



کاربرد نانوالیاف الکتروریسی شده به منظور حذف آلاینده‌های گازی

هانیه شکی^{*}

۱- استادیار، گروه مهندسی پلیمر، دانشکده فنی و مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مروری	دی‌اکسیدکربن مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای است که به مقدار زیاد در جو زمین منتشر می‌شود. این مقدار زیاد دی‌اکسیدکربن در جو دمای زمین را افزایش می‌دهد و مشکلات عظیمی را ایجاد می‌کند که بر زندگی انسان تأثیرگذار است مانند گردباد شدید، طوفان، سیل، خشکسالی و باران‌های اسیدی. بخش اصلی انتشار دی‌اکسیدکربن از احتراق سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شود که منبع اصلی انرژی مورد استفاده برای تأمین تقاضای انرژی بشریت در حال حاضر و آینده نزدیک است. در سال‌های اخیر، غشاهای نانوالیاف به‌عنوان جاذب آلاینده بسیار مورد توجه قرار گرفته است که در مقایسه با جاذب‌های معمولی، از بسیاری جهات مانند ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا، شار نفوذ و انتخاب‌پذیری بالا، افت فشار پایین، انعطاف‌پذیری بالا و جذب هدفمند، برتری دارند. بنابراین، غشاهای نانوالیاف که معمولاً به روش الکتروریسی تهیه می‌شوند، پتانسیل بسیار خوبی برای جذب و جداسازی آلاینده‌های گازی مانند دی‌اکسیدکربن از هوا دارند. علاوه بر نسبت سطح به حجم فوق العاده بالا، نانوالیاف اصلاح شده دارای گروه‌های عاملی مختلفی هستند که عملکرد آن‌ها را بهبود می‌بخشند. در این مقاله، بررسی کلی از آثار منتشر شده در دهه گذشته در مورد توسعه غشاهای نانوالیاف متخلخل مبتنی بر الکتروریسی برای حذف کارآمد دی‌اکسیدکربن انجام شده است. نانوالیاف الکتروریسی شده از مواد مختلف پلیمری به همراه سطح ویژه و ظرفیت جذب یا بازده حذف آلاینده CO ₂ گزارش شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی بازده حذف یا ظرفیت جذب، حذف بالای دی‌اکسیدکربن توسط نانوالیاف را تایید می‌کنند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸	
کلید واژه‌ها: آلاینده‌های گازی، دی‌اکسیدکربن، جاذب، نانوالیاف، الکتروریسی	

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: h.shaki@gu.ac.ir



Application of electrospinning nanofibers for gaseous pollutants removal

Hanieh Shaki^{*1}

1- Assistant Professor, Department of Polymer Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran

Article Info

Abstract

Article type:
Review Article

Article history:

Received:
06/03/2022

Accepted:
14/03/2023

Available online:
19/03/2023

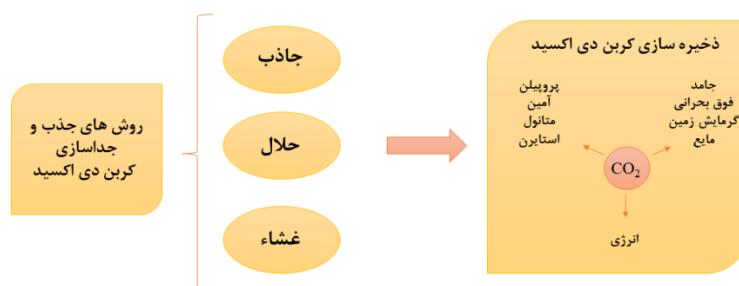
Keywords:
Gaseous pollutants,
Carbon dioxide,
Adsorbent,
Nanofiber,
Electrospinning

Carbon dioxide is the most important greenhouse gas that is released in large quantities into the atmosphere. Excess carbon dioxide in the atmosphere increases the earth temperature and creates enormous problems that affect human existence, such as severe tornadoes, storms, floods, droughts and acid rain. The main source of Carbon dioxide emissions is fossil fuels combustion, which are the main sources of energy used to meet human energy demand now and in the near future. In recent years, nanofiber membranes have been highly regarded as pollutant adsorbents compared to conventional adsorbents, which are superior in many ways such as porous structure, high specific surface area, high penetration flux and selectivity, low pressure drop, high flexibility and targeted adsorption. So, nanofibers membranes, which are usually prepared by electrospinning method, have excellent potential for adsorption and separation of carbon dioxide from the air. In addition to the extremely high surface to volume ratio, modified electrospinning nanofibers have different functional groups that improve their performance. In this article, a general review of the researches published in the last decade on the development of porous nanofibers membranes based on electrospinning for the efficient removal of carbon dioxide has been done. The electrospinning nanofibers of different polymer materials were evaluated along with the specific surface area and absorption capacity or CO₂ pollutant removal efficiency. Studying the removal efficiency or absorption capacity confirms the high removal of carbon dioxide by nanofibers.

* Corresponding author E-mail address: h.shaki@gu.ac.ir

مقدمه

انتشار عظیم گازهای گلخانه‌ای منجر به گرم شدن کره زمین شده است، که تهدیدی نگران کننده برای محیط زیست و بهداشت عمومی است بنابراین، نگرانی عمده دانشمندان برای حل این مسئله بوده است [۴-۱]. گازهای گلخانه‌ای متعددی مانند CO_2 , CH_4 , NO_x , SO_x و غیره وارد محیط زیست می‌شوند، اما دی‌اکسیدکربن به دلیل انتشار بسیار زیاد آن از منابع مختلفی که شامل نیروگاه‌ها، اتومبیل‌ها و صنایع هستند بیشترین سهم را در بین همه آن‌ها تشکیل می‌دهد [۵،۶]. انتشار دی‌اکسیدکربن، یکی از مهم ترین گازهای گلخانه‌ای، نگرانی‌های زیادی راجع به رابطه بین دی‌اکسیدکربن و انسان و گرم شدن کره زمین ایجاد کرده است، انتشار دی‌اکسیدکربن ممکن است به آلودگی هوای شهری، باران اسیدی، و مشکلات بهداشتی منجر شود [۷،۸]. گزارش شده است که غلظت دی‌اکسیدکربن در جو زمین در طی نیم قرن گذشته از حدود ۳۱۰ ppm به ۳۹۴ ppm افزایش یافته است و پیش بینی می‌شود در صورت عدم کنترل منابع انسانی همچنان به افزایش خود ادامه دهد [۹،۱۰]. بنابراین توسعه و به کارگیری فناوری‌های جذب و ذخیره سازی دی‌اکسیدکربن برای مقابله با افزایش دی‌اکسیدکربن ضروری است [۱۱]. فناوری‌های جذب و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن برخی از گزینه‌های امیدوار کننده و موثر را برای کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن ارائه می‌دهد [۱۲]. شکل ۱ مسیرهای ساده تولید دی‌اکسیدکربن، جذب یا جداسازی و ذخیره‌سازی یا استفاده مجدد از آن را نشان می‌دهد. تکنیک‌های جذب و ذخیره سازی بر سه روش متمرکز شده است، یعنی فرایند پیش احتراق، احتراق پس از سوخت و احتراق کامل با اکسیژن خالص^۱ [۱۳،۱۴].



شکل ۱- تولید، جذب و ذخیره سازی یا استفاده مجدد از دی‌اکسیدکربن [۱۴-۱۲].

برای کاهش مقدار دی‌اکسیدکربن منتشر شده در جو زمین، چهار روش اصلی برای جذب و ذخیره سازی ایجاد شده است: جذب محلول، جاذب، نفوذ غشایی و تقطیر [۱۵،۱۶]. بدیهی است که دستیابی به اکثر این فناوری‌ها به شدت وابسته به توسعه مواد است. در بین آن‌ها، فرایند جذب یا استفاده از جاذب به دلیل مصرف کم انرژی، هزینه کم تجهیزات و سهولت کاربرد، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. تعدادی از مواد جاذب برای جذب دی‌اکسیدکربن مورد استفاده قرار گرفته است، مواد با سطح ویژه بالا (به‌عنوان مثال، زئولیت، کربن فعال) به‌طور گسترده‌ای بررسی شده است [۱۷،۱۸].

تحقیقات در دهه‌های اخیر فناوری‌های مختلفی از جمله جذب شیمیایی و فیزیکی، جداسازی از طریق غشاها و جذب را نشان داده است که می‌تواند برای جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن به کار رود، با این حال، این فناوری‌ها هنوز برای استفاده در مقیاس وسیع مناسب نیستند [۱۹]. بنابراین، هنوز نیاز به تحقیقات کامل برای تجاری‌سازی این فناوری‌ها وجود دارد، تا آن‌ها بتوانند مقادیر عظیمی از گاز دودکش‌ها را پردازش کرده و به‌طور قابل توجهی میزان جذب شده را به محفظه‌های امن انتقال دهند [۲۰]. انواع مواد جاذب برای جذب دی‌اکسیدکربن سنتز شده است، مانند زئولیت و کربن فعال. نانومواد، با ارائه سطح ویژه بالاتر و ساختار متخلخل مناسب پتانسیل بالایی را برای جذب و ذخیره سازی دی‌اکسیدکربن دارند. سطح ویژه بالاتر این مواد مکان‌های واکنش بیشتری را فراهم می‌کند و منجر به افزایش ظرفیت جذب می‌شود و وزن و هزینه کمتری را برای بسترهای حاصل فراهم می‌آورد، از این رو، آن‌ها نسبت به مواد مرسوم ترجیح داده

^۱ Oxyfuel combustion

می‌شوند. از بین این نانومواد^۱، لیاف‌ها کمترین مقاومت ممکن را در برابر انتقال گاز و سینتیک فوق العاده سریع ارائه می‌دهند. روش‌های مختلفی برای تولید لیاف وجود دارد که قادر به تولید لیاف در مقیاس نانو هستند. با این حال، اعتقاد بر این است که الکتروریسی پرکاربردترین، متنوع‌ترین و مقیاس‌پذیرترین روش تولید نانوالیاف‌ها است [۲۱، ۱۰]. الکتروریسی یک فرایند ساده و آسان با حداقل سرمایه‌گذاری است. در الکتروریسی، مورفولوژی لیاف را می‌توان با پارامترهای فرآیند کنترل کرد [۲۲]. اما اخیراً این فرایند بسیار زیاد مورد توجه قرار گرفته است زیرا از پتانسیل بسیار بالایی برای تولید نانوالیاف با خصوصیات استثنایی و خاص، به عنوان مثال نفوذپذیری بالاتر و سطح با نسبت حجم و قطر بالا برخوردار است [۲۳].

روش‌های جذب دی‌اکسیدکربن

تاکنون روش‌های مختلفی برای جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن گزارش شده است، هم چنین، ۱۲۹۷ اختراع درباره جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن توسط جاذب‌ها^۲، حلال‌ها^۳ و غشاهای^۴ ثبت شده است. در بین آن‌ها، تقریباً ۳۷/۵٪ (۴۸۶ اختراع ثبت شده) متعلق به حلال‌ها، ۳۵/۵٪ (۴۶۱ اختراع ثبت اختراع) و ۲۷٪ (۳۵۰ اختراع ثبت شده) به ترتیب متعلق به جاذب‌ها و غشاهای می‌باشد [۲۴]. دلیل احتمالی عدم ثبت اختراعات بیشتر بر روی حلال‌ها و جاذب‌های جامد، این است که انواع زیادی از مواد را می‌توان به عنوان حلال یا جاذب‌های جامد استفاده کرد. به عنوان مثال، اتانول آمین‌ها^۵، آمونیاک^۶، محلول‌های فلز قلیایی (به عنوان مثال، هیدروکسیدهای فلز قلیایی، کربنات‌ها یا فسفات‌ها)، نمک‌های آمینو اسید^۷، پلی‌گلیکول اتر^۸ و مایعات یونی^۹ می‌توانند به عنوان حلال‌ها [۲۵-۲۸] و کربن فعال، زئولیت، غربال مولکولی^{۱۰}، سیلیکاژل^{۱۱}، جاذب‌های جامد آمین، چارچوب‌های آلی فلزی^{۱۲}، ترکیبات فلزی (به عنوان مثال، اکسیدهای فلزی، هیدروکسیدها، پراکسیدها، سیلیکات‌ها و کربنات‌ها) و غیره می‌توانند به عنوان جاذب جامد استفاده شوند [۲۹-۳۲]. در مقابل، مواد نسبتاً کمتری به عنوان غشا به منظور جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن بررسی شده است. مواد اصلی غشاهای پلی‌ایمید^{۱۳}، زئولیت‌ها و فلئوروپلیمرها هستند [۳۳، ۳۴].

جزئیات بیشتر در مورد جاذب‌ها، حلال‌ها و غشاهای به شرح زیر می‌باشد:

حلال‌ها

به طور کلی، حلال‌ها را می‌توان بر اساس خواص طبقه‌بندی کرد [۳۵] اما در مطالعات مربوط به جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن، حلال‌ها معمولاً بر اساس نوع واکنش‌پذیری آن‌ها در محلول طبقه‌بندی می‌شوند [۳۶]. حلال‌ها به چهار دسته شیمیایی، فیزیکی، فیزیکی-شیمیایی و مخلوط حلال‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند.

حلال‌های شیمیایی^{۱۴}

به دلیل واکنش‌های شیمیایی بین حلال‌ها و دی‌اکسیدکربن، این حلال‌ها به عنوان "حلال‌های شیمیایی" شناخته شده‌اند. آمین‌ها، محلول‌های نمکی، آمونیاک نمونه‌هایی از این نوع حلال‌ها هستند [۳۷]. از مزایای اصلی حلال‌های شیمیایی عدم حساسیت نسبی نسبت

¹ Nanomaterials

² Absorbent

³ Solvent

⁴ Membrane

⁵ Ethanolamine

⁶ Ammonia

⁷ Amino acid

⁸ Polyglycol ether

⁹ Ionic liquid

¹⁰ Molecular sieve

¹¹ Silica gel

¹² Metal-organic framework

¹³ Polyimide

¹⁴ Chemical solvents

به فشارهای جزئی گازهای اسیدی، میزان جذب گازهای اسیدی تا ppm و ضرایب انتقال جرم جذب و دفع زیاد است. مهم ترین مضرات این حلال‌ها، انرژی زیاد برای احیاء حلال، انتخاب پذیری نامناسب بین گازهای اسیدی، قیمت بالای مواد، گرمای زیاد جذب، خوردگی زیاد، وجود واکنش‌های جانبی و آسیب‌های محیط زیستی است [۳۸].

حلال‌های فیزیکی^۱

در فرآیندهای جذب فیزیکی، قانون هنری^۲ اعمال می‌شود و جذب گاز در شرایط فشار بالا حاصل می‌شود. در این نوع فرآیندها، برخلاف جذب شیمیایی احیاء حلال ممکن است با کاهش فشار انجام شود و علاوه بر این، گرما لازم نیست [۳۹]. در مقایسه با جذب شیمیایی، حلال‌های فیزیکی ظرفیت جذب بیشتری دارند و از این رو منجر به کاهش نرخ چرخش حلال می‌شوند [۴۰]. مزیت دیگر حلال فیزیکی انتخاب پذیری آن‌ها بین گازهای اسیدی است. مضرات حلال‌های فیزیکی حساسیت آن‌ها به فشارهای جزئی گاز اسیدی (باید زیاد باشد) و لزوم داشتن غلظت کم گازهای بی اثر است [۴۱].

حلال‌های فیزیکی-شیمیایی^۳

مایعات یونی حلال‌هایی هستند که هم رفتار فیزیکی و هم رفتار شیمیایی از خود نشان می‌دهند و از این رو ما آن‌ها را در یک بخش جداگانه در عنوان حلال‌های فیزیکی-شیمیایی در نظر گرفتیم. این حلال‌ها از کاتیون‌ها^۴ و آنیون‌ها^۵ تشکیل شده‌اند و به دلیل خاصیت‌های منحصر به فرد آن‌ها از جمله فشار بخار کم، نقطه ذوب کم، ماندگاری مایع در طیف گسترده‌ای از دما و پایداری حرارتی کاربرد گسترده‌ای در مناطق مختلف دارند [۴۲]. با استفاده از ترکیب بسیاری از آنیون‌ها و کاتیون‌ها می‌توان به طراحی حلال جدید پرداخت. بنابراین، با طراحی مایعات یونی مختلف می‌توان ویژگی‌های مورد نظر را بدست آورد. با وجود این، لازم به ذکر است که برخی از مایعات یونی خواص مضر مانند سمیت و خوردگی را نشان می‌دهند. در مقابل، از آنجا که تعداد مایعات یونی ممکن برای طراحی بیش از حد زیاد است، کشف یک سنتز چالش برانگیز با یک روش آزمون و خطا وقت گیر و گران است [۴۳].

مخلوط حلال‌ها^۶

هر حلال از خصوصیات مطلوبی برخوردار است، از این رو محققان اظهار داشتند که با ترکیب آن‌ها می‌توانند از ویژگی‌های مثبت هر حلال استفاده کنند. به عنوان مثال، با ترکیب آمین‌های اولیه / ثانویه^۷ با آمین‌های سوم / مختل شده^۸، می‌توان یک سینتیک واکنش سریع با ظرفیت جذب بالا و نیاز کم انرژی برای بازسازی به دست آورد. مخلوط حلال‌ها را می‌توان به دو دسته اصلی یعنی مخلوط حلال‌های شیمیایی و مخلوط حلال‌های فیزیکی و شیمیایی طبقه‌بندی کرد [۴۴]. علاوه بر مخلوط معمول حلال‌ها، برخی از مخلوط‌های حلال رفتار تغییر فاز را نشان دادند.

جاذب‌های جامد

جامدی که بر روی سطح آن جذب اتفاق می‌افتد جاذب و مایع جذب شده را مجذوب می‌نامند. جذب سطحی^۹ بر روی سطح مشترک جامد-مایع اتفاق می‌افتد. خاصیت جذب جامدهای یک مسئله دیگر جذب است. جذب یک پدیده عمومی است و تمام جامدها، مایعات و

¹ Physical solvents

² Henry's law

³ Physical-chemical solvents

⁴ Cations

⁵ Anions

⁶ Mixture of solvents

⁷ Combining primary/secondary

⁸ Tertiary/hindered amines

⁹ Adsorption

بخارات را مقداری جذب می‌کنند [۴۵]. بسیاری از جامدات این خاصیت را دارند که بتوانند مقداری گاز یا ماده حل شده در حلالی را جذب نمایند.

جاذب‌های جامد ممکن است با مولکول‌های دی‌اکسیدکربن اثر متقابل شیمیایی یا فیزیکی داشته باشند. جاذب‌ها را می‌توان با توجه به درجه حرارت جذب و دفع آن‌ها به سه دسته (۱) درجه حرارت پایین (کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد)، (۲) درجه حرارت متوسط (۲۰۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) و (۳) درجه حرارت بالا (بیشتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) طبقه بندی کرد [۴۶].

فرایند غشایی

به عنوان جایگزینی برای فرآیندهای معمولی برای جداسازی و جذب دی‌اکسیدکربن، فناوری غشایی به دلیل انتخاب‌پذیری، کارایی، انعطاف پذیری، توانایی حفظ دی‌اکسیدکربن در فشارهای بالا و انجام جداسازی با انرژی کم، پتانسیل بسیار خوبی برای جذب دی‌اکسیدکربن را نشان می‌دهد [۴۷]. غشاهای انتخاب پذیر دی‌اکسیدکربن امکان جداسازی دی‌اکسیدکربن از جریان‌های مختلف گازی را دارند، مانند:

(۱) گاز خروجی (سیستم پس از احتراق)

(۲) گاز طبیعی (پردازش گاز طبیعی)

(۳) هیدروژن (سیستم‌های پیش احتراق) یا اکسیژن حاصل از نیتروژن (در سیستم احتراق oxyful) یا احتراق با اکسیژن خالص. علاوه بر این، غشاهای دارای چندین مزیت ذاتی نسبت به سایر تکنیک‌های جداسازی از جمله طراحی ساده و بدون قطعات متحرک، عملیات پاکسازی محدود و جداسازی یک مرحله‌ای هستند و می‌توان آن‌ها را به راحتی در انتهای جریان گازهای دودکش نیروگاه بدون نیاز به یکپارچه‌سازی پیچیده مجدداً نصب کرد [۴۸]. علاوه بر این، غشاهای احیا دوباره نیازی به افزودن مواد شیمیایی ندارند. مزایای فوق‌الذکر، به‌طور عمده بهره‌وری انرژی و سهولت در کاربرد، به غشا اجازه می‌دهد تا در برخی از برنامه‌های جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن مانند شیرین‌سازی گاز طبیعی، پیشرفت‌های تجاری قابل توجهی داشته باشند [۴۹]. در مقابل، فناوری غشایی هنوز به صورت تجاری برای جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن از گاز دودکش مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، اگرچه این غشاهای انتخابی معقول برای جذب دی‌اکسیدکربن از گاز دودکش‌ها به نظر می‌رسد، جایی که فشارها و غلظت دی‌اکسیدکربن زیاد است. به‌طور خاص، کاربرد گسترده آن‌ها در مقیاس صنعتی محدود به این واقعیت است که بیشتر غشاهای در مقیاس آزمایشگاهی و در شرایط نسبتاً ایده‌آل و نه در یک محیط صنعتی واقعی آزمایش شده‌اند [۵۰].

غشاهای جداسازی گاز را می‌توان به این ترتیب طبقه‌بندی کرد [۵۱]:

(۱) پلیمری (آلی)

(۲) معدنی (فلزی و متخلخل)

(۳) مخلوط ماتریس (ترکیبی یا هیبریدی)^۱

مواد جدید برای جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن

تعدادی مواد جدید برای جذب دی‌اکسیدکربن از فرآیندهای پیش احتراق، پس از احتراق، و فرایندهای oxyfuel وجود دارد [۵۲]. نمونه‌هایی از مواد جدید شامل مایعات یونی (ILs)، چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs)، غشاهای جاذب‌های الیافی و نانوالیافی است.

مایعات یونی

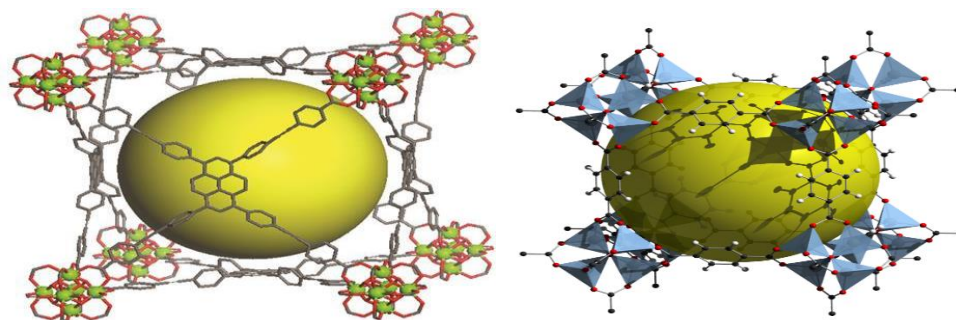
یکی از روش‌های جذب و به دام انداختن دی‌اکسیدکربن استفاده از مایعات یونی است. طبیعت تقریباً غیرفرار، پایداری بالا در برابر آتش و قرار گرفتن در معرض حرارت و تنوع در مقاومت در برابر مواد شیمیایی، آن‌ها را به عنوان گزینه‌ی مناسبی برای جذب و به دام انداختن

^۱ Hybrid

دی اکسیدکربن انتخاب می‌کند [۵۳]. مکانیسم جذب دی اکسیدکربن در مایعات یونی اغلب براساس جذب فیزیکی است و شامل یک ارتباط ضعیف بین مولکول‌های مایعات یونی و دی اکسیدکربن است. هنگامی که دی اکسیدکربن از مخلوط گاز حذف شد، می‌تواند با کاهش فشار یا افزایش دما از مایعات یونی (که قابل استفاده مجدد است) آزاد شود. در حالی که ویسکوزیته مایعات یونی از بین رفتن حلال از جریان گاز را به حداقل می‌رساند، این ویژگی همچنین انتقال جرم را محدود می‌کند، و میزان جذب کاهش می‌یابد [۵۴]. برای غلبه بر این کاستی‌ها و افزایش ظرفیت مایعات یونی ساده، مایعات یونی عامل دار شده با آمین توسعه یافته‌اند، که اجازه می‌دهد میزان بالاتری از جذب به دست آورد [۵۵].

چارچوب‌های فلزی-آلی

چارچوب‌های فلزی-آلی مواد جدیدی هستند که به وسیله پیوندهای مختصات بین لیگاند^۱های چندتایی و اتم‌های فلزی یا گروه‌های فلزی حاوی فلز کوچک ساخته شده‌اند، که اخیراً به دلیل وجود ساختار متخلخل، مساحت سطح بزرگ و کاربردهای بالقوه به عنوان جاذب‌های جدید مورد توجه شدید پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۵۶]. بیشتر مواد چارچوب‌های فلزی-آلی دارای ساختارهای سه بعدی با منافذ یکنواخت و شبکه‌ای از کانال‌ها هستند (شکل ۳). فضاهای خالی باقی مانده درون ساختارهای سه بعدی می‌توانند مولکول‌های مهمان دیگر را جذب کنند [۵۷]. تخلخل دائمی و خصوصیات ساختاری متناسب تر چارچوب‌های فلزی-آلی، آن‌ها را نسبت به مواد متخلخل معمولی مانند زئولیت‌ها و کربن‌های فعال برتر می‌کند [۵۸].



شکل ۳- ساختار سه بعدی چارچوب‌های فلزی-آلی [۵۷]

غشاهای

غشای جداسازی گاز معمولاً از چندین لایه با کارکردهای مختلف تشکیل شده است. یک لایه نازک انتخاب پذیر متراکم (ضخامت ۱۰۰ نانومتر) جداسازی مولکولی^۲ را انجام می‌دهد، در حالی که یک ساختار پشتیبانی مولکولی مقاومت مکانیکی و حداقل مقاومت حمل و نقل را فراهم می‌کند [۵۹]. مواد تشکیل دهنده غشاهای سه بعدی معمول به دو دسته غیر آلی (به عنوان مثال، سرامیک، اکسید فلز، فلز، غربال‌های مولکولی و چارچوب‌های فلزی-آلی) یا آلی (به عنوان مثال، سلولز استات^۳، پلی سولفون^۴، پلی آمید^۵ و پلی ایمید) طبقه بندی می‌شوند. مهم ترین بخش این فرآیند، غشایی است که از پلیمر کامپوزیتی^۶ ساخته شده است که یک لایه نازک انتخاب پذیر به لایه ضخیم تر، غیر انتخابی و کم هزینه متصل می‌شود که باعث تقویت مکانیکی غشا می‌شود. همچنین از این روش برای جداسازی سایر گازها مانند O_2 از N_2 و CO_2 از گاز طبیعی استفاده شده است. از طریق توسعه غشاهای کارآمد، آئودوس^۷ و گیلن^۸ بازده جداسازی دی اکسیدکربن را از

¹ Ligand

² Molecular separation

³ Cellulose acetate

⁴ Polysulfone

⁵ Poly amid

⁶ composite

⁷ Audos

⁸ Guillen

۸۲٪ به ۸۸٪ رساندند. توسعه غشاهای سرامیکی و فلزی [۶۰] و غشاهای پلیمری [۶۱] برای انتشار غشاء می‌تواند به طور قابل توجهی غشاء کارآمد تری را برای جذب دی اکسیدکربن از فرآیندهای جذب مایع تولید کند. چیانگ و همکاران [۶۱] یک بررسی کلی در مورد فناوری جذب دی اکسیدکربن با استفاده از غشاها انجام داد و با سایر فناوری‌های جداسازی مانند جذب مقایسه کرد. خاطرنشان کرد: عملکرد یک سیستم غشایی به شدت تحت تأثیر شرایط گاز خروجی از دودکش مانند غلظت و فشار کم دی اکسیدکربن است که مهمترین موانع استفاده از این فناوری است. علاوه بر این، برانده^۱ و همکاران [۶۲] نشان دادند که اگرچه در سیستم‌های غشایی جداسازی گاز پیشرفت‌های چشمگیری وجود دارد، اما آن‌ها هنوز برای تحقق پتانسیل‌های این فناوری فاصله زیادی دارند. غشا و فرآیندهای غشایی تعدادی از مزایای ذاتی نسبت به سایر فناوری‌ها برای جداسازی گازها ارائه می‌دهند از جمله (۱) عملیات ساده و بدون نیاز به قطعات متحرک؛ (۲) جداسازی سازگار با محیط زیست و بدون استفاده از مواد شیمیایی خطرناک؛ (۳) رد پای کوچک، که در بعضی از برنامه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (به عنوان مثال، هواپیمای مسافربری، فضاپیما، یا روی سیستم عامل‌های گاز طبیعی دریایی)؛ و (۴) مصرف انرژی کمتری به دلیل اینکه می‌توانند گونه‌ها را بدون تغییر فاز جدا کنند [۶۳].

جاذب‌های الیافی و نانوالیاف‌ها

جاذب‌های جامد آمین با استفاده از ساختار الیافی به جای ذرات به عنوان ماتریس انتظار می‌رود به دلیل مساحت سطح بالا و تخلخل آن‌ها، افت فشار کم، و انعطاف پذیری ماتریس الیاف‌ها، مزایای شگفت‌انگیزی برای جذب دی اکسیدکربن ارائه دهند [۶۴]. جاذب‌های آمین به عنوان یکی از گزینه‌های اصلی برای جذب و جداسازی دی اکسیدکربن به کار می‌رود و کاندیداهای بالقوه‌ای برای محدود کردن انتشار دی اکسیدکربن از طریق جداسازی هستند. آمین‌ها انتخاب پذیری ذاتی را به این مواد منتقل می‌کنند. تنها نقطه ضعف عمده آن‌ها اضافه شدن وزن غیرمولد به ماده جاذب است [۶۵]. کاهش در حلال و مقادیر پشتیبانی می‌تواند ظرفیت جذب دی اکسیدکربن را افزایش دهد (به عنوان مثال، گرم دی اکسیدکربن / گرم جاذب)؛ علاوه بر این، ممکن است انرژی موثر برای برگشت و بازسازی جاذب‌های آمین را فراهم کند [۶۶]. پلی اتیلن آمین، با داشتن یک آمین برای هر دو اتم کربن، یک کاندیدای بسیار آینده نگر برای جذب و به دام انداختن دی اکسیدکربن است، اما ویسکوزیته^۲ بالای آن ناشی از ساختار شاخه ای و وزن مولکولی بالا، جذب دی اکسیدکربن را بسیار کند می‌کند. بارگیری مناسب پلی اتیلن آمین^۳ از طریق اتصال عرضی^۴ در حضور برخی از تکیه گاه‌های مناسب متخلخل، می‌تواند یک جاذب دی اکسیدکربن کارآمد را ایجاد کند [۶۷].

نانوالیاف کربن

کربن‌ها به دلیل ویژگی‌های بارز آن یکی از کاندیداهای اصلی جذب و جداسازی دی اکسیدکربن هستند. با توجه به روش‌هایی که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، پیش سازهای حاوی آمین برای سنتز کربن‌ها مستقر شده اند که ذاتاً باید برخی آمین‌ها را در ساختار خود داشته باشند. تحقیقات نشان می‌دهد کربن متخلخل پوشیده شده با نیتروژن دارای ظرفیت جذب بسیار بالایی برای دی اکسیدکربن هستند. برای کاهش هزینه جاذب می‌توان از منابع کربنی ارزان قیمت مانند کربن مشتق شده از پوسته بادام یا ذغال سنگ خشک و خالص استفاده کرد [۶۸].

سویلا^۵ و همکاران [۶۹]، گزارش کردند که کربن‌های پوشانده شده با نیتروژن می‌توانند ظرفیت جذب بالای ۳/۹ میلی مول بر گرم (دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و فشار ۱ بار) را برای دی اکسیدکربن ارائه دهند. چن و همکاران [۷۰] ظرفیت جذب بالای ۴/۵۷ میلی مول بر گرم را برای جذب دی اکسیدکربن با استفاده از کربن‌های غنی شده با نیتروژن با مساحت سطح نسبتاً بالا و در شرایط عملیاتی دمای

¹ Borandeh

² Viscosity

³ Polyethylene amine

⁴ Crosslinking

⁵ Sevilla

۲۵ درجه سانتی گراد و فشار ۱ بار گزارش کردند. این نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که مساحت بهینه سطح و تعداد مناسب سایت‌های فعال بر روی سطح کربن، آن‌ها را به عنوان کاندیدای بسیار مهم جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن معرفی می‌کند. با این حال، ماهیت شکننده و انتخاب پذیری کم آن‌ها برای دی‌اکسیدکربن، و جذب نسبتاً کم دی‌اکسیدکربن کمتر از ۱ میلی مول بر گرم (۲۵ درجه سانتیگراد) با فشار کم دی‌اکسیدکربن برابر با ۰/۱۵ بار، درخواست شده تا تحقیقات بیشتری انجام شود تا آن‌ها به گزینه‌ی کارآمد جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن برای برنامه‌های تجاری تبدیل شوند.

چرا نانوالیاف الکترورسی شده؟

با توجه به ساختار منحصر به فرد و خواص مکانیکی نانوالیاف، پیش بینی می‌شود که جاذب‌های مبتنی بر نانوالیاف از مقاومت بسیار کمی برای حمل و نقل گاز و در نتیجه سینتیک بسیار سریع برخوردار باشند. با توجه به مساحت سطح بالا و چگالی کم نانوالیاف، پیش بینی می‌شود که جاذب‌های نانوالیافی نیز از ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن بالایی برخوردار باشند [۷۱]. جاذب‌های نانوالیافی مختلفی (به عنوان مثال نانوالیاف‌های سلولز و نانوالیاف‌های گرافن^۱) برای جذب دی‌اکسیدکربن توسعه یافته‌اند. الکترورسی یک روش ساده و همه کاره برای تولید نانوالیاف با قطر نانومتر است. با توجه به ترکیبی از نرخ تولید بالای الیاف و سادگی تنظیمات، روش الکترورسی توانایی بی نظیری در تولید نانوالیاف با بیشتر مواد را (ارگانیک، معدنی، و غیره) دارد، به راحتی الیاف مختلفی را با ترکیب و خواص سطح مورد نظر فراهم می‌کند. نسبت سطح به حجم بالا، تخلخل زیاد (تا بیش از ۸۰٪) و عملکرد قابل تنظیم آن‌ها باعث می‌شود تا غشاهای نانوالیاف الکترورسی شده برای کاربردهای بی شماری در جداسازی گاز مفید باشند [۹۴].

فرایند الکترورسی

این تکنیک در حال حاضر بهترین تکنیک موثر و پیشرفته برای تولید نانوالیاف‌های بزرگ است. نام "الکترورسی" برای اولین بار از "چرخش الکترواستاتیک"، که تاریخ آن به سال ۱۸۹۷ ابداع شده است [۷۲]. تاریخ، آغاز الکترورسی در قرن نوزدهم را نشان می‌دهد. ریلی^۲ اولین کسی بود که تکنیک الکترورسی را در سال ۱۸۹۷ مشاهده کرد و بعداً توسط زنلی^۳ در سال ۱۹۱۴ به طور مفصل گفته شد [۷۲]. آنتوان^۴ تحولات بیشتری را در زمینه الکترورسی به ارمغان آورد، و باعث تجاری سازی و حق ثبت اختراع برای تولید نخ‌های نساجی بین سال‌های ۱۹۳۴ و ۱۹۴۴ شد. در دهه ۱۹۹۰، رنکر^۵ و روتلدگ^۶ تأیید کردند که از طریق الکترورسی پلیمرهای مختلف آلی می‌توانند نانوالیاف را تشکیل دهند. پس از آن، نشریات مربوط به الکترورسی تا حد زیادی افزایش یافته است [۷۳ و ۷۴]. فرایند الکترورسی شباهت نزدیکی با فرایند الکترواسپری دارد. در هر دو روش الکترورسی و الکترواسپری^۷، نیروهای مکانیکی معمولی مانند پنوماتیک^۸ و هیدرواستاتیک^۹ توسط نیروهای الکترواستاتیک جابگزین می‌شوند [۷۵]. از آنجا که نیروهای الکترواستاتیک برای کشیدن الیاف از محلول پلیمر استفاده می‌شوند، فرایند الکترورسی نیز به عنوان جت الکتروهیدرودینامیکی^{۱۰} شناخته می‌شود. ابزار اساسی الکترورسی از سه منطقه اصلی، که شامل سیستم ولتاژ بالا^{۱۱}، پمپ سرنگ^{۱۲}، و یک جمع کننده تشکیل شده است. شماتیکی از فرایند الکترورسی در شکل ۴ نشان داده شده است. از سیستم تأمین ولتاژ بالا برای تولید نیروهای الکتریکی لازم برای شارژ محلول پلیمری

¹ Graphene

² Riley

³ Zenly

⁴ Antoine

⁵ Reneker

⁶ Rutledge

⁷ Electro spray

⁸ Pneumatic

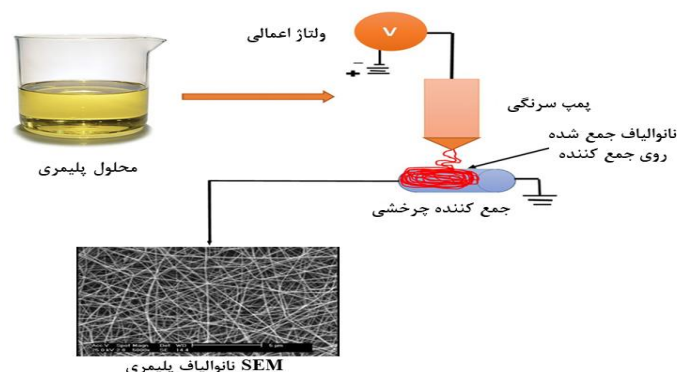
⁹ Hydrostatic

¹⁰ Electrohydrodynamics

¹¹ High voltage

¹² Syringe pump

استفاده می‌شود. معمولاً، یک ولتاژ در محدوده ۱۰ تا ۳۰ کیلوولت ولت تأمین می‌شود و از این رو نام سیستم تأمین ولتاژ بالا است. یک پمپ سرنگ برای کنترل جریان محلول پلیمری استفاده می‌شود، جمع کننده نیز به طور مداوم الیاف را جمع آوری می‌کند [۷۶].



شکل ۴- شماتیکی از تولید نانوالیاف به روش الکترورسی [۷۷].

پارامترهای الکترورسی

پارامترهای الکترورسی بسیار مهم هستند زیرا بر قطر و مورفولوژی^۱ الیاف الکترورسی شده تأثیر می‌گذارند [۷۸]. با استفاده از این پارامترها می‌توان به راحتی مورفولوژی و قطر الیاف را تغییر داد. سه دسته اصلی پارامترها که بر خواص الیاف الکترورسی شده مانند مورفولوژی و قطر اثر می‌گذارند (الف) خواص ذاتی محلول^۲، (ب) شرایط فرایند^۳، و (ج) عوامل محیطی^۴ هستند [۷۹].

پارامترهای محلول

غلظت^۵

غلظت محلول پلیمر تأثیرات زیادی در شکل گیری نانو الیاف‌های الکترورسی شده دارد. هرچه ویسکوزیته محلول بالاتر باشد، قطر نانوالیاف بزرگتر است. بنابراین، حداقل غلظت برای تشکیل الیاف در الکترورسی ضروری است. علاوه بر این در برخی موارد الکترورسی در غلظت‌های بسیار کم نیز رخ می‌دهد. این امر به دلیل کشش سطحی بالا و ویسکوزیته پایین محلول اتفاق می‌افتد [۷۶]. هنگامی که غلظت محلول کم باشد، ترکیبی از الیاف و بیدها^۶ به دست می‌آیند. با افزایش غلظت محلول کم کم بیدها از بین می‌روند و در آخر الیافی یکنواخت با ضخامت مورد نظر بدست می‌آید [۸۰].

ویسکوزیته

ویسکوزیته پارامتر دیگری است که در شکل گیری الیاف در طی فرایند الکترورسی تأثیر می‌گذارد. اگر یک محلول دارای ویسکوزیته بسیار کمی باشد، الیاف تشکیل نمی‌شوند، در حالی که یک محلول با ویسکوزیته بسیار بالا، در تخلیه جت‌ها از محلول پلیمری مشکل ایجاد می‌کند. در ادامه بیان شده است که ویسکوزیته برای مورفولوژی الیاف الکترورسی شده بسیار ضروری است. معمولاً ویسکوزیته محلول، وزن مولکولی و غلظت پلیمر به یکدیگر مرتبط می‌شوند. با افزایش غلظت یا ویسکوزیته محلول، الیاف‌های یکنواخت و با قطر بزرگ به دست می‌آیند. با این حال، ویسکوزیته کم منجر به تشکیل الیاف همراه با بیدها می‌شود [۸۱].

¹ Morphology

² Intrinsic properties of the solution

³ Processing conditions

⁴ Ambient parameters

⁵ Concentration

⁶ Bead

وزن مولکولی

وزن مولکولی پلیمر در مورفولوژی الیاف الکتروریسی شده و خواص الکتریکی مانند هدایت، ویسکوزیته و کشش سطحی تأثیر به سزایی دارد. در اصل، وزن مولکولی پلیمر تعداد گره زنجیره‌های پلیمری موجود در محلول را نشان می‌دهد که ویسکوزیته محلول نام دارد. درهم آمیختگی زنجیره‌ای نقش مهمی در فرایند الکتروریسی دارد. مشاهده شده است که محلول با وزن مولکولی خیلی کم تمایل دارد به جای الیاف، بیدهایی تشکیل دهد و محلول با وزن مولکولی بالا، منجر به تولید الیافی با قطر متوسط بزرگتر می‌شود. به طور کلی، از محلول‌های پلیمرهای با وزن مولکولی بالا در فرآیند الکتروریسی استفاده می‌شود زیرا ویسکوزیته مورد نظر را برای تولید الیاف فراهم می‌کند [۸۰].

کشش سطحی^۱

تنش سطحی، به عنوان تابعی از رفتار حلال برای محلول، یک عامل بسیار مهم در فرایند الکتروریسی است. اگر همه عوامل دیگر ثابت نگه داشته شوند، کشش سطحی می‌تواند مرزهای بالایی و پایینی از مرز فرآیند الکتروریسی را تعیین کند [۸۰]. تشکیل الیاف، بیدها و قطرات بستگی به کشش سطح محلول دارد: (الف) کشش سطحی پایین محلول کمک می‌کند تا الکتروریسی در یک میدان الکتریکی پایین تر اتفاق بیفتد، (ب) با کشش سطحی بالای محلول، فرایند الکتروریسی به دلیل ناپایداری جت‌ها مهار می‌شود و در این حالت به جای نانوالیاف، قطرات اسپری شده تولید می‌شوند. به طور کلی، با ثابت نگه داشتن غلظت، می‌توان با کاهش کشش سطحی محلول نانوالیاف بدون بید به دست آورد. همچنین، حلال‌های به کار رفته در فرآیند الکتروریسی تأثیر مهمی در کشش سطحی محلول دارند [۸۱].

پارامترهای فرایند

پارامترهای فرایند شامل ولتاژ اعمال شده، سرعت جریان / سرعت خوراک، و فاصله جمع کننده تا نوک سوزن نقش موثری در فرآیند الکتروریسی دارند. علاوه بر این، پارامترهای فرایند تأثیر زیادی در مورفولوژی و قطر نانوالیاف دارند [۸۲]. جزئیات این پارامترها و تأثیر آن‌ها بر قطر الیاف و مورفولوژی آن به طور کامل بررسی شده است.

ولتاژ اعمال شده^۲

ولتاژ اعمال شده یک عامل اصلی در الکتروریسی برای تشکیل الیاف الکتروریسی شده است. این امر به این دلیل است که تشکیل الیاف فقط هنگامی اتفاق می‌افتد که ولتاژ اعمال شده از ولتاژ آستانه^۳ فراتر رود (حدود ۱ کیلو ولت بر سانتی متر، بستگی به محلول پلیمری). همانطور که قبلاً بحث شد، افزایش ولتاژ اعمال شده باعث افزایش نیروی الکترواستاتیک محلول پلیمری می‌شود که نشان دهنده کشش جت است و در نهایت منجر به کاهش طول الیاف می‌شود [۸۳]. مشخص شده است که تغییر ولتاژ اعمال شده باعث تغییر شکل اولیه الیاف خواهد شد و در نتیجه در ساختار و مورفولوژی الیاف تغییر ایجاد می‌شود [۸۴].

سرعت جریان / سرعت خوراک^۴

در روش الکتروریسی، سرعت جریان محلول پلیمری یکی دیگر از پارامترهای فعال است که به طور مستقیم بر سرعت جت و انتقال مواد تأثیر می‌گذارد. سرعت خوراک کمتر پیشنهاد شده است تا زمان کافی برای تبخیر حلال فراهم شود، در حالی که سرعت بالای جریان منجر به ساخت الیاف همراه با بید می‌شود. با افزایش سرعت خوراک محلول، چگالی بار کاهش می‌یابد. چگالی بار زیاد ممکن است باعث ناپایداری و خم شدن جت الکتریکی شود، که به تولید الیاف با قطرهای کوچکتر کمک می‌شود. بنابراین، با افزایش نرخ خوراک، افزایش مداوم قطر الیاف وجود دارد. شایان ذکر است که الیاف همراه با بید هنگامی شکل می‌گیرند که سرعت خوراک محلول خیلی زیاد باشد زیرا زمان کافی برای تبخیر حلال فراهم نمی‌شود [۸۳].

¹ Surface tension

² Applied voltage

³ Threshold voltage

⁴ Flow rate/Feed rate

انواع جمع کننده

به‌طور کلی، جمع کننده‌ها به عنوان بستر رسانا عمل می‌کنند تا نانوالیاف شارژ شده را در طی فرآیند الکتروریسی جمع آوری کنند. معمولاً از فویل آلومینیومی به‌عنوان یک جمع‌کننده استفاده می‌شود اما انتقال نانوالیاف جمع‌آوری شده به بسترهای دیگر برای کاربردهای مختلف دشوار است. جمع کننده‌های مختلف به دلیل نیاز به انتقال الیاف مانند پین، مش سیم، میله چرخان، چرخ، نوار موازی یا مشبک و سایر انواع جمع کننده امروزه رایج شده‌اند. بسته به نوع جمع کننده و سرعت چرخش آن، جایگاه و تراز الیاف تعیین می‌شود [۸۳].

فاصله نوک سوزن تا جمع کننده^۱

فاصله بین جمع کننده و نوک سوزن پارامتر دیگری است که بر کنترل قطرها و مورفولوژی نانوالیاف تأثیر می‌گذارد. برای جلوگیری از تبخیر محلول پلیمری قبل از رسیدن الیاف به جمع کننده، لازم است یک فاصله ایده آل را انتخاب کنید. بنابراین، در روش الکتروریسی، حداقل فاصله لازم برای اطمینان از تبخیر حلال قبل از رسیدن الیاف به جمع کننده، لازم است. فاصله‌های بیشتر الیاف نازک تری را ایجاد می‌کنند. هنگامی که فاصله خیلی دور یا خیلی نزدیک باشد، بیدها تولید می‌شوند [۸۴].

عوامل محیطی

عوامل محیطی، به عنوان مثال، دما و رطوبت، نیز تأثیرات زیادی بر مورفولوژی و قطر الیاف الکتروریسی شده دارد. با افزایش دما، الیافی با قطر کم ایجاد می‌شود، در حالی که رطوبت کم می‌تواند حلال را کاملاً تبخیر کند. به طور مشابه، افزایش رطوبت منجر به ایجاد منافذ کوچک در سطح الیاف می‌شود [۸۴].

انواع نانوالیاف مورد استفاده در جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن

پلی‌اکریلونیتریل^۲

پلی‌اکریلونیتریل، پلیمری رایج و ارزان است که به راحتی از طریق الکتروریسی به نانوالیاف تبدیل می‌شود. پلی‌اکریلونیتریل به دلیل دارا بودن پیوندهای هیدروژنی در ساختار مولکولی خود، از استحکام مکانیکی بالایی برخوردار است. هم‌چنین دارای مقاومت شیمیایی بالا، مقاوم در برابر نور خورشید و حساسیت کم نسبت به رطوبت است. در نتیجه طی ۱۰ سال گذشته توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده و به طور گسترده‌ای در تهیه غشاهای اولترافیلتراسیون، میکروفیلتراسیون و نانوالیاف به کار گرفته شده است [۸۵]. علاوه بر این زنجیرهای مولکولی پلی‌اکریلونیتریل دارای یک گروه سیانو هستند که می‌تواند به کمک عوامل شیمیایی مختلف اصلاح شود. از جمله ویژگی‌های منحصر به فرد آن می‌توان به ظرفیت جذب بالا، سرعت جذب سریع و عملکرد پویای خوب اشاره کرد. این مواد به منظور تصفیه آلاینده‌های آب و هوا بسیار مناسب هستند. تلاش زیادی جهت اصلاح سطح پلی‌اکریلونیتریل در شکل‌های مختلف نانوذرات، غشا و نانوالیاف صورت می‌گیرد [۸۶]. در این زمینه ترکیبات آمینی، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۱۹ علی‌نادر^۳ و همکارانش [۸۷]، نانوالیاف هسته-پوسته پلی‌اکریلونیتریل/پلی‌وینیلیدن‌فلوراید متخلخل و بسیار انعطاف پذیر با نانوذرات SnO₂ را با استفاده از فرآیند الکتروریسی تولید کردند. غشاهای نانوالیاف کربن بهینه شده ظرفیت جذب ۲/۶ میلی‌مول بر گرم در دمای اتاق، انتخاب پذیری دی‌اکسیدکربن نسبت به نیتروژن و ثبات چرخه‌ای قابل توجه‌ای را نشان دادند. پس از ۲۰ چرخه جذب-دفع، ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن بیشتر از ۹۵٪ را نشان می‌دهد که ثبات طولانی مدت و ارزش عملی محصول نهایی را تایید می‌کند. بارگذاری نانوذرات SnO₂ در ماتریس کربن نه تنها باعث افزایش پایداری حرارتی نانوالیاف، ویژگی‌های سطح آن‌ها و ساختار متخلخل برای گرفتن مولکول‌های دی‌اکسیدکربن می‌شود، بلکه انعطاف پذیری آن را نیز بهبود می‌بخشد.

¹ Collector and tip distance

² polyacrylonitrile

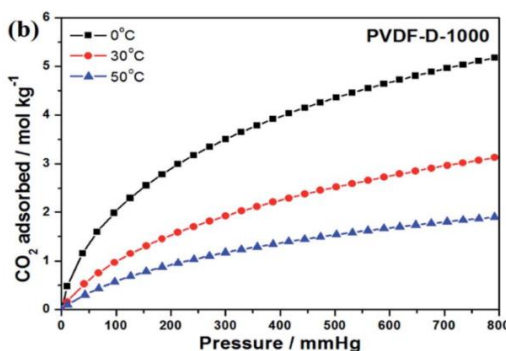
³ Ali Nadir

چیانگ^۱ و همکارانش [۸۸] در سال ۲۰۲۰ تحقیقاتی در زمینه اهمیت ساختار منافذ و سطح نانوالیاف کربن الکتروریسی شده در میزان جذب دی‌اکسیدکربن را ارائه کردند. در این مطالعه نانوالیاف‌های پلی‌اکریلونیتریل الکتروریسی شده برای جذب موثر دی‌اکسیدکربن در دماهای مختلف (۶۵۰، ۷۵۰، ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد) کربنیزه شدند. میانگین قطر نانوالیاف‌ها با افزایش دمای کربنیزه از حدود ۵۰۰ نانومتر (۶۵۰ درجه سانتی‌گراد) به ۳۳۰ نانومتر (۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد) کاهش یافت. آزمایش‌های جذب دی‌اکسیدکربن بر روی نمونه‌های انتخاب شده در دمای ۲۵، ۴۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد و در فشار دی‌اکسیدکربن کمتر از ۱۲۰ کیلو پاسکال انجام شد. بالاترین ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتمسفر مربوط به نانوالیاف کربنیزه شده در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد است.

پلی وینیلیدن فلوراید

پلی وینیلیدن فلوراید یک پلیمر گرما نرم (ترموپلاستیک) با ساختار داخلی نیمه بلوری است که شرایط فرایند الکتروریسی می‌تواند خواص فیزیکی آن را تحت تاثیر قرار دهد. به علاوه، افزودن پرکننده‌هایی مانند نانوذرات به شدت می‌تواند ساختار بلوری آن را تحت تاثیر قرار دهد. پلیمر پلی وینیلیدن فلوراید از مواد پلیمری است که تا کنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی آن انجام شده است و از خواص پیزوالکتریک، پایروالکتریک و فروالکتریک مناسبی برخوردار می‌باشد. در این پلیمر حداقل ۴ حالت بلوری به نام‌های α ، β ، γ و δ وجود دارد، که در بین آن‌ها حالت α و β بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. حالت بلوری بتا دارای بیشترین دو قطبی‌های لحظه‌ای در یک جهت یکسان می‌باشد و بهترین پاسخ پیزوالکتریک را دارد. از این رو همواره از تقویت این حالت بلوری جهت بهبود خواص پیزوالکتریک پلیمر استفاده می‌شود. آلفا نیز پایدارترین حالت است و بیشترین حالتی است که در هنگام بلوری شدن پلیمر به صورت خود به خود در زیر دمای ذوب پلیمر تشکیل می‌شود [۸۹].

هونگ^۲ و همکارانش [۹۰] در سال ۲۰۱۴ با استفاده از کربنیزه کردن^۳ نانوالیاف پلی وینیلیدن فلوراید^۴ توانستند یک نانوالیاف کربن بسیار متخلخل برای جذب موثر دی‌اکسیدکربن تهیه کنند. کربنیزه کردن در دمای بین ۳۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و ویژگی‌های نانوالیاف‌های کربن مبتنی بر پلی وینیلیدن فلوراید به طور قابل توجهی توسط کربنیزه کردن در محدوده دما ۳۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر یافت. با افزایش دمای کربنیزه شدن، سطح نانوالیاف‌های کربن مبتنی بر پلی وینیلیدن فلوراید بزرگتر شد و بر این اساس، ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن افزایش یافت. بیشترین مساحت سطح و حجم منافذ برای نانوالیاف کربنیزه شده در دمای ۱۰۰۰ به دست آمد که در آن جذب دی‌اکسیدکربن در دمای ۰ درجه سانتی‌گراد به طور قابل توجهی تا ۵/۱۰ میلی مول بر گرم افزایش یافت (شکل ۵).



شکل ۵- ایزوترم جذب دی‌اکسیدکربن با استفاده از نانوالیاف پلی وینیلیدن فلوراید کربنیزه شده در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد [۹۰].

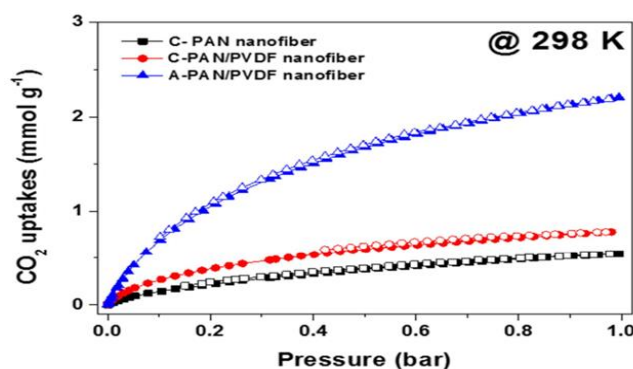
¹ Chiang

² Hong

³ Carbonization

⁴ Polyvinylidene fluoride

یانگ ژانگ هو^۱ و همکارانش [۹۱] در سال ۲۰۱۹ نانوالیاف هیبریدی الکتروریسی شده پلی اکریلونیتریل / پلی وینیلیدن فلوراید را برای حذف دی‌اکسیدکربن از هوا تهیه کردند. آن‌ها برای جذب موثر دی‌اکسیدکربن از روش کربنیزه کردن و فعالسازی نانوالیاف بهره گرفتند. ساختار و مورفولوژی نانوالیاف را توسط HR-SEM و خواص سطحی آن را به وسیله XPS مورد بررسی قرار دادند. جذب دی‌اکسیدکربن تحت شرایط عملیاتی، دمای ۲۹۸ درجه کلون و فشار ۱ بار انجام گرفت. در مقایسه با نانوالیاف PAN در جذب دی‌اکسیدکربن (۰/۵۵ میلی مول بر گرم)، نانوالیاف C-PAN / PVDF به دلیل ویژگی‌های سطح و تخلخل، جذب دی‌اکسیدکربن کمی بیشتری (۰/۷۸ میلی مول بر گرم) را نشان داد (شکل ۶). پس از فعالسازی، نانوالیاف میزان جذب بیشتری (۲/۲۱ میلی مول بر گرم) را از خود نشان داد که حدود ۳۰۰ درصد بیشتر از قبل فعالسازی بود. این امر اثبات می‌کند بعد از فعالسازی نانوالیاف ساختار میکرو حفره ایجاد می‌شود که برای جذب دی‌اکسیدکربن موثرتر است.



شکل ۶- ایزوترم جذب نانوالیاف پلی اکریلونیتریل / پلی وینیلیدن فلوراید در دمای ۲۹۸ درجه کلون [۹۱].

پلی وینیل پیرولیدون

پلی وینیل پیرولیدون ماده پلیمری غیر سمی و غیر یونی است که دارای گروه عاملی C=O، C=N، و CH₂ است که به صورت گسترده در سنتز نانوذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. مولکول پلی وینیل پیرولیدون حاوی یک بخش آبدوست (پیرولیدون) و یک بخش آبگریز (گروه آلکیل) است که به همین دلیل آب و بسیاری از مایعات غیرآبی حلال مناسبی برای آن به شمار می‌رود. ژانگ^۲ و همکارانش [۹۲] در سال ۲۰۱۷ تحقیقی در زمینه حذف دی‌اکسیدکربن با استفاده از نانوالیاف پلی اکریلونیتریل / پلی وینیل پیرولیدون^۳ اصلاح شده با پلی اتیلن ایمین ارائه کردند. جاذب‌های حاوی آمین به دلیل توانایی آن‌ها در جذب دی‌اکسیدکربن، به طور گسترده‌ای برای جذب دی‌اکسیدکربن پس از احتراق مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، یک روش جدید برای ساخت غشاهای نانوالیاف پلی اکریلونیتریل / پلی وینیل پیرولیدون متخلخل هیدرولیز شده^۴ قابل انعطاف، مقاوم و اصلاح شده با پلی اتیلن ایمین از طریق ترکیبی از فرایند الکتروریسی، فرآیند تشکیل منافذ، واکنش هیدرولیز گزارش شد (شکل ۷). به طور قابل توجهی، این نانوالیاف‌ها ساختار مزوحفره خود را حفظ می‌کنند، همچنین دارای ثبات حرارتی^۵ خوب و مقاومت کششی بالا پس از اصلاح سطح هستند، که این ویژگی سبب می‌شود گزینه بسیار مناسبی برای حذف دی‌اکسیدکربن از گاز خروجی باشند. این نوع غشا هنگامی که در معرض دی‌اکسیدکربن قرار گرفت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد میزان جذب ۱/۲۳ میلی مول بر گرم را نشان داد که این میزان ظرفیت جذب با افزایش مقدار پلی اتیلن ایمین^۶ افزایش می‌یابد.

¹ Yang Zhang Ho

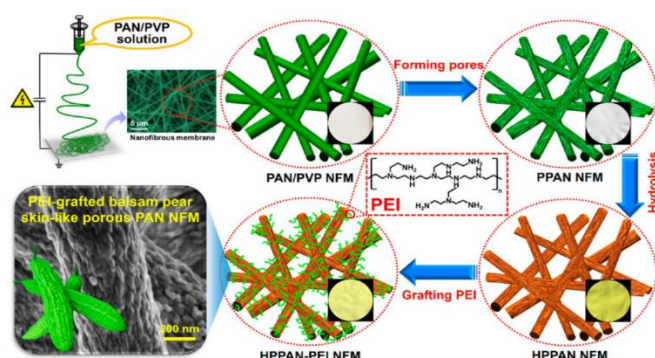
² Zhang

³ Poly(vinylpyrrolidone)

⁴ Hydrolyzed

⁵ Thermal stability

⁶ Polyethyleneimine

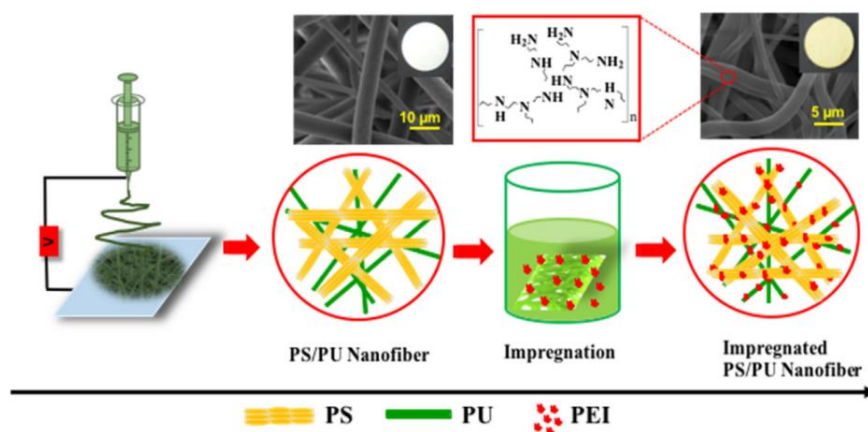


شکل ۷- نمایی از روند تشکیل و سنتز غشا نانوالیاف پلی اکریلونیتریل / پلی وینیل پیرولیدون اصلاح شده با پلی اتیلن ایمین [۹۲].

پلی استایرن^۱

پلیمری معطر از مونومر^۲ استایرن می‌باشد که به سه نوع معمولی، مقاوم و انبساطی وجود دارد. پلی استایرن یک هیدروکربن^۳ بلند زنجیر است که در آن مراکز متغیر کربنی به گروه‌های فنیل متصل اند. از آنجایی که مولکول‌ها هیدروکربن‌های بلند زنجیری هستند که از هزاران اتم تشکیل می‌شوند، نیروی کششی کلی بین مولکول‌ها بزرگ می‌باشد. هنگام حرارت دادن زنجیره‌ها سازگاری بیشتری بدست آورده و از کنار یکدیگر سر می‌خورند. این سستی بین مولکولی (در مقابل قدرت بالای بین مولکولی به علت استقامت هیدروکربنی) حالت انعطاف پذیری و کشسانی به این ماده می‌دهد.

زینب قزلا^۴ و همکارانش [۹۳] در سال ۲۰۱۸ از غشاهای الکتروریسی شده پلی استایرن^۵ / پلی اورتان^۶ با تخلخل بالا که توسط آمین اصلاح شده‌اند برای جذب دی‌اکسیدکربن استفاده کردند (شکل ۸). غشاهای نانوالیاف متخلخل سنتز شده ویژگی‌های مکانیکی بسیار قوی و انعطاف‌پذیری بالایی دارند. در این پژوهش نانوالیاف‌ها توسط سه نوع آمین که عبارتند از پلی‌اتیلن آمین، تری‌اتیلن آمین و اتانول اصلاح سطح شدند. نتایج نشان داد که در میان نمونه‌های بهینه‌سازی شده با سه آمین مختلف، نمونه‌های اصلاح شده با پلی‌اتیلن آمین ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن نسبتاً بالاتری (۱/۶۴ میلی‌مول بر گرم) را در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد دارند.



شکل ۸ - نمایی از ساخت و اصلاح سطح نانوالیاف پلی استایرن / پلی اورتان با آمین [۹۳]

¹ Polystyrene

² Monomer

³ Hydrocarbons

⁴ Ghazala Zainab

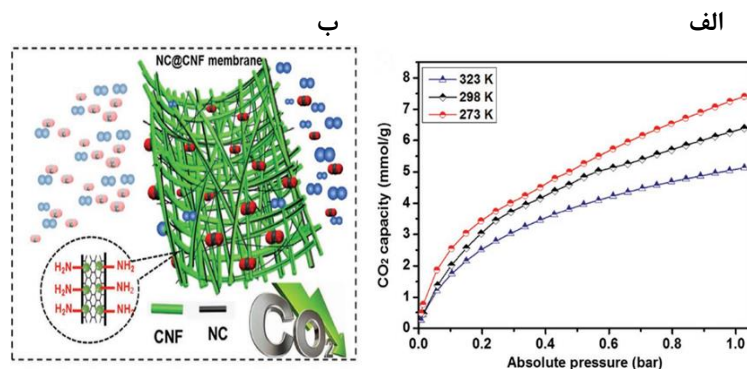
⁵ Polystyrene

⁶ Polyurethane

نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی از منابع کربنی مانند گرافیت یا گازهای هیدروکربنی بوسیله روش‌هایی مانند تخلیه الکتریکی و فرسایش لیزری ساخته می‌شوند. این مواد به علت داشتن خواصی مانند سطح ویژه زیاد، استحکام زیاد و خصوصیات الکتریکی و الکترونیکی استثنایی موارد کاربرد زیادی از جمله استفاده به عنوان پایه کاتالیست، تقویت مکانیکی پلیمرها و کامپوزیت‌ها و ساخت قطعات الکترونیکی دارند. کاربردهای مربوط به جذب نانولوله‌های کربنی به عنوان یک نانوذره موثر برای حل مشکلات آلاینده‌های زیست محیطی در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود معطوف نموده است. این مواد جاذب‌های نسبتاً جدیدی هستند که به دلیل موفقیت در نگهداری جالب در مواد جاذب بر پایه کربن کاربردهای بسیاری دارند. از سوی دیگر سطوح شیمیایی خنثی را برای جذب فیزیکی فراهم میکنند و مساحت سطح ویژه بالایشان در مقایسه با کربن‌های فعال شده دیگر تحمل و ایستادگی می‌نماید. از طرف دیگر، نانولوله‌های کربنی به طور ذاتی از کربن‌های فعال به دلیل اینکه ساختارشان در مقیاس اتمی یک شکل و همگون است، تفاوت دارند. کاربردهای نانولوله‌های کربنی برای خروج آلاینده‌های مضر و خطرناک از جریان‌های گازی و از محلول‌های آبی، در مقیاس وسیعی از طریق محاسبات تئوری و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های مولکولی مطالعه و بررسی شده است [۹۴].

در سال ۲۰۱۷ نوشین اقبال^۱ و همکارانش [۹۵] برای بدست آوردن نانوالیاف کربن با تخلخل بالا برای جداسازی دی‌اکسیدکربن از روش جدیدی استفاده کردند که در آن نانولوله‌های کربن آمین‌دار شده را طی فرایندی به نانوالیاف کربن تبدیل کردند. نانوالیاف کربن متخلخل به تنهایی پتانسیل بسیار بالایی برای جذب دی‌اکسیدکربن دارد اما مشکل اصلی عدم استحکام مکانیکی و انعطاف پذیری آن است. در این کار نویسندگان راه حلی برای ساخت نانوالیاف کربن اصلاح شده با نانولوله‌های کربن آمین‌دار گزارش کردند. آن‌ها از این نانوالیاف برای جذب موثر دی‌اکسیدکربن استفاده کردند که به جذب حداکثری ۶/۳ میلی مول بر گرم در فشار ۱ بار و دمای ۲۹۸ درجه کلوین دست یافتند (شکل ۹). ادغام نانولوله کربن با الیاف کربن نه تنها سایت‌ها فعال -NH_2 زیادی را برای جذب دی‌اکسیدکربن به ارمغان می‌آورد بلکه از شکننده بودن نانوالیاف کربن به تنهایی نیز جلوگیری می‌کند.



شکل ۹- الف) ایزوترم جذب دی‌اکسیدکربن، ب) نمایی از سایت‌های فعال برای جذب دی‌اکسیدکربن [۹۵].

نتیجه‌گیری

حذف دی‌اکسیدکربن از گاز دودکش‌ها پس از احتراق در منابع بزرگ در سال‌های اخیر به عنوان روشی بالقوه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در میان طیف وسیعی از فناوری‌های جداسازی، جذب با جاذب‌های مبتنی بر نانومواد یکی از امیدوار کننده ترین روش‌های جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن به نظر می‌رسد. واضح است که انتخاب مواد جذب و جداسازی برای هر فناوری در حذف دی‌اکسیدکربن ضروری است. به طور کلی، نانوالیاف‌ها دارای مزایایی از قبیل سهولت در طراحی و سنتز، تخلخل زیاد، خواص منافذ متناسب، مساحت سطح بالا و خواص مکانیکی خوبی هستند که باعث می‌شود آن‌ها برای رشد جاذب‌ها با ظرفیت جذب

¹ Noushin Iqbal

بالای دی‌اکسیدکربن و سینتیک بسیار سریع جذاب باشند. علی‌رغم پیشرفت‌های اخیر در توسعه جاذب‌های نانوالیافی برای برنامه‌های جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن، هنوز هم چندین چالش باقی مانده است. (۱) برخی از مواد نانوالیافی تا زمانی که با گروه‌های آمین یا مایعات یونی‌ها اصلاح نشوند قابلیت جذب دی‌اکسیدکربن را ندارند. با این حال، انسداد ناخواسته سطوح نانوالیاف با آمین یا مایعات یونی باعث کاهش ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن و سینتیک جاذب‌ها می‌شود. باید تحقیقات بیشتری روی دستیابی به روش‌های اصلاح سطح مؤثر انجام شود. (۲) جریان گازهای تصفیه شده در جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن همیشه شامل آب هستند و خشک کردن گاز دودکش‌ها توسط یک فرآیند اضافی قبل از جداسازی مقرون به صرفه نیست. (۳) در کنار مطالعات تجربی، روش‌های مدل‌سازی نیز باید برای پیش‌بینی عملکرد مؤثر جاذب‌های نانوالیافی توسعه یابند. با وجود چالش‌های متعدد پیرامون جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن، توسعه جاذب‌های نانوالیافی به دلیل مزایای آن‌ها می‌تواند برای رفع این مشکل جهانی بسیار مؤثر باشد.

منابع

- [1] Xing, W., Liu, C., Zhou, Z., Zhang, L., Zhou, J., Zhuo, S., & Qiao, S. Z. (2012) Superior CO₂ uptake of N-doped activated carbon through hydrogen-bonding interaction. *Energy & Environmental Science*, 5(6), 7323-7327. <https://doi.org/10.1039/C2EE21653A>.
- [2] Li, B., Duan, Y., Luebke, D., & Morreale, B. (2013) Advances in CO₂ capture technology: A patent review. *Applied Energy*, 102, 1439-1447. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.009>.
- [3] Wang, X., Ding, B., Yu, J., & Wang, M. (2011) Highly sensitive humidity sensors based on electrospinning/netting a polyamide 6 nano-fiber/net modified by polyethyleneimine. *Journal of Materials Chemistry*, 21(40), 16231-16238. <https://doi.org/10.1039/C1JM13037D>.
- [4] Kelemen, P. B., McQueen, N., Wilcox, J., Renforth, P., Dipple, G., & Vankeuren, A. P. (2020) Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO₂ removal from air: Review and new insights. *Chemical Geology*, 550, 119628. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119628>.
- [5] Song, C., Liu, Q., Ji, N., Deng, S., Zhao, J., Li, Y., & Li, H. (2018) Alternative pathways for efficient CO₂ capture by hybrid processes—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 215-231. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.040>.
- [6] Abu-Khader, M. M. (2006) Recent progress in CO₂ capture/sequestration: a review. *Energy Sources, Part A*, 28(14), 1261-1279. <https://doi.org/10.1080/009083190933825>.
- [7] Zainab, G., Babar, A. A., Iqbal, N., Wang, X., Yu, J., & Ding, B. (2018) Amine-impregnated porous nanofiber membranes for CO₂ capture. *Composites Communications*, 10, 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2018.06.005>.
- [8] Zainab, G., Iqbal, N., Babar, A. A., Huang, C., Wang, X., Yu, J., & Ding, B. (2017) Free-standing, spiderweb-like polyamide/carbon nanotube composite nanofibrous membrane impregnated with polyethyleneimine for CO₂ capture. *Composites Communications*, 6, 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2017.09.001>.
- [9] Wang, X., Ding, B., Yu, J., & Wang, M. (2011) Engineering biomimetic superhydrophobic surfaces of electrospun nanomaterials. *Nano today*, 6(5), 510-530. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2011.08.004>.
- [10] Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W. E., Yong, T., Ma, Z., & Ramaseshan, R. (2006) Electrospun nanofibers: solving global issues. *Materials today*, 9(3), 40-50. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(06\)71389-X](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71389-X).
- [11] Lee, Z. H., Lee, K. T., Bhatia, S., & Mohamed, A. R. (2012) Post-combustion carbon dioxide capture: Evolution towards utilization of nanomaterials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2599-2609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.077>.
- [12] Li, H., Jakobsen, J. P., Wilhelmsen, Q., & Yan, J. (2011) PVTxy properties of CO₂ mixtures relevant for CO₂ capture, transport and storage: Review of available experimental data and theoretical models. *Applied Energy*, 88(11), 3567-3579. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.052>.

- [13] Ding, B., Wang, M., Wang, X., Yu, J., & Sun, G. (2010) Electrospun nanomaterials for ultrasensitive sensors. *Materials today*, 13(11), 16-27. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70200-5](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70200-5).
- [14] Wang, X., Ding, B., Yu, J., & Wang, M. (2011) Engineering biomimetic superhydrophobic surfaces of electrospun nanomaterials. *Nano today*, 6(5), 510-530. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2011.08.004>.
- [15] Rufford, T. E., Smart, S., Watson, G. C., Graham, B. F., Boxall, J., Da Costa, J. D., & May, E. F. (2012) The removal of CO₂ and N₂ from natural gas: A review of conventional and emerging process technologies. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 94, 123-154. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.016>
- [16] Brunetti, A., Scura, F., Barbieri, G., & Drioli, E. (2010) Membrane technologies for CO₂ separation. *Journal of Membrane Science*, 359(1-2), 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.11.040>
- [17] Zhou, K., Chaemchuen, S., & Verpoort, F. (2017) Alternative materials in technologies for Biogas upgrading via CO₂ capture. *Renewable and sustainable energy reviews*, 79, 1414-1441. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.198>.
- [18] Song, C., Liu, Q., Ji, N., Deng, S., Zhao, J., Li, Y., & Kitamura, Y. (2017) Reducing the energy consumption of membrane-cryogenic hybrid CO₂ capture by process optimization. *Energy*, 124, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.054>.
- [19] Crake, A., Christoforidis, K. C., Kafizas, A., Zafeiratos, S., & Petit, C. (2017) CO₂ capture and photocatalytic reduction using bifunctional TiO₂/MOF nanocomposites under UV-vis irradiation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 210, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.03.039>.
- [20] Signorile, M., Vitillo, J. G., D'Amore, M., Crocellà, V., Ricchiardi, G., & Bordiga, S. (2019) Characterization and Modeling of Reversible CO₂ Capture from Wet Streams by a MgO/Zeolite Y Nanocomposite. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(28), 17214-17224. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b01399>.
- [21] Dai, Z., Deng, J., Yu, Q., Helberg, R. M., Janakiram, S., Ansaloni, L., & Deng, L. (2019) Fabrication and evaluation of bio-based nanocomposite TFC hollow fiber membranes for enhanced CO₂ capture. *ACS applied materials & interfaces*, 11(11), 10874-10882. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b19651>.
- [22] Liu, Y., Hao, M., Chen, Z., Liu, L., Liu, Y., Yang, W., & Ramakrishna, S. (2020) A review on recent advances in application of electrospun nanofiber materials as biosensors. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 13, 174-189. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2020.02.001>.
- [23] Sorensen, J. A., Smith, S. A., Dobroskok, A. A., Belobraydic, M. L., Peck, W. D., Kringstad, J. J., & Zeng, Z. W. (2009) Carbon dioxide storage potential of the Broom Creek Formation in North Dakota: a case study in site characterization for large-scale sequestration. <https://doi.org/10.1306/13171244St593378>.
- [24] Armstrong, M., Shi, X., Shan, B., Lackner, K., & Mu, B. (2019) Rapid CO₂ capture from ambient air by sorbent-containing porous electrospun fibers made with the solvothermal polymer additive removal technique. *AIChE Journal*, 65(1), 214-220. <https://doi.org/10.1002/aic.16418>.
- [25] Angelakoglou, K., Gaidajis, G., Lymperopoulos, K., & Botsaris, P. N. (2015) Carbon Footprint Analysis of Municipalities-Evidence from Greece. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 8(4).
- [26] Li, B., Duan, Y., Luebke, D., & Morreale, B. (2013) Advances in CO₂ capture technology: A patent review. *Applied Energy*, 102, 1439-1447. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.009>.
- [27] Bavarella, S., Hermassi, M., Brookes, A., Moore, A., Vale, P., Moon, I. S., & McAdam, E. J. (2020) Recovery and concentration of ammonia from return liquor to promote enhanced CO₂ absorption and simultaneous ammonium bicarbonate crystallisation during biogas upgrading in a hollow fibre membrane contactor. *Separation and Purification Technology*, 241, 116631. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116631>
- [28] Ochedi, F. O., Yu, J., Yu, H., Liu, Y., & Hussain, A. (2020) Carbon dioxide capture using liquid absorption methods: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-33. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01093-8>
- [29] Norhasyima, R. S., & Mahlia, T. M. I. (2018) Advances in CO₂ utilization technology: a patent landscape review. *Journal of CO₂ Utilization*, 26, 323-335. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.05.022>

- [30] Afanasiev, S. V., Kravtsova, M. V., Shevchenko, Y. N., Guschina, T. P., & Sokov, S. A. (2018, November). Optimization of carbon dioxide compressing technology in the production of urea. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 450, No. 6, p. 062015). IOP Publishing.
- [31] Chen, S., Xiang, W., Wang, D., & Xue, Z. (2012) Incorporating IGCC and CaO sorption-enhanced process for power generation with CO₂ capture. *Applied energy*, 95, 285-294. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.056>.
- [32] Garshasbi, V., Jahangiri, M., & Anbia, M. (2017) Equilibrium CO₂ adsorption on zeolite 13X prepared from natural clays. *Applied Surface Science*, 393, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.161>.
- [33] Quang, D. V., Dindi, A., & Abu-Zahra, M. R. (2017) One-step process using CO₂ for the preparation of amino-functionalized mesoporous silica for CO₂ capture application. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(4), 3170-3178. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02961>.
- [34] Salehian, P., & Chung, T. S. (2017) Thermally treated ammonia functionalized graphene oxide/polyimide membranes for pervaporation dehydration of isopropanol. *Journal of Membrane Science*, 528, 231-242. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.01.038>.
- [35] Zhang, M., Deng, L., Xiang, D., Cao, B., Hosseini, S. S., & Li, P. (2019) Approaches to suppress CO₂-induced plasticization of polyimide membranes in gas separation applications. *Processes*, 7(1), 51. <https://doi.org/10.3390/pr7010051>.
- [36] Xu, X., Wang, J., Dong, J., Li, H. B., Zhang, Q., & Zhao, X. (2020) Ionic polyimide membranes containing Tröger's base: Synthesis, microstructure and potential application in CO₂ separation. *Journal of Membrane Science*, 602, 117967. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.117967>.
- [37] Marcus, Y. (1998) The properties of solvents.
- [38] Sreedhar, I., Nahar, T., Venugopal, A., & Srinivas, B. (2017) Carbon capture by absorption—Path covered and ahead. *Renewable and sustainable energy reviews*, 76, 1080-1107. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.109>.
- [39] Borhani, T. N., Oko, E., & Wang, M. (2019) Process modelling, validation and analysis of rotating packed bed stripper in the context of intensified CO₂ capture with MEA. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 75, 285-295. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.040>.
- [40] Karimi, M., Hillestad, M., & Svendsen, H. F. (2011) Capital costs and energy considerations of different alternative stripper configurations for post combustion CO₂ capture. *Chemical engineering research and design*, 89(8), 1229-1236. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.03.005>.
- [41] Field, R. P., & Brasington, R. (2011) Baseline flowsheet model for IGCC with carbon capture. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(19), 11306-11312. <https://doi.org/10.1021/ie200288u>.
- [42] Gatti, M., Martelli, E., Maréchal, F., & Consonni, S. (2015) Multi-objective Optimization of a Selexol® Process for the Selective Removal of CO₂ and H₂S from Coal-derived Syngas. In 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS.
- [43] Ahn, H. (2017) Process Simulation of a Dual- stage Selexol Process for Pre- combustion Carbon Capture at an Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant. *Process Systems and Materials for CO₂ Capture: Modelling, Design, Control and Integration*, 609-628. <https://doi.org/10.1002/9781119106418.ch24>.
- [44] Smith, K., Lee, A., Mumford, K., Li, S., Thanumurthy, N., Temple, N., & Stevens, G. (2015) Pilot plant results for a precipitating potassium carbonate solvent absorption process promoted with glycine for enhanced CO₂ capture. *Fuel Processing Technology*, 135, 60-65. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.10.013>.
- [45] Brennecke, J. F., & Gurkan, B. E. (2010) Ionic liquids for CO₂ capture and emission reduction. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(24), 3459-3464. <https://doi.org/10.1021/jz1014828>.
- [46] Lee, A., Mumford, K. A., Wu, Y., Nicholas, N., & Stevens, G. W. (2016) Understanding the vapour-liquid equilibrium of CO₂ in mixed solutions of potassium carbonate and potassium glycinate. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 47, 303-309. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.02.005>.

- [47] Saleh, M., Chandra, V., Kemp, K. C., & Kim, K. S. (2013) Synthesis of N-doped microporous carbon via chemical activation of polyindole-modified graphene oxide sheets for selective carbon dioxide adsorption. *Nanotechnology*, 24(25), 255702. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/25/255702>.
- [48] Loganathan, S., Tikmani, M., & Ghoshal, A. K. (2013) Novel pore-expanded MCM-41 for CO₂ capture: synthesis and characterization. *Langmuir*, 29(10), 3491-3499. <https://doi.org/10.1021/la400109j>.
- [49] Russo, G., Prpich, G., Anthony, E. J., Montagnaro, F., Jurado, N., Di Lorenzo, G., & Darabkhani, H. G. (2018) Selective-exhaust gas recirculation for CO₂ capture using membrane technology. *Journal of Membrane Science*, 549, 649-659. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.10.052>.
- [50] Ghasem, N., & Al-Marzouqi, M. (2017) Modeling and experimental study of carbon dioxide absorption in a flat sheet membrane contactor. *Journal of Membrane Science and Research*, 3(2), 57-63.
- [51] Moraes, L., da Rosa, G. M., Santos, L. O., & Costa, J. A. (2020) Innovative development of membrane sparger for carbon dioxide supply in microalgae cultures. *Biotechnology progress*, 36(4), e2987. <https://doi.org/10.1002/btpr.2987>
- [52] Samimi, A., Zarinabadi, S., Bozorgian, A., Amosoltani, A., Tarkesh Esfahani, M. S., & Kavousi, K. (2020) Advances of membrane technology in acid gas removal in industries. *Progress in Chemical and Biochemical Research*, 46-54. <https://doi.org/10.33945/SAMI/PCBR.2020.1.6>
- [53] Nasir, R., & Abdulrahman, A. (2020) Polymeric amine membrane materials for carbon dioxide (CO₂)/methane (CH₄) separation. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 51(1), 66-72. <https://doi.org/10.1002/mawe.201900084>.
- [54] Han, K. K., Ma, L., Zhao, H. M., Li, X., Chun, Y., & Zhu, J. H. (2012) In situ synthesis of SBA-3/cotton fiber composite materials: a hybrid device for CO₂ capture. *Microporous and Mesoporous Materials*, 151, 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.10.043>.
- [55] Moya, C., Gonzalez-Miquel, M., Rodriguez, F., Soto, A., Rodriguez, H., & Palomar, J. (2017) Non-ideal behavior of ionic liquid mixtures to enhance CO₂ capture. *Fluid Phase Equilibria*, 450, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2017.07.014>.
- [56] Li, Y., Cheng, J., Hu, L., Liu, J., Zhou, J., & Cen, K. (2018) Graphene nanoplatelet and reduced graphene oxide functionalized by ionic liquid for CO₂ capture. *Energy & Fuels*, 32(6), 6918-6925. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b00889>.
- [57] Abe, H., Takeshita, A., Sudo, H., & Akiyama, K. (2020) CO₂ capture and surface structures of ionic liquid-propanol solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 301, 112445. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112445>.
- [58] Lian, X., Xu, L., Chen, M., Wu, C. E., Li, W., Huang, B., & Cui, Y. (2019) Carbon dioxide captured by metal organic frameworks and its subsequent resource utilization strategy: a review and prospect. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 19(6), 3059-3078. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16647>.
- [59] Wongsakulphasatch, S., Kiatkittipong, W., Saupsor, J., Chaiwisesphol, J., Piroonlerkgul, P., Parasuk, V., & Assabumrungrat, S. (2017) Effect of Fe open metal site in metal-organic frameworks on post-combustion CO₂ capture performance. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 7(2), 383-394. <https://doi.org/10.1002/ghg.1662>.
- [60] Chung, Y. G., Gómez-Gualdrón, D. A., Li, P., Leperi, K. T., Deria, P., Zhang, H., & Snurr, R. Q. (2016) In silico discovery of metal-organic frameworks for precombustion CO₂ capture using a genetic algorithm. *Science advances*, 2(10), e1600909. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600909>.
- [61] Yoo, B. M., Shin, J. E., Lee, H. D., & Park, H. B. (2017) Graphene and graphene oxide membranes for gas separation applications. *Current opinion in chemical engineering*, 16, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2017.04.004>.
- [62] Chernikova, V., Shekhah, O., Belmabkhout, Y., & Eddaoudi, M. (2020) Nanoporous Fluorinated Metal-Organic Framework-Based Membranes for CO₂ Capture. *ACS Applied Nano Materials*, 3(7), 6432-6439. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c00909>.

- [63] Setiawan, W. K., & Chiang, K. Y. (2019) Silica applied as mixed matrix membrane inorganic filler for gas separation: a review. *Sustainable Environment Research*, 29(1), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0028-1>.
- [64] Borandeh, S., Abdolmaleki, A., Zamani Nekuabadi, S., & Sadeghi, M. (2019) Methoxy poly (ethylene glycol) methacrylate-TiO₂/poly (methyl methacrylate) nanocomposite: an efficient membrane for gas separation. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 58(7), 789-802. <https://doi.org/10.1080/03602559.2018.1520255>.
- [65] Gao, W., Liang, S., Wang, R., Jiang, Q., Zhang, Y., Zheng, Q., & Park, S. E. (2020) Industrial carbon dioxide capture and utilization: state of the art and future challenges. *Chemical Society Reviews*. <https://doi.org/10.1039/D0CS00025F>.
- [66] Ma, B., Lin, R., He, H., Wu, Q., & Chen, S. (2020) Rapid synthesis of solid amine composites based on short mesochannel SBA-15 for CO₂ capture. *Composites Part B: Engineering*, 185, 107782. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107782>.
- [67] Ünveren, E. E., Monkul, B. Ö., Sariođlan, Ş., Karademir, N., & Alper, E. (2017) Solid amine sorbents for CO₂ capture by chemical adsorption: A review. *Petroleum*, 3(1), 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.11.001>.
- [68] Liu, F., Kuang, Y., Wang, S., Chen, S., & Fu, W. (2018) Preparation and characterization of molecularly imprinted solid amine adsorbent for CO₂ adsorption. *New Journal of Chemistry*, 42(12), 10016-10023. <https://doi.org/10.1039/C8NJ00686E>.
- [69] Rojek, T., Gubler, L., Nasef, M. M., & Abouzari-Lotf, E. (2017) Polyvinylamine-containing adsorbent by radiation-induced grafting of N-vinylformamide onto ultrahigh molecular weight polyethylene films and hydrolysis for CO₂ capture. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(20), 5925-5934. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b00862>.
- [70] Shao, L., Li, Y., Huang, J., & Liu, Y. N. (2018) Synthesis of triazine-based porous organic polymers derived N-enriched porous carbons for CO₂ capture. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(8), 2856-2865. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b04533>.
- [71] Sevilla, M., Parra, J. B., & Fuertes, A. B. (2013) Assessment of the role of micropore size and N-doping in CO₂ capture by porous carbons. *ACS applied materials & interfaces*, 5(13), 6360-6368. <https://doi.org/10.1021/am401423b>.
- [72] Chen, J., Yang, J., Hu, G., Hu, X., Li, Z., Shen, S., & Fan, M. (2016) Enhanced CO₂ capture capacity of nitrogen-doped biomass-derived porous carbons. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(3), 1439-1445. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b01425>
- [73] Olivieri, L., Roso, M., De Angelis, M. G., & Lorenzetti, A. (2018) Evaluation of electrospun nanofibrous mats as materials for CO₂ capture: A feasibility study on functionalized poly (acrylonitrile)(PAN). *Journal of Membrane Science*, 546, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.10.019>.
- [74] Babitha, S., Rachita, L., Karthikeyan, K., Shoba, E., Janani, I., Poornima, B., & Sai, K. P. (2017) Electrospun protein nanofibers in healthcare: A review. *International journal of pharmaceutics*, 523(1), 52-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.03.013>.
- [75] Reneker, D. H., & Mazur, J. (1990) Crystallographic defects in polymers and what they do *Computer Simulation of Polymers* ed J Roe (Englewoods Cliffs, NJ:Prentice-Hall) ch 23, 332-340.
- [76] Liu, X., Yang, Y., Yu, D. G., Zhu, M. J., Zhao, M., & Williams, G. R. (2019) Tunable zero-order drug delivery systems created by modified triaxial electrospinning. *Chemical Engineering Journal*, 356, 886-894. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.096>.
- [77] Zainab, G., Babar, A. A., Iqbal, N., Wang, X., Yu, J., & Ding, B. (2018) Amine-impregnated porous nanofiber membranes for CO₂ capture. *Composites Communications*, 10, 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2018.06.005>.

- [78] Haider, A., Haider, S., & Kang, I. K. (2018) A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*, 11(8), 1165-1188. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.015>.
- [79] Sandri, G., Rossi, S., Bonferoni, M. C., Caramella, C., & Ferrari, F. (2020) Electrospinning technologies in wound dressing applications. *Therapeutic dressings and wound healing applications*, 315-336. <https://doi.org/10.1002/9781119433316.ch14>.
- [80] Feng, J. J. (2002) The stretching of an electrified non-Newtonian jet: A model for electrospinning. *Physics of fluids*, 14(11), 3912-3926. <https://doi.org/10.1063/1.1510664>
- [81] Huan, S., Liu, G., Han, G., Cheng, W., Fu, Z., Wu, Q., & Wang, Q. (2015) Effect of experimental parameters on morphological, mechanical and hydrophobic properties of electrospun polystyrene fibers. *Materials*, 8(5), 2718-2734. <https://doi.org/10.3390/ma8052718>
- [82] Cui, W., Li, X., Zhou, S., & Weng, J. (2007) Investigation on process parameters of electrospinning system through orthogonal experimental design. *Journal of applied polymer science*, 103(5), 3105-3112. <https://doi.org/10.1002/app.25464>.
- [83] Kanu, N. J., Gupta, E., Vates, U. K., & Singh, G. K. (2020) Electrospinning process parameters optimization for biofunctional curcumin/gelatin nanofibers. *Materials Research Express*, 7(3), 035022.
- [84] Sneddon, G., Greenaway, A., & Yiu, H. H. (2014) The potential applications of nanoporous materials for the adsorption, separation, and catalytic conversion of carbon dioxide. *Advanced Energy Materials*, 4(10), 1301873. <https://doi.org/10.1002/aenm.201301873>.
- [85] Chauque, E. F., Dlamini, L. N., Adelodun, A. A., Greyling, C. J., & Ngila, J. C. (2017) Electrospun polyacrylonitrile nanofibers functionalized with EDTA for adsorption of ionic dyes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100, 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.10.008>
- [86] Damberga, D., Viter, R., Fedorenko, V., Iatsunskiy, I., Coy, E., Graniel, O., & Bechelany, M. (2020) Photoluminescence study of defects in ZnO-coated polyacrylonitrile nanofibers. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124(17), 9434-9441. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c00326>.
- [87] Ali, N., Babar, A. A., Zhang, Y., Iqbal, N., Wang, X., Yu, J., & Ding, B. (2020) Porous, flexible, and core-shell structured carbon nanofibers hybridized by tin oxide nanoparticles for efficient carbon dioxide capture. *Journal of colloid and interface science*, 560, 379-387. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.10.034>.
- [88] Chiang, Y. C., Lee, S. T., Leo, Y. J., & Tseng, T. L. (2020) Importance of Pore Structure and Surface Chemistry in Carbon Dioxide Adsorption on Electrospun Carbon Nanofibers. *Sensors and Materials*, 32(7), 2277-2288. <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2871>
- [89] Chen, F., Wu, Y., Ding, Z., Xia, X., Li, S., Zheng, H., & Zi, Y. (2019) A novel triboelectric nanogenerator based on electrospun polyvinylidene fluoride nanofibers for effective acoustic energy harvesting and self-powered multifunctional sensing. *Nano energy*, 56, 241-251. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.041>
- [90] Hong, S. M., Kim, S. H., Jeong, B. G., Jo, S. M., & Lee, K. B. (2014) Development of porous carbon nanofibers from electrospun polyvinylidene fluoride for CO₂ capture. *RSC advances*, 4(103), 58956-58963. <https://doi.org/10.1039/C4RA11290C>.
- [91] Heo, Y. J., Zhang, Y., Rhee, K. Y., & Park, S. J. (2019) Synthesis of PAN/PVDF nanofiber composites-based carbon adsorbents for CO₂ capture. *Composites Part B: Engineering*, 156, 95-99. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.057>.
- [92] Zhang, Y., Guan, J., Wang, X., Yu, J., & Ding, B. (2017) Balsam-pear-skin-like porous polyacrylonitrile nanofibrous membranes grafted with polyethyleneimine for postcombustion CO₂ capture. *ACS applied materials & interfaces*, 9(46), 41087-41098. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b14635>.
- [93] Zainab, G., Babar, A.A., Iqbal, N., & Wang X., (2018) Amine-impregnated porous nanofiber membranes for CO₂ capture, *Composites Communications* 10:45-51.
- [94] Vajtai, R. (Ed.). (2013) *Springer handbook of nanomaterials*. Springer Science & Business Media.
- [95] Iqbal, N., Wang, X., Babar, A. A., Yu, J., & Ding, B. (2016) Highly flexible NiCo₂O₄/CNTs doped carbon nanofibers for CO₂ adsorption and supercapacitor electrodes. *Journal of colloid and interface science*, 476, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.05.010>.