطح ویژه BET

آزمون BET برای اطلاع از میزان دقیق مساحت سطح، تخلخل و اندازه حفره های فیلتر به وسیله دستگاه Norcross مدل ASAP-2420 انجام شد. این روش براساس سنجش

نتایج

مقاومت کششی فیلتر

اثر اکسیداسیون و افزودن پلی وینیل الکل (PVA) بر شاخص کششی فیلترها در شکل ۱ ارائه شده است. این نتایج تفاوت های معناداری از نظر آماری نشان می دهند. هر دو فرایند اکسیداسیون و افزودن PVA تأثیر مثبتی بر بهبود شاخص کششی فیلترها داشته اند. براساس داده های شکل ۱، شاخص کششی فیلتر اکسید نشده و بدون افزودنی ۰/۲۳۶ نیوتن بر گرم است، در حالی که پس از اکسیداسیون و افزودن PVA این شاخص به ۰/۵۲۸ نیوتن بر گرم افزایش می یابد. این افزایش قابل توجه را می توان به تغییرات شیمیایی و ساختاری ایجاد شده در طی فرایند اکسیداسیون نسبت داد. اکسیداسیون با استفاده از پراکسید هیدروژن، گروه های کربوکسیل را به سطح الیاف سلولزی اضافه می کند که باعث تقویت ساختار میکروفیبریلی سلولز می شود. این تقویت ساختاری منجر به بهبود استحکام مکانیکی فیلتر و افزایش مقاومت در برابر کشش می شود (Vera-Loor et al., 2022). علاوه بر این، افزودن PVA نیز به بهبود استحکام فیلترها کمک می کند. حضور PVA با افزایش پیوندهای هیدروژنی و تشکیل پل های بین فیبریل های الیاف باعث می شود تا نیروی بیشتری برای شکست پیوندهای بین فیبری مورد نیاز باشد (Umair et al., 2024).



شکل ۱- اثر اکسیداسیون و افزودن PVA بر شاخص کششی فیلتر سلولزی

Figure 1. Effect of oxidation and addition of PVA on tensile index of cellulose filter

به طور چشمگیری کاهش یابد (Lin et al., 2019).
 با این حال، زمانی که PVA به ساختار فیلتر افزوده می‌شود،
 تخلخل فیلترها کاهش می‌یابد. این کاهش تخلخل با
 افزودن PVA می‌تواند به دلیل افزایش تراکم ماتریس
 پلیمری و پر شدن منافذ موجود در ساختار فیبری فیلتر
 باشد. PVA به دلیل داشتن پیوندهای هیدروژنی قوی و
 برهم‌کنش با الیاف سلولزی، باعث نزدیک‌تر شدن الیاف به
 هم می‌شود و منافذ موجود در ساختار فیلتر را کاهش
 می‌دهد. در نتیجه، کاهش تخلخل مشاهده شده به دلیل
 تغییرات ساختاری ناشی از افزودن PVA به همراه فرایند
 اکسیداسیون است که منجر به ساختار متراکم‌تر و با تخلخل
 کمتر می‌شود. این تغییرات می‌توانند بر ویژگی‌های دیگر
 فیلتر مانند کارایی فیلتراسیون نیز تأثیرگذار باشند، زیرا
 کاهش تخلخل می‌تواند به کنترل بهتر جریان هوا کمک کند
 (He et al., 2024).

درصد تخلخل فیلتر سلولزی

تخلخل یکی از ویژگی‌های مهم در تعیین کارایی
 فیلترهای سلولزی است، زیرا نقش مهمی در توانایی فیلتر
 برای جذب ذرات معلق و حفظ جریان هوا دارد. تخلخل
 فیلترهای اکسید شده و فیلتر پس از اکسیداسیون و افزودن
 PVA در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور
 که در جدول نتایج نشان داده شده، تخلخل فیلترهای اکسید
 نشده بدون افزودنی حدود ۹۹/۹۰٪ است که نشان‌دهنده
 ساختاری بازتر و با منافذ بیشتر است. پس از اکسیداسیون،
 تخلخل فیلترها به میزان کمی افزایش می‌یابد و به ۹۹/۹۲٪
 می‌رسد. این افزایش کوچک در تخلخل می‌تواند به دلیل
 ایجاد گروه‌های کربوکسیلیک در طی فرایند اکسیداسیون
 باشد که به تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین الیاف سلولزی
 کمک می‌کند. این پیوندهای هیدروژنی منجر به تغییراتی در
 ساختار سلولزی شده و به الیاف اجازه می‌دهد که به طور
 بهینه‌تری در کنار هم قرار بگیرند، بدون اینکه تخلخل

جدول ۱- اثر اکسیداسیون و افزودن PVA بر درصد تخلخل فیلتر سلولزی

Table 1- Effect of oxidation and addition of PVA on cellulose filter porosity percentage

Additives	Porosity (%)	
	Non-Oxidized	Oxidized
-	99.90	99.92
PVA	99.85	99.88

میزان عبور هوا در فیلتر سلولزی

نفوذپذیری هوا یکی از ویژگی‌های اساسی برای ارزیابی عملکرد فیلترها است، زیرا نشان‌دهنده میزان سهولت عبور جریان هوا از میان ساختار فیبری فیلتر است. میزان نفوذپذیری هوای فیلترهای اکسید شده، اکسید نشده و فیلترهای حاوی PVA مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که فیلترهای اکسید شده به‌طور کلی نفوذپذیری هوای بالاتری نسبت به فیلترهای اکسید نشده دارند. به‌طور خاص، نفوذپذیری هوای فیلترهای اکسید نشده حدود ۸۱۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه است، در حالی که این مقدار پس از اکسیداسیون به ۹۵۴/۷ میلی‌متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. این افزایش نفوذپذیری می‌تواند ناشی از تغییرات شیمیایی و فیزیکی باشد که در اثر فرایند اکسیداسیون رخ می‌دهد. اکسیداسیون باعث افزایش تعداد گروه‌های کربوکسیل و بهبود پراکندگی الیاف سلولزی می‌شود، به‌طوری‌که ساختاری با منافذ بیشتر برای عبور هوا فراهم

می‌گردد (Barbosa et al., 2013).

برای فیلترهای اکسید نشده، افزودن PVA نفوذپذیری هوا را از ۸۱۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه به ۳۸۶/۹ میلی‌متر بر ثانیه کاهش داد. همچنین در فیلترهای اکسید شده، افزودن PVA باعث کاهش نفوذپذیری هوا به ۴۲۰/۶۹ میلی‌متر بر ثانیه شد. این تغییرات در نفوذپذیری می‌تواند به دلیل تعاملات بین PVA و الیاف سلولزی باشد. PVA به دلیل داشتن گروه‌های هیدروکسیل فعال، قابلیت ایجاد پل‌های شیمیایی بین الیاف سلولزی را دارد و این پیوندهای هیدروژنی موجب می‌شوند که الیاف به هم نزدیک شوند، اما درعین‌حال، منافذ و فضای آزاد کوچکی نیز ایجاد می‌شود که به جریان هوا اجازه عبور می‌دهد (do Nascimento et al., 2021). نفوذپذیری هوای فیلترهای حاوی PVA می‌تواند به ایجاد حجم‌های آزاد کوچک در میان الیاف مربوط باشد. این حجم‌های آزاد به‌عنوان منفذهای کوچکی برای عبور هوا عمل می‌کنند و جریان هوا را تسهیل می‌نمایند (Azhar et al., 2022).

جدول ۲- اثر اکسیداسیون و افزودن PVA بر نفوذپذیری فیلتر سلولزی

Table 2- The effect of oxidation and addition of PVA on cellulose filter air permeability

Additives	Air permeability (mm/s)	
	Non-Oxidized	Oxidized
-	810 ± 65.2	954.7 ± 51.5
PVA	386.9 ± 56.3	420 ± 69.5

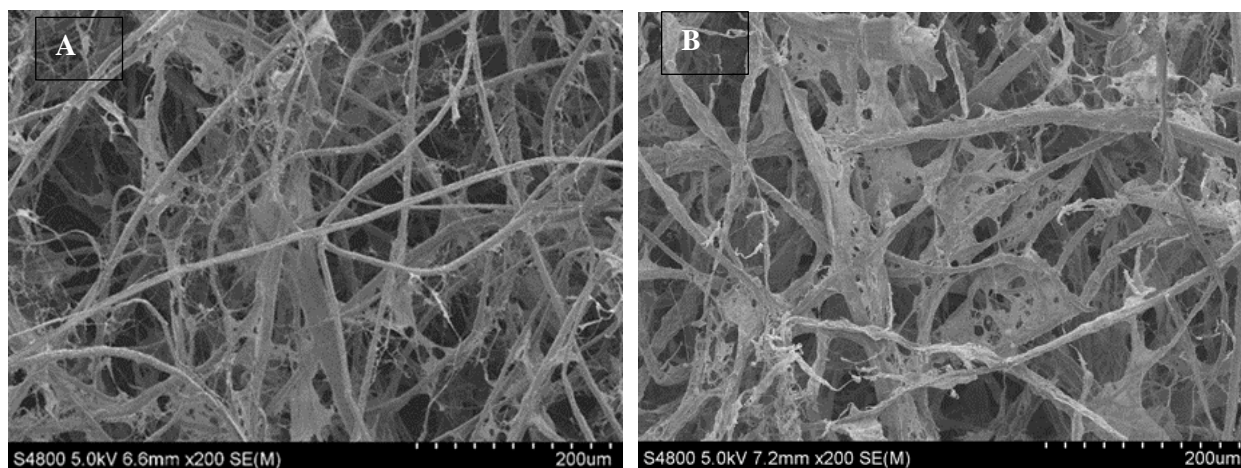
تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) فیلتر سلولزی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به‌عنوان

ابزاری مهم برای بررسی ساختار مورفولوژیکی فیلترهای سلولزی مورد استفاده قرار گرفتند. این تصاویر به‌منظور ارائه نمای دقیق‌تری از نحوه توزیع الیاف و ریزساختار منافذ،

است که نشان‌دهنده فشرده‌تر شدن شبکه فیبری است (Ebrahimi *et al.*, 2018). برهم‌کنش‌های شیمیایی بین سطح سلولز اکسید شده و ماتریس پلیمری PVA موجب پراکندگی یکنواخت الیاف و تشکیل ساختاری یکنواخت‌تر می‌شود. این پراکندگی یکنواخت، تشکیل ساختاری متراکم‌تر و همگن‌تر را داده که در آن الیاف سلولزی بهتر به هم متصل شده و شبکه‌ای محکم‌تر و سازمان‌یافته‌تر شکل گرفته است. این تغییرات منجر به کاهش قابل توجه اندازه منافذ و تخلخل فیلتر می‌شود و باعث ایجاد یک ریزساختار یکنواخت‌تر می‌گردد (Liu *et al.*, 2022).

به‌ویژه پس از فرایند اکسیداسیون و افزودن PVA استفاده شدند. شکل ۲ نتایج تصویربرداری SEM فیلتر سلولزی اکسید نشده و فیلتر پس از اکسیداسیون و افزودن PVA را نشان می‌دهد. در فیلترهای اکسید نشده، تصاویر SEM نشان می‌دهند که ساختار الیاف سلولزی اکسید نشده دارای تخلخل بالاتر و منافذ بزرگ‌تری است. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده یک شبکه فیبری بازتر و کمتر متراکم است که به دلیل نبود پیوندهای اضافی در میان الیاف سلولزی به وجود آمده است. از سوی دیگر، تصاویر مربوط به فیلترهای اکسید شده حاوی PVA حکایت از تغییرات قابل توجهی در ریزساختار منافذ و تراکم الیاف دارد. در این نمونه‌ها تخلخل کلی فیلتر کمتر شده



شکل ۲- تصاویر SEM فیلتر سلولزی اکسید نشده (A) و اکسید شده حاوی PVA (B)

Figure 2- SEM images of non-oxidized (A) and oxidized cellulose filter containing PVA (B)

از نظر آماری نشان داده‌اند. این جدول نشان می‌دهد تمامی فیلترهای تولید شده دارای منافذی در مقیاس نانو هستند، این ویژگی باعث می‌شود که این فیلترها توانایی بالایی در به دام انداختن ذرات بسیار کوچک، از جمله ذرات معلق (PM) موجود در هوا، داشته باشند. در مقایسه بین فیلترهای مختلف، مشاهده شد که اکسیداسیون و افزودن PVA به فیلترهای سلولزی موجب افزایش سطح ویژه و اندازه متوسط منافذ شد. فیلترهای اکسید نشده دارای سطح ویژه BET حدود ۳/۵۴ مترمربع بر گرم و اندازه متوسط منافذ ۴/۷۹ نانومتر بودند. این مقادیر نشان‌دهنده ساختاری بازتر و با منافذ بزرگ‌تر در

بررسی سطح ویژه (BET) فیلتر سلولزی

سطح ویژه و اندازه متوسط منافذ فیلترهای سلولزی با استفاده از رابطه Brunauer-Emmett-Teller (BET) و روش Barrett-Joyner-Halenda (BJH) تجزیه و تحلیل شد. این روش‌ها به‌طور گسترده در تجزیه و تحلیل ساختارهای نانو و میکرو استفاده می‌شوند و نتایج آنها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد کارایی فیلترها ارائه دهد. جدول ۳ سطح ویژه BET و اندازه متوسط منافذ فیلترها را نشان می‌دهد. براساس این نتایج، سطح ویژه BET و اندازه متوسط منافذ در فیلترهای اکسید شده و غیر اکسید شده تفاوت‌های معناداری

بیشتر ساختار می‌تواند به مقاومت در برابر عبور ذرات بزرگ‌تر کمک کند و به حفظ کارایی بالای فیلتراسیون در جذب ذرات ریز کمک نماید (Strand *et al.*, 2017). مساحت سطح بالاتر به معنای مساحت بالاتر برای جذب PM است، در حالی که اندازه منافذ بیشتر به معنای قابلیت تنفس بیشتر است، زیرا هوا می‌تواند به راحتی از منافذ عبور کند نسبت به فیلتری که اندازه منافذ کمتری دارد (Wang *et al.*, 2023). به‌طور کلی اندازه منافذ و افزایش سطح ویژه فیلترها موجب می‌شود که ذرات معلق با اندازه‌ای بزرگ‌تر از منافذ فیلتر نتوانند از آن عبور کنند و به دام بیفتند. این موضوع به‌ویژه برای ذرات بزرگ‌تر از ۲/۵ میکرومتر که اندازه‌ای بزرگ‌تر از منافذ فیلتر دارند، حائز اهمیت است. با توجه به اینکه این ذرات نمی‌توانند از منافذ عبور کنند، فرایند جذب تسریع می‌شود و بازدهی فیلتر افزایش می‌یابد (Sepahvand *et al.*, 2021).

فیلترهای اکسید نشده است. پس از اکسیداسیون، سطح ویژه فیلترها به ۳/۷۲ مترمربع بر گرم رسیده است، در حالی که اندازه متوسط منافذ نیز به ۷/۴۷ نانومتر رسیده است. اکسیداسیون می‌تواند باعث افزایش منافذ در فیلترها شود که این موضوع در برخی موارد به افزایش سطح ویژه منجر می‌شود (Shrotri *et al.*, 2016).

افزودن PVA به ساختار فیلترها نیز تأثیر قابل توجهی بر سطح ویژه و اندازه متوسط منافذ داشته است. به‌طور کلی، افزودن PVA باعث افزایش بیشتر سطح ویژه و افزایش منافذ شده است، با این حال اندازه منافذ در مقیاس نانو باقی ماندند. این افزایش در سطح ویژه و اندازه منافذ می‌تواند نشان‌دهنده تشکیل شبکه‌های مترکم‌تر در اثر برهم‌کنش‌های بین مولکول‌های PVA و سلولز باشد. این برهم‌کنش‌ها منجر به فرایندهای اتصال عرضی در ساختار فیلتر می‌شوند که باعث افزایش سطح ویژه می‌شود. این فرایند اتصال عرضی و چگالی

جدول ۳- اثر اکسیداسیون و افزودن PVA بر سطح ویژه و متوسط اندازه منافذ فیلتر سلولزی

Table 3- The effect of oxidation and addition of PVA on specific surface area and average pore size of cellulose filter

Cellulose Filter	BET surface area (m ² /g)	pore size (nm)
Non-Oxidized	3.54 ± 0.03	4.79
Oxidized	3.72 ± 0.03	7.47
Non-Oxidized - PVA	4.23 ± 0.03	9.22
Oxidized - PVA	4.62 ± 0.06	13.28

بحث

اکسیداسیون با افزایش تعداد گروه‌های کربوکسیل و تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین الیاف، موجب افزایش استحکام فیلتر می‌شود و باعث می‌شود شاخص کششی فیلترهای اکسید شده به‌طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های اکسید نشده باشد. همچنین، برهم‌کنش‌های کووالانسی بین گروه‌های کربوکسیل و OH موجود در PVA، استحکام بیشتری را به فیلترها می‌بخشد و منجر به بهبود قابل ملاحظه شاخص کششی می‌شود. این نتایج با یافته‌های Begum و همکاران (۲۰۱۹)

در این تحقیق، تلاش شده است تا با استفاده از الیاف بامبو، فیلتر هوای کارآمدی تهیه شود که به‌عنوان جایگزینی پایدار و زیست‌سازگار برای فیلترهای هوای سنتی که عمدتاً از پلیمرهای مصنوعی ساخته می‌شوند، معرفی گردد. نتایج نشان می‌دهد که اکسیداسیون با استفاده از پراکسید هیدروژن و افزودن پلی‌وینیل الکل PVA تأثیرات قابل توجهی بر ویژگی‌های مکانیکی و ساختاری فیلترهای سلولزی دارد.

مطابقت دارد.

اکسیداسیون و افزودن PVA به فیلترهای سلولزی باعث افزایش سطح ویژه BET و افزایش اندازه متوسط منافذ شد، اما این منافذ همچنان در مقیاس نانو باقی ماندند. این ویژگی نانومتری به فیلترها توانایی به دام انداختن ذرات معلق بسیار کوچک، از جمله PM را می‌دهد. افزایش سطح ویژه به دلیل تشکیل ساختارهای متراکم‌تر و برهم‌کنش بین PVA و سلولز است. این تغییرات در عین افزایش سطح ویژه، همچنان باعث حفظ کارایی بالای فیلتراسیون برای ذرات کوچک‌تر و بهبود بازدهی جذب ذرات از منافذ می‌شود که این نتایج با مطالعات Peng و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد.

به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از لیاف بامبو به همراه PVA و اکسیداسیون می‌تواند منجر به تولید فیلترهای هوای کارآمد و سازگار با محیط‌زیست شود. این فیلترها قابلیت جذب ذرات معلق را داشته و به‌عنوان جایگزین مناسبی برای فیلترهای مبتنی بر لیاف مصنوعی به شمار می‌روند.

نیز همخوانی دارد که بیان می‌کند حضور گروه‌های OH در PVA باعث افزایش استحکام می‌شود.

تخلخل و نفوذپذیری هوا در فیلترهای سلولزی به‌طور مستقیم با یکدیگر مرتبط هستند و تأثیر زیادی بر کارایی فیلتر دارند. پس از اکسیداسیون به دلیل ایجاد گروه‌های کربوکسیل، تغییراتی در ساختار سلولزی ایجاد شده که به لیاف اجازه می‌دهد که به‌طور بهینه‌تری در کنار هم قرار بگیرند و ساختاری با منافذ بیشتر برای عبور هوا فراهم گردد. با افزودن PVA و به دلیل ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی و برهم‌کنش با لیاف سلولزی، لیاف به هم نزدیک می‌شوند و منافذ موجود در ساختار فیلتر کاهش می‌یابد و تخلخل و نفوذپذیری هوا کمتر می‌شود. تصاویر SEM، فیلترهای سلولزی نشان داد فیلترهای اکسید نشده دارای یک شبکه فیبری باز و متخلخل با منافذ بزرگ‌تر هستند، در حالی که اکسیداسیون و افزودن PVA باعث ایجاد پیوندهای هیدروژنی بیشتر و کاهش فاصله بین لیاف می‌شود. پراکندگی یکنواخت لیاف را بهبود داده و منجر به کاهش تخلخل و تشکیل ساختاری متراکم‌تر و منسجم‌تر می‌گردد که با مطالعات Choo و همکاران (۲۰۱۷)

References

- Azhar, O., Jahan, Z., Sher, F., Niazi, M.B.K., Kakar, S.J. and Shahid, M., 2021. Cellulose acetate-polyvinyl alcohol blend hemodialysis membranes integrated with dialysis performance and high biocompatibility. *Materials Science and Engineering: C*, 126, p.112127.
- Barbosa, L.C., Maltha, C.R., Demuner, A.J., Cazal, C.M., Reis, E.L. and Colodette, J.L., 2013. A rapid method for quantification of carboxyl groups in cellulose pulp. *BioResources*, 8(1), 1043-1054.
- Begum, M.H.A., Hossain, M.M., Gafur, M.A., Kabir, A.H., Tanvir, N.I. and Molla, M.R., 2019. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol-starch composites reinforced with pulp. *SN Applied Sciences*, 1, 1-9.
- Chen, Y., Etxabide, A., Seyfoddin, A. and Ramezani, M., 2023. Fabrication and characterisation of poly (vinyl alcohol)/chitosan scaffolds for tissue engineering applications. *Materials Today: Proceedings*.
- Choo, K.W., 2017. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol/chitosan composite films reinforced with cellulose nanofiber/Choo Kai Wen (Doctoral dissertation, University of Malaya).
- Do Nascimento, F.C., de Aguiar, L.C.V., Costa, L.A.T., Fernandes, M.T., Marassi, R.J., Gomes, A.D.S. and de Castro, J.A., 2021. Formulation and characterization of crosslinked polyvinyl alcohol (PVA) membranes: effects of the crosslinking agents. *Polymer Bulletin*, 78(2), pp.917-929.
- Ebrahimi, I., Gashti, M.P. and Sarafpour, M., 2018. Photocatalytic discoloration of denim using advanced oxidation process with H₂O₂/UV. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 360, 278-288.
- Ghebreyesus, T.A., 2018. 9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action. *Nature* 39 (May): 641-43.
- He, Y., Liu, H. and Ying, W., 2024. Constructing Stable Polyvinyl Alcohol/Gelatin/Cellulose Nanocrystals Composite Electrospun Membrane with Excellent Filtration Efficiency for PM_{2.5}. *Polymers*, 16(12), 1656.

- Karchangi, Z.K., Nazarnezhad, N., Labidi, J. and Sharifi, S.H., 2024. Preparation of Filter Paper from Bamboo and Investigating the Effect of Additives. *Materials*, 17(9), p.1977.
- Li, L., Lee, S., Lee, H.L. and Youn, H.J., 2011. Hydrogen peroxide bleaching of hardwood kraft pulp with adsorbed birch xylan and its effect on paper properties. *BioResources*, 6(1), 721-736.
- Lin, Z., Xia, Y., Yang, G., Chen, J. and Ji, D., 2019. Improved film formability of oxidized starch-based blends through controlled modification with cellulose nanocrystals. *Industrial crops and products*, 140, p.111665.
- Liu, Z., Qin, L., Liu, S., Zhang, J., Wu, J. and Liang, X., 2022. Superhydrophobic and highly moisture-resistant PVA@ EC composite membrane for air purification. *RSC advances*, 12(54), 34921-34930.
- Long, J., Tang, M., Liang, Y. and Hu, J., 2018. Preparation of fibrillated cellulose nanofiber from lyocell fiber and its application in air filtration. *Materials*, 11(8), 1313.
- Macfarlane, A.L., Kadla, J.F. and Kerekes, R.J., 2012. High performance air filters produced from freeze-dried fibrillated wood pulp: fiber network compression due to the freezing process. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(32), 10702-10711.
- Masrol, S.R., Ibrahim, M.H.I., Adnan, S., Abdul Raub, R., Sa'adon, A.M., Sukarno, K.I. and Yusoff, M.F.H., 2018. Durian rind soda-anthraquinone pulp and paper: Effects of elemental chlorine-free bleaching and beating. *Journal of Tropical Forest Science*, 106-116.
- Peng, H. and Wang, S., 2017. Properties and reinforcing mechanism of cellulose reinforced polyvinyl alcohol hydrogel membranes. In *international symposium on mechanical engineering and material science (ISMEMS 2017)* (pp. 25-28). Atlantis Press.
- Pui, D.Y., Chen, S.C. and Zuo, Z., 2014. PM_{2.5} in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation. *Particuology*, 13, 1-26.
- Purchas, D. and Sutherland, K., (Eds.). 2002. *Handbook of filter media*. Elsevier.
- Sepahvand, S., Bahmani, M., Ashori, A., Pirayesh, H., Yu, Q. and Dafchahi, M.N., 2021. Preparation and characterization of air nanofilters based on cellulose nanofibers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 182, 1392-1398.
- Shrotri, A., Kobayashi, H. and Fukuoka, A., 2016. Air oxidation of activated carbon to synthesize a biomimetic catalyst for hydrolysis of cellulose. *ChemSusChem*, 9(11), 1299-1303.
- Strand, A., Sundberg, A., Retulainen, E., Salminen, K., Oksanen, A., Kouko, J., Ketola, A., Khakalo, A. and Rojas, O. 2017. The effect of chemical additives on the strength, stiffness and elongation potential of paper. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 32(3), pp.324-335.
- Suriaman, I., Hendrarsakti, J., Mardiyati, Y. and Pasek, A.D., 2022. Synthesis and characterization of air filter media made from cellulosic ramie fiber (*Boehmeria nivea*). *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2022, 3, 100216.
- Tiotiu, AI., Novakova, P., Nedeva, D., Chong-neto, HJ. and Novakova, S., 2020. Paschalis Steiropoulos, and Krzysztof Kowal. Impact of air pollution on asthma outcomes, 1-29.
- Umair, M., Azis, N., Halis, R. and Jasni, J., 2020. Investigation of kenaf paper in the presence of pva for transformers application. *Materials*, 13(21), 5002.
- Vera-Loor, A., Rigou, P., Marlin, N., Mortha, G. and Dufresne, A., 2022. Oxidation treatments to convert paper-grade Eucalyptus kraft pulp into microfibrillated cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 296, 119946.
- Wang, P., Lv, H., Cao, X., Liu, Y. and Yu, D.G., 2023. Recent progress of the preparation and application of electrospun porous nanofibers. *Polymers*, 15(4), p.921.
- World Health Organization, WHO., 2005. WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005, 1-21. 10.1016/0004-6981(88)90109-6.
- Zhao, X., Wang, S., Yin, X., Yu, J. and Ding, B., 2016. Slip-effect functional air filter for efficient purification of PM 2.5. *Scientific reports*, 6(1), 1-11.
- Zhu, M., Cao, Q., Liu, B., Guo, H., Wang, X., Han, Y., Sun, G., Li, Y. and Zhou, J., 2020. A novel cellulose acetate/poly (ionic liquid) composite air filter. *Cellulose*, 27, 3889-3902.
- Zhu, Y., Song, X., Wu, R., Fang, J., Liu, L., Wang, T., Liu, S., Xu, H. and aHuang, W., 2021. A review on reducing indoor particulate matter concentrations from personal-level air filtration intervention under real-world exposure situations. *Indoor air*, 31(6), 1707-1721.