

Polymerization
Quarterly, 2025
Volume 15, Number 1
Pages 43-53
ISSN: 2252-0449

The Role of Polymers in Carbon Dioxide Adsorption to Reduce Greenhouse Effects

Samaneh Ghanbarlou¹, Davood Kahforoushan¹, and Hossein Abdollahi^{2*}

1. Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2. Technical and Engineering Faculty, Department of Polymer Engineering, Urmia University,
Urmia, Iran

Received: 4 September 2024, Accepted: 8 February 2025

Abstract

Due to the use of fossil fuels, greenhouse gases, especially carbon dioxide, have increased. There are approaches to reduce global climate change, including carbon dioxide absorption and storage. Among the various types of carbon dioxide adsorbents, porous polymeric materials are highly suitable for CO₂ capture due to their large and tunable surface area, appropriate thermal/mechanical properties, low density, high physicochemical stability, rapid kinetics, strength, and high adsorption capacity. Porous polymers such as hypercrosslinked polymers (HCPs), covalent organic frameworks (COFs), porous organic polymers (POPs), conjugated microporous polymers (CMPs), and triazine-based covalent frameworks (CTFs) exhibit a CO₂ adsorption range of approximately 3 mmol/g to 6 mmol/g at a temperature of 273 K and a pressure of 1 bar. Each of the polymers has unique properties and challenges in the CO₂ adsorption process. For example, HCPs and CMPs have higher specific surface areas, while biopolymers have advantages over other polymers due to their biodegradability and low cost. CMPs are more widely used in electrical fields due to their lightweight raw materials, while HCPs, because of their easy and quick preparation compared to other POPs, may attract more attention from researchers. However, they require modifications to their surface to increase their adsorption capacity. The results of this study show that polymers can be used as efficient and sustainable tools for carbon dioxide capture and reduce greenhouse effects.

Key Words

surface adsorption,
polymeric adsorbent,
porous material,
carbon dioxide,
greenhouse gases

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: h.abdollahi@urmia.ac.ir

نقش پلیمرها در برجذب گاز کربن دی اکسید برای کاهش آثار گلخانه‌ای

بسیارش
فصلنامه علمی
سال پانزدهم، شماره ۱،
صفحه ۵۳-۴۳، ۱۴۰۴
ISSN: 2252-0449

سمانه قنبرلو^۱، داود کاه فروشان^۱ و حسین عبداللهی^{۲*}

۱- تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی

۲- ارومیه، دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر

دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

چکیده



سمانه قنبرلو



داود کاه فروشان



حسین عبداللهی

گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه کربن دی‌اکسید، در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی افزایش یافته است. رویکردهایی برای کاهش تغییرات آب‌وهوایی جهانی وجود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به برجذب و ذخیره کربن دی‌اکسید اشاره کرد. در میان انواع برجاذب‌های کربن دی‌اکسید، مواد پلیمری متخلخل به‌دلیل مساحت سطح زیاد و تنظیم‌پذیر، خواص گرمایی-مکانیکی مناسب، چگالی کم، پایداری فیزیکی-شیمیایی زیاد، سینتیک سریع، استحکام و ظرفیت برجذب زیاد از گزینه‌های بسیار مناسب برای برجذب کربن دی‌اکسید هستند. پلیمرهای متخلخل مانند پلیمرهای ابرشبکه‌ای (HCP)، چارچوب‌های آلی کووالانسی (COFs)، پلیمرهای متخلخل آلی (POPs)، پلیمرهای ریزمتخلخل مزدوج (CMPs) و چارچوب‌های تری‌آزینی کووالانسی (CTFs) محدوده برجذب CO_2 را در حدود 3 mmol.g^{-1} تا 6 mmol.g^{-1} در دمای 273 K و فشار 1 bar نشان می‌دهند. هر یک از پلیمرها در فرایند برجذب CO_2 ، خواص و چالش‌های منحصربه‌فردی دارند. برای مثال، HCP و CMPها سطح ویژه بیشتری دارند، درحالی‌که زیست‌پلیمرها به‌دلیل انعطاف‌پذیری در زیست‌تخریب‌پذیری و ارزانی، نسبت به سایر پلیمرها برتری دارند. CMPها به‌دلیل مواد اولیه کم‌وزن، بیشتر در زمینه‌های الکتریکی کاربرد دارند. درحالی‌که پژوهشگران به HCPها به‌خاطر طرز تهیه راحت و سریع نسبت به سایر POPها، بیشتر توجه کرده‌اند. هرچند افزایش ظرفیت برجذب این پلیمرها نیازمند تغییراتی در سطح آن‌هاست. نتایج این بررسی نشان می‌دهد، پلیمرها می‌توانند به‌عنوان ابزارهای کارآمد و پایدار برای برجذب کربن دی‌اکسید و کاهش آثار گلخانه‌ای استفاده شوند.

واژگان کلیدی

برجذب سطحی،
برجاذب پلیمری،
ماده متخلخل،
کربن دی‌اکسید،
گازهای گلخانه‌ای

مقدمه

رشد سریع صنایع، نیاز به استفاده از منابع انرژی را در سطح جهان افزایش داده است. کارخانه‌های سیمان، آهن و فولاد، پالایشگاه‌های نفت، نیروگاه‌های سوخت فسیلی و سایر کارخانه‌های صنعتی منبع اصلی تولید گازهای گلخانه‌ای هستند. در میان این گازها، CO_2 به عنوان جزء اصلی سالانه به مقدار ۳۰ Mt منتشر می‌شود [۱، ۲]. تخمین زده شده است، بدون اعمال سیاست‌های تغییرات آب‌وهوایی انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۳۰ به میزان ۲۵٪ تا ۹۰٪ افزایش می‌یابد و غلظت گاز CO_2 در جو به ۶۰۰ ppm تا ۱۵۵۰ ppm می‌رسد. برای جلوگیری از آثار مخرب و جبران‌ناپذیر تغییرات آب‌وهوایی، باید افزایش دما و انتشار گاز CO_2 را تا سال ۲۰۵۰ را به ۴۱٪ تا ۷۲٪ کاهش داد و این روند کاهشی تا سال ۲۱۰۰، باید به ۷۸٪ تا ۱۱۸٪ برسد. رویکردهایی برای کاهش تغییرات آب‌وهوایی جهانی وجود دارند که از جمله می‌توان به بهبود بهره‌وری انرژی و ترویج حفظ آن؛ افزایش استفاده از سوخت‌های کم‌کربن از جمله گاز طبیعی؛ استفاده از هیدروژن یا انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی، بادی، برقی و انرژی زیستی؛ جنگل‌کاری؛ احیای جنگل؛ گیراندازی و ذخیره کربن دی‌اکسید (CCS) اشاره کرد.

کربن دی‌اکسید حین فرایند احتراق تشکیل می‌شود و نوع فرایند احتراق به طور مستقیم بر روش حذف CO_2 اثر می‌گذارد. سه سامانه اصلی برجذب CO_2 عبارتند از:

- برجذب پس احتراقی، در این فرایند CO_2 پس از احتراق از گاز دودکش حذف می‌شود؛
- برجذب پیش احتراقی، سوخت که معمولاً زغال سنگ یا گاز طبیعی است، پیش از احتراق تصفیه می‌شود و
- برجذب در احتراق اکسی سوخت (oxyfuel)، در این نوع احتراق از اکسیژن به جای هوا استفاده می‌شود [۱].

اهمیت و نقش پلیمرها در فرایند برجذب و خواص آن‌ها

مواد پلیمری متخلخل از میان مواد برجذب جامد دارای خواص جالب‌تری مانند سطح تنظیم‌پذیر زیاد، خواص گرمایی-مکانیکی و محیط متخلخل تنظیم‌پذیر و عالی هستند. راهبردهای سنتز مواد آلی متخلخل پارامترهای حیاتی در تهیه مواد پلیمری هستند [۳، ۴]. پلیمرهای آلی میکرومتخلخل (MOPs)، چارچوب‌های تری‌آزینی کووالانسی (covalent triazine frameworks, CTFs)، ابرشبکه‌ای (hypercrosslinked polymers, HCPs) و آلی متخلخل (POPs)، چارچوب‌های آلی کووالانسی (COFs) و آروماتیکی

متخلخل (PAFs)، پلیمرهای میکرومتخلخل مزدوج (CMPs) و میکرومتخلخل ذاتی انواع برجذب‌های آلی متخلخل هستند که در زمینه برجذب CO_2 استفاده می‌شوند. مواد پلیمری متخلخل با انواعی از واکنش‌ها مانند جفت شدن، پلیمر شدن تراکمی و واکنش آلکیل‌دار شدن فریدل-کرافت تهیه می‌شوند. برجذب CO_2 با مواد پلیمری متخلخل مختلف با توجه به ارزانی مونومرها، سهولت آماده‌سازی و کاربردهای متنوع آن‌ها در شرایط فعلی به شدت در حال پیشرفت است. مواد جامد آلی متخلخل، برجذب‌های خوبی برای ذخیره کربن دی‌اکسید هستند که با واکنش‌ها و مواد اولیه کم‌هزینه مختلف ساخته می‌شوند. برای مثال، POPها به دلیل داشتن ویژگی‌های متمایزی چون چگالی کم، عملکرد متنوع، تخلخل تنظیم‌پذیر و پایداری گرمایی زیاد استفاده می‌شوند [۵].

ویژگی‌های لازم در انتخاب برجذب، داشتن مشخصات ذاتی با توجه به ظرفیت برجذب CO_2 ، گزینش‌پذیری، پایداری شیمیایی و گرمایی، سینتیک سریع، قابلیت بازیابی، مصرف انرژی و هزینه ساخت کم و استحکام مکانیکی است. بدین منظور، ترکیب آمین‌های CO_2 دوست با قوی‌ترین مواد متخلخل جامد توسعه یافته رویکرد بسیار امیدبخشی است. در نتیجه، افزایش تعداد گروه‌های عاملی آمینی در واحد سطح پایه، باعث افزایش خاصیت CO_2 دوستی آمین‌ها می‌شود. برای دستیابی به این هدف، استفاده از پلیمرهای آمین‌دار به شدت در حال بررسی است [۶].

پلیمرهای آلی متخلخل مانند HCPها، COFها، CMPها و CTFها محدوده برجذب CO_2 را در حدود ۳ mmol.g⁻¹ تا ۶ mmol.g⁻¹ در دمای ۲۷۳ K و فشار ۱ bar نشان می‌دهند. افزون‌بر آمین‌ها، مواد دیگری نیز وجود دارند که برای اصلاح سطح پلیمر استفاده می‌شوند. برای مثال پلیمر آلی، کاتیونی و پلی آمینی مانند پلی اتیلن ایمین (PEI)، وقتی با برجذب‌ها ترکیب می‌شود، برجذب CO_2 را در دمای بیشتر بهبود می‌بخشد. اگر برجذب CO_2 از پلیمر پسماند ساخته شده باشد، می‌تواند در کنترل آلودگی محیط کارکرد دوگانه‌ای داشته باشند. در ستون‌های پرشده صنعتی، کامپوزیت‌های پلیمری به عنوان گزینه برتر برای برجذب CO_2 در نظر گرفته می‌شوند. زیرا برجذب‌های ذره‌ای، مشکلاتی مانند کاهش فشار و جرم ایجاد می‌کنند که این معایب را می‌توان با استفاده از پایه پلیمری حل کرد. همچنین، کامپوزیت‌های پلیمری مزایایی چون پایداری مکانیکی خوب، فرایندپذیری و ارزانی بودن دارند. POPها به دلیل چگالی کم و سطح ویژه و پایداری فیزیکی شیمیایی زیاد، ساختار منافذ و عملکرد تنظیم‌پذیر، نقش مهمی به عنوان عامل برجذب CO_2 دارند [۷].

برجاذب‌های پلیمری براساس نوع پلیمر

پلیمرهای شبکه‌ای و ابریوندی

پلیمرهای شبکه‌ای ساختارهای سه‌بعدی با پیوندهای کووالانسی میان زنجیرهای پلیمری هستند که تراکم پیوندهای عرضی در آن‌ها، ساختارهای متخلخل و پایداری مکانیکی زیاد ایجاد می‌کند. پلیمرهای ابریوندی به‌عنوان دسته‌ای از پلیمرهای شبکه‌ای، دارای بیشترین تراکم پیوندهای عرضی هستند که به سطح ویژه و ظرفیت برجذب زیاد منجر می‌شود. این پلیمرها نیز به‌دلیل ساختارهای متخلخل و پایداری شیمیایی و گرمایی زیاد برای برجذب گازها بسیار مناسب هستند [۸].

پلیمرهای آلی میکرومتخلخل

MOPها پلیمرهای شبکه‌ای تقویت‌شده با فلزات، با ساختار متخلخل مستحکم، شبکه‌های قابل‌طراحی و خواص فیزیکی فوق‌العاده به‌عنوان پیش‌سازهای امیدوارکننده برای کربن‌های متخلخل ارائه شده‌اند. MOPها را می‌توان با روش کنترل‌پذیر سنتز کرد که به ساختارهای متخلخل مشخص و اتصالات مناسب سطح منافذ منجر می‌شود. این مسئله امکان کاربرد بالقوه آن‌ها را در عملکردهای متنوع مانند برجذب گاز، کاتالیز، پیل سوختی، باتری و ابرخازن‌ها فراهم می‌کند. آن‌ها معمولاً با فلزانی مانند آلومینیم، نیکل و تیتانیم تقویت می‌شوند و دارای ساختار چندبعدی با فضاهای باز، استحکام زیاد، مقاوم در برابر سایش، وزن کم و مناسب برای برجذب CO₂ هستند. Gu و همکاران [۹]، روش درجای یک مرحله‌ای را برای تهیه کربن‌های متخلخل عامل‌دار فلزی از طریق تفکات مستقیم مخلوطی از نمک‌های فلزی و یک پلیمر آلی میکرومتخلخل از پیش‌طراحی‌شده گزارش کردند. برجاذب‌های ساخته‌شده در مقایسه با هم‌ساختارهای تهیه‌شده با روش متداول پس از اختلاط، سطح بهبودیافته تا ۱۸۸۶ m².g⁻¹ و ظرفیت برجذب فوق‌العاده زیاد CO₂ تا ۲۵/۹ wt % را در ۲۷۳ K و فشار ۱ bar نشان دادند.

چارچوب‌های آلی کووالانسی

COFها نوعی از POPهای بلوری نوتوسعه‌یافته‌اند که به‌دلیل پایداری شیمیایی، ساختار متخلخل منظم و چارچوب تنظیم‌پذیر و نیز در برخی موارد نورتابی شناخته شده‌اند. آن‌ها از اتصالات کووالانسی منظم میان مونومرهای سازنده آلی از طریق پلیمر شدن برگشت‌پذیر تشکیل می‌شوند. این پلیمرها به‌سبب برخورداری از مزایایی چون پایداری گرمایی، شیمیایی و سطح ویژه زیاد، نقش‌های متنوعی

را در زمینه کاربردهای زیست‌محیطی، مانند برجذب، جداسازی، سنجش و تجزیه کاتالیزی آلاینده‌ها ایفا می‌کنند [۱۰].

چارچوب‌های تری‌آزینی کووالانسی

CTFها به‌عنوان نوعی از POPهای غنی از نیتروژن از اتصالات کووالانسی میان مونومرهای آلی تشکیل شده‌اند که تخلخل و پایداری گرمایی و شیمیایی زیادی را نشان می‌دهند. در این راستا، Kishan و همکاران [۱۱]، ترکیب راهبردی Pd(II) فعال کاتالیزی را در یک CTF متخلخل متشکل از مواضع بی‌پیریدین (bpy-CTF) با اصلاح پس‌سنتزی ارائه کردند. Pd(II)@bpy-CTF، عملکرد کاتالیزی استثنایی را در چرخه‌سازی CO₂ با آمین‌های پروپارژیلی و واکنش‌های جفت شدن (Suzuki-Miyaura و Heck) نشان داد.

پلیمرهای ابرشبکه‌ای

HCPها ماده مهم و بی‌شکلی از POPهاست که ساختار بی‌شکل آن می‌تواند با پیوندزنی عرضی حلقه‌های آروماتیک از طریق واکنش آلکیل‌دار کردن فریدل-کرافت در مجاورت عامل اتصال عرضی خارجی و کاتالیزگر اسید لوئیس تشکیل شوند. برخی از ویژگی‌های شکل‌شناختی پلیمرهای ابرشبکه‌ای از جمله سطح، حجم منافذ و خواص برجذب با ایجاد تغییرات در عامل اتصال عرضی و مقدار کاتالیزگر در طول فرایند سنتز تنظیم‌پذیر است [۱۲، ۱۳].

ترکاشوند و همکاران [۱۴]، یک برجاذب پلیمری HCP برپایه مونومر کاربازول را با بررسی اثر آمین‌دار کردن بر برجذب CO₂ سنتز کردند. براساس یافته‌ها، افزودن گروه‌های آمینی به شبکه پلیمر، ظرفیت برجذب CO₂ را از ۱۸۲/۱۳ mg/g به ۲۳۶/۳۷ mg/g در دمای ۲۹۸° و فشار ۵ bar افزایش داد. سپس آثار دما و فشار بر هر دو برجاذب بررسی شد. نتایج نشان داد، برای هر دو برجاذب با افزایش دما ظرفیت برجذب کاهش می‌یابد، اما کاهش ظرفیت برجذب برای برجاذب NH₂-HCP کمتر از برجاذب HCP بود. همچنین، در دمای معمولی و فشار ۵ bar نتایج بازسازی هر دو برجاذب، بازده زیادی را در پنج سیکل نشان داد.

در کار دیگری، کرمی و همکاران [۱۵] از سه مونومر ارزان‌قیمت بنزن، پلی‌استیرن و کاربازول برای تهیه سه نوع HCP نانومتخلخل استفاده کردند تا کارایی حذف حلال‌های برپایه دی‌اتانول آمین را بهبود داده و انتقال جرم CO₂ را در فرایند پس‌احتراق افزایش دهند. از دی‌اتانول آمین و گلیسرول برای پراکنش این مواد استفاده شد. هر سه نوع پلیمر، برجذب CO₂ را به‌شدت افزایش دادند. HCP تهیه‌شده با مونومر کاربازول با وجود سطح کوچک‌تر آن،

الکتروشیمیایی به محصولات با ارزش صنعتی ارائه می‌دهند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد، تمام این مزایا را می‌توان در CMPهای بدون فلز مشاهده کرد و گزینهٔ واقعاً سبزی را ارائه کرد [۱۷].

پلی آمیدها

پلی آمیدها به‌عنوان یکی از اولین گرمانرم‌های شیمیایی، به‌دلیل پایداری گرمایی زیاد، مقاومت شیمیایی خوب و خواص مکانیکی عالی به‌طور گسترده استفاده می‌شوند که به‌خاطر ارتباط بین مولکولی قوی پلی آمیدها و ساختار صلب آن است. به‌طور کلی، آن‌ها از طریق پلیمر شدن تراکمی یک مرحله‌ای با استفاده از آلکالید، انیدرید و کربوکسیلیک اسید با آمین به‌عنوان مواد اولیه تهیه می‌شوند. افزون‌براین، آمین‌کافت استرها با انواع مختلف آمین‌ها و آبکافت ترکیبات سیانو، اغلب برای تهیهٔ پلی آمیدها استفاده می‌شوند. اخیراً تلاش زیادی برای توسعهٔ انواع مختلف پلی آمیدهای ناجورحلقهٔ آروماتیک انجام شده است که به‌عنوان مواد پیشرفته مانند الیاف، فیلم‌ها و برجاذب‌های متخلخل به‌کار می‌روند. خوشبختانه پلی آمیدها را می‌توان با آمینو، کربوکسیل و گونه‌های فلوئور عامل‌دار کرد که می‌توانند برهم‌کنش قوی مانند اسید لوئیس-باز لوئیس، پیوند H و واکنش اتصال عرضی را به گازهایی مانند CO₂ فراهم کنند [۱۸].

پلیمرهای وینیلی

پلی آکریلات‌ها

پلی آکریلات‌ها، ترکیبات پلیمری حاصل از مونومرهای آکریلات هستند که نوعی از پلیمرهای وینیلی محسوب می‌شوند. این پلاستیک‌ها به‌دلیل شفافیت، مقاومت در برابر شکست و کشسانی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۹].

Zhang و همکاران [۲۰]، نانوالیاف پلی آکریلونیتریل متخلخل آب‌کافتی و پیوندیافته با PEI را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند، این نمونه در دمای ۴۰ °C قابلیت برجذب CO₂ را به مقدار ۱/۲۳ mmol.g⁻¹ دارد و از گزینش‌پذیری CO₂/N₂ زیاد و قابلیت بازسازی خوبی برخوردار است. این نوع برجاذب، تخلخل، پایداری گرمایی و استحکام کششی خوبی را نشان داد که کاربرد آن را در برجذب CO₂ تضمین می‌کند.

پلی استیرن

پلی استیرن، نوعی پلیمر آروماتیک وینیلی ساخته‌شده از مونومر استیرن (C₈H₈) است. این پلیمر بسته به نحوهٔ پلیمر شدن می‌تواند مانند شیشه سخت و شفاف باشد یا اسفنج شده و به یک ماده عایق

به‌دلیل وجود اتم نیتروژن در حلقهٔ کاربازول، بهترین نتیجه را به‌دست داد. افزون‌براین، سرعت‌های جریان گاز مختلف، غلظت دی‌اتانول آمین و غلظت گلیسرول برای تعیین اثر کاتالیزی HCP تهیه‌شده با کاربازول بر برجذب ناهمگن CO₂ بررسی شد. با توجه به یافته‌ها، افزایش ضریب انتقال جرم کلی تا ۳۱۹٪ در محدوده‌های بررسی‌شده با استفاده از HCP تهیه‌شده با کاربازول امکان‌پذیر است. Bahmei و همکاران [۱۶]، اثر سنتز و پارامترهای عملیاتی را بر برجذب CO₂ و N₂ و گزینش‌پذیری CO₂/N₂ یک HCP برپایهٔ پلی‌استیرن انبساط‌یافته پسماندی، پرداختند. این پارامترها زمان سنتز، مقادیر کاتالیزگر و عامل اتصال عرضی، دما و فشار برجذب و درصد CO₂ در مخلوط بودند. روش سطح پاسخ (response surface methodology, RSM) و نظریهٔ محلول برجذبی ایده‌آل (ideal adsorbed solution theory, IAST) برای طراحی آزمون استفاده شد. پس از سنتز ۱۹ برجاذب در شرایط مختلف، آزمون‌ها انجام شد. نتایج نشان داد، سطح ویژه و حجم ریزمنافذ، برجذب و گزینش‌پذیری برجاذب در ابتدا افزایش یافته و سپس با افزایش زمان سنتز، اتصالات عرضی و مقدار کاتالیزگر، کاهش می‌یابد. برجاذب‌ها با استفاده از RSM برای به‌حداکثرسانی برجذب CO₂ و برجذب گزینشی CO₂/N₂ با هدف برجذب ۱۵٪ CO₂ در مخلوط گاز بهینه شدند. پارامترهای سنتز بهینه برای برجاذب HCP از جمله زمان سنتز، مقادیر عامل اتصال عرضی و کاتالیزگر به‌ترتیب تقریباً ۱۳ h، ۳۰ و ۳۰ mmol تعیین شدند. در شرایط بهینه برای گاز دودکش با نسبت CO₂:N₂ برابر ۱۵:۸۵، برجاذب CO₂/N₂ گزینش‌پذیری ۱۱/۰۵ را نشان داد که آن را برای برجذب گازهای دودکش مناسب می‌کند.

پلیمرهای ریزمتخلخل مزدوج

استفاده از CMPها به‌عنوان دسته‌ای از POPها، روشی ساده‌تر، ارزان‌تر و سبزتر برای برجذب CO₂ است. سنتز آن‌ها راحت و در بسیاری از موارد واکنشی یک‌مرحله‌ای است. آن‌ها اغلب به‌راحتی در مقیاس بزرگ سنتز می‌شوند (در بسیاری از موارد یک واکنش یک‌مرحله‌ای)؛ از نظر شیمیایی و گرمایی پایدارند، به‌ویژه در مقایسه با چارچوب‌های آلی فلزی (metal organic frameworks, MOF) و COF به‌دلیل ماهیت بی‌شکل آن‌ها) و در نتیجه تولید آن‌ها ارزان است. افزون‌براین، سطح بزرگ، چارچوب‌های متخلخل تنظیم‌پذیر و ساختارهای شیمیایی بدین معنی است که آن‌ها به‌عنوان برجاذب CO₂ بسیار کارآمد گزارش می‌شوند. همچنین، آن‌ها مسیر دوگانه‌ای برای استفاده از CO₂ برجذبی از طریق تبدیل شیمیایی یا کاهش

پلی آنیلین‌ها

پلی آنیلین، پلیمری رسانا با واحد تکرارشونده شامل آمین نوع دوم بین دو حلقه بنزن آروماتیک است. سهولت سنتز، تنظیم پذیری شکل شناسی آن به نانوساختارهای مختلف با سطح بزرگ و پایداری گرمایی زیاد، پلی آنیلین را برای کاربردهای مختلف، از جمله بر جذب CO_2 ، مناسب کرده است [۶].

پلی ایمین‌ها

پلی ایمین (PEI) که پلی آزیردین نیز نامیده می شود، از بهترین آمین های پلیمری آلیفاتیک است. این پلیمر به دلیل دسترس پذیری، قابلیت بر جذب CO_2 زیاد، تراکم آمین مضاعف، داشتن آمین نوع اول در سر زنجیرها و پایداری آنکه ظرفیت بر جذب را تا بیش از دمای 90°C حفظ می کند، بسیار بررسی شده است. این ترکیب به شکل خطی، شاخه ای یا اشکال ساختاری دارپلیمر، در محدوده وزن مولکولی ۷۵۰۰۰-۳۰۰ در دسترس است و می تواند حاوی آمین های نوع اول، دوم و سوم در انتهای زنجیر مربوط، ستون اصلی و نقاط اتصال باشد. این ترکیب پلیمری به عنوان پوشش روی بر جاذب های CO_2 با پایه سیلیسی (SBA-15، MCM-41، سیلیس دود، سیلیس رسوبی، اسفنج سیلیس، سیلیس ژل و غیره)، خاک رس، مواد کربنی (گرافن اکسید، نانولوله کربن، فلورن، کربن فعال و کره های کربن)، آلومینا، MOF ها، ژئولیت، پلیمرها و غیره، توسط Varghase و Karanikolos آزمایش شده است [۶]. PEI هنگامی که با بر جاذب ها ترکیب می شود، می تواند بر جذب CO_2 را در دماهای بیشتر بهبود بخشد [۷].

زمین پلیمرها

زمین پلیمر، نوعی ماده معدنی متخلخل با ساختار مشبک سه بعدی حاوی مقادیر زیادی عناصر سیلیکون و آلومینیم همراه با خواص مکانیکی خوب، فرایند آماده سازی ساده (بدون تف جوشی) و هزینه اقتصادی کم و سازگار با محیط زیست است. زمین پلیمرها به طور گسترده در زمینه ساخت و ساز استفاده می شوند. بسیاری از سایر مطالعات نشان داده اند، زمین پلیمر به دلیل خواص منحصر به فرد آن مانند خواص تنظیم پذیر سطح متخلخل به یکی از امیدوارکننده ترین مواد معدنی تبدیل می شود. زمین پلیمرها به دلیل مزایایی چون سطح ویژه و تخلخل زیاد می توانند به عنوان مواد بر جاذب برای بر جذب کاتیون های فلزی، آنیون ها، رنگ ها و گازها استفاده شوند [۲۴]. انواع مختلفی از مواد آلومینوسیلیکاتی و ضایعات جامد صنعتی غنی از سیلیس و آلومینا، مانند متاکائولین، دیاتومید، خاک رس، خاکستر

نرم و سفید تبدیل شود [۲۱]. Yang و همکاران [۲۲]، ظرفیت بر جذب $1/48 \text{ mmol.g}^{-1}$ را برای ۲۰٪ wt از PEI ($M_w=1800$) بارگیری شده بر رزین پلی استیرن ماکرومتخلخل غیرقطبی تجاری ADS-17 در دمای 25°C و ۲ bar در ۳۵٪ مخلوط CO_2/CH_4 همراه با قابلیت بازسازی قابل ملاحظه، گزارش کردند.

پلی آمین‌ها

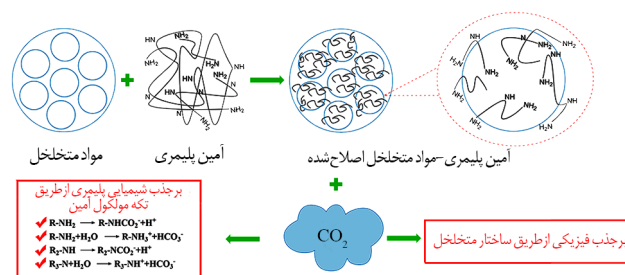
گروهی از ترکیبات آلی با حداقل دو گروه آمینی هستند که در ادامه به برخی از انواع آن ها اشاره می شود. در شکل ۱، نمایی از آمین دار کردن بر جاذب متخلخل نشان داده شده است.

پلی پروپیلن ایمین‌ها

پلی پروپیلن ایمین ها (PPIs) که با نام پلی آزیدین ها نیز شناخته می شوند، دسته ای از آمین های پلیمری هستند که به طور خطی، شاخه ای یا درختان در دسترس است. PPI در انتهای زنجیر، زنجیر اصلی یا نقاط شاخه ای دارای آمین های نوع اول، دوم و سوم بوده که آن را برای بر جذب CO_2 مناسب می سازد. با این حال به دلیل عوارض مربوط به سنتز مونومر و زمان پلیمر شدن، مطالعات محدودی در این باره انجام گرفته است [۶].

پلی آلایل آمین‌ها

پلی آلایل آمین ها (PAAs) دسته ای از آمین های پلیمری با ساختار مولکولی متشکل از آمین های نوع اول بسیار متراکم در زنجیر جانبی هستند. این دسته برای بر جذب CO_2 ، سامانه های بارگذاری شده برای کاهش مسائل مربوط به مقاومت اکسایشی و گرمایی معرفی شده اند [۲۳]. افزون بر این، PAAs به دلیل نیروهای منسجم در میان زنجیرها و چسبندگی با پایه، به عنوان یک ماده اتصال دهنده خوب در سامانه های آمینی است [۶].



بادی، خاکستر زیست توده، پرلیت، سبوس برنج، دورریز شیشه، دورریز کارخانه فولاد و غیره معمولاً به عنوان مواد اولیه برای تهیه زمین پلیمرها استفاده می شوند [۲۵].

زیست پلیمرها

زیست پلیمرها شامل پلیمرهای زیست تخریب پذیر و پلیمرهای زیست محیطی هستند و از مواد طبیعی مانند پنبه، کربوهیدرات و پروتئین ها تشکیل شده اند. پلیمرهای زیست تخریب پذیر می توانند با میکروب ها و بافت های زیستی تخریب شوند و به مواد طبیعی مانند آب، کربن دی اکسید و گازهای آلی تبدیل شوند. اما پلیمرهای زیست محیطی ممکن است شامل مواد شیمیایی باشند که توسط میکروب ها تخریب نمی شوند. این پلیمرها معمولاً از منابع زیستی مانند گیاهان و محصولات زراعی تهیه می شوند و کاربردهای آنها شامل محصولات صنعتی، مصرفی و معدنی هستند. از جمله زیست پلیمرها می توان به پلی لاکتیک اسید (PLA)، پلی هیدروکسی آلکانوات ها (PHA)، پلی اتیلن فورانات (PEF)، پلی کاپرولاکتون (PCL)، پلی بوتیلن سوکسینات (FBS)، کیتوسان، ژلاتین و پلیمرهای نشاسته ای اشاره کرد.

سطح ویژه زیست پلیمرها ممکن است خیلی زیاد نباشد، اما به دلیل خواص برجذبی و زیست تخریب پذیری آنها می توانند در صنعت بسته بندی برای برجذب CO_2 استفاده شوند. این کاربردها می توانند به کاهش آثار زیست محیطی و حفظ تازگی محصولات کمک کنند [۲۶، ۲۷].

برجاذب های مشتق از ضایعات پلیمری

پلاستیک ها از پلیمرهایی هستند که کاربرد تجاری گسترده ای دارند. در عین حال، مدیریت ضایعات آنها یکی از مسائل مهم است. پژوهش ها در زمینه بازیافت پلاستیک ها در حال انجام است. برای مثال، یکی از پلیمرهای پسماند، پلی یورتان (PU) است که به ویژه به شکل اسفنج پلی یورتان استفاده می شود [۷].

پسماندهای پلاستیکی مانند پلی اتیلن ترفتالات (بطری)، پلی پروپیلن (فنجان)، پلی وینیل کلرید (لوله پلاستیکی) و ضایعات تایر (لاستیک) قالب یافته با حبه های سرباره کاربید (carbide slag pellets) نیز برای برجذب CO_2 استفاده شدند. مشخص شد، این مواد ظرفیت برجذب 0.277 g/g دارد و می تواند تا ۲۵ cycle ادامه یابد [۲۸]. در جدول ۱، خلاصه ای از عملکرد برجذب CO_2 برای برخی برجاذب های مشتق از پسماندهای پلیمری آورده شده است.

مقایسه پلیمرهای معرفی شده

هریک از پلیمرهای معرفی شده در این پژوهش خواص، مزایا و چالش های منحصر به فردی دارند که برای انتخاب بهترین نوع پلیمر به عنوان برجاذب در شرایط معین، باید به آنها توجه کرد. در جدول ۲، خلاصه ای از این مقایسه درج شده است.

چالش های موجود در استفاده از پلیمرها

پیش از اینکه بتوان از برجاذب های CO_2 پلیمری در مقیاس انبوه برای کاربردهای صنعتی استفاده کرد، باید بر مشکلات متعدد

جدول ۱- خلاصه ای از عملکرد برجذب CO_2 برای برخی برجاذب های مشتق از ضایعات پلیمری.

مرجع	گزینه پذیرایی (%)	ظرفیت برجذب CO_2 (mmol/g)	حجم منافذ m^3/g	مساحت سطح ^۱ m^2/g	فشار (bar)	دما (°C)	عامل فعال کننده	مواد اولیه-برجاذب
۲۹	-	۳۰/۵	۲/۰۱	۳۳۴۲	۲۵	۳۰	KOH	پلی دوپامین
۳۰	-	۵/۹۱	۰/۳۴	۲۸/۶	۱	۴۰	PEI	اسفنج پلیمر
۳۱	۱۵/۹ CO_2/CH_4	۰/۸۵	۱۴/۳	۲۰۰۰	۲۰	۲۵	Rayon+ CO_2/KOH	پلی پیرو ل گرانرو
۳۲	-	۰/۹۱	۰/۶۲	۶۸۶/۳۷	۱	۳۰	CO_2	رزین اپوکسی
۳۳	-	۴/۵	۰/۳۴	۹۴۱	۱	۲۵	KOH	مونومر پیرو ل
۳۴	۱۲/۵ CO_2/N_2	۰/۸۳	۰/۲۴۹	۲۶۶	۱	۳۰	-	رزین ملامین-فرمالدهید

^۱ اندازه گیری شده با روش (Brunauer-Emmett-Teller) BET

جدول ۲- خلاصه‌ای از مقایسه انواع پلیمرهای معرفی شده [۶-۱۳، ۱۷-۲۷].

پلیمر	خواص	چالش‌ها	مزایا
پلیمرهای ابرشبکه‌ای (HCPs)	چگالی پیوندهای عرضی و سطح ویژه زیاد و پایداری شیمیایی و گرمایی	نیاز به تغییرات سطح برای افزایش ظرفیت بر جذب	تهیه راحت و سریع و ظرفیت بر جذب زیاد
چارچوب‌های آلای کووالانسی (COFs)	پایداری شیمیایی، ساختار متخلخل منظم و چارچوب تنظیم‌پذیر	تهیه و تولید پیچیده‌تر	خواص گرمایی-مکانیکی مناسب و سینتیک سریع
پلیمرهای آلای میکرومتخلخل (MOPs)	تقویت شده با فلزات، ساختار متخلخل قوی و شبکه‌های قابل طراحی	تولید پیچیده و گران	بر جذب و استحکام زیاد و وزن کم
چارچوب‌های تری‌آزینی کووالانسی (CTFs)	غنی از نیتروژن و تخلخل و پایداری گرمایی و شیمیایی زیاد	هزینه تولید زیاد	عملکرد کاتالیزی عالی و پایداری زیاد
پلیمرهای میکرومتخلخل مزدوج (CMPs)	سطح بزرگ، چارچوب‌های متخلخل تنظیم‌پذیر و پایداری شیمیایی	نیاز به اصلاحات برای افزایش کارایی	سنتز راحت، ارزان و پایداری شیمیایی و گرمایی
پلی آمیدها	پایداری گرمایی زیاد، مقاومت شیمیایی خوب و خواص مکانیکی عالی	هزینه تولید و سنتز پیچیده	ظرفیت بر جذب و استحکام زیاد و قابلیت عامل‌دار شدن
پلی آکریلات‌ها	شفافیت، مقاومت در برابر شکست و کشسانی	حساس به شرایط محیطی مانند رطوبت	ظرفیت بر جذب زیاد، سینتیک بر جذب سریع و پایداری زیاد
پلی استیرن	پایداری گرمایی، مقاومت شیمیایی و خواص مکانیکی خوب	نیاز به بهبود در سینتیک بر جذب	ظرفیت بر جذب زیاد و هزینه کم
پلی اتیلن‌ایمین (PEI)	تراکم آمین زیاد و پایداری گرمایی تا ۹۰ °C	نیاز به ترکیب با سایر بر جاذب‌ها برای کارایی زیاد	پایداری گرمایی مناسب و هزینه نسبتاً کم
پلیمرهای آلای میکرومتخلخل (MOPs)	ساختار متخلخل قوی و قابل کنترل و طراحی	تولید پیچیده و گران	ظرفیت بر جذب زیاد و مناسب برای بر جذب گازها
پلی پروپیلن‌ایمین‌ها (PPI)	آمین‌های نوع اول، دوم و سوم در زنجیر	پیچیدگی سنتز و هزینه زیاد	ظرفیت بر جذب زیاد و پایداری خوب
پلی آلایل آمین‌ها (PAA)	آمین‌های نوع اول متراکم در زنجیر جانبی	نیاز به بهبود مقاومت اکسایشی و گرمایی	ظرفیت بر جذب زیاد و نیروهای منسجم و چسبنده
پلی آنیلین‌ها	پایداری گرمایی زیاد و قابلیت تنظیم شکل‌شناسی	حساس به شرایط محیطی و شیمیایی	ظرفیت بر جذب زیاد و آسانی سنتز
ژئوپلیمرها	ساختار مشبک سه‌بعدی، حاوی سیلیکون و آلومینیم	حساسیت به شرایط محیطی و ترکیب مواد اولیه	سطح ویژه و تخلخل زیاد
زیست پلیمرها	پایداری گرمایی و شیمیایی زیاد	سطح ویژه کم و حساس به شرایط محیطی	کاهش آثار زیست محیطی و حفظ تازگی محصولات
پلی یورتان (PU)	استحکام مکانیکی و تراکم زیاد	زیست پایداری کم	کاربرد گسترده تجاری و بازیافت پذیری

نقش پلیمرها در بر جذب گاز کربن دی اکسید برای کاهش ...

فصلنامه علمی، سال پانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

عملیات برای تعیین عملی بودن و اقتصادی بودن آن، هنوز به‌طور کامل ثابت نشده است. فنون اصلاح به‌کارگرفته‌شده برای برخی بر جاذب‌ها نیز ممکن است عوارض و هزینه آن‌ها را افزایش دهند.

موجود غلبه کرد، ازجمله:
- اولاً، پایداری و استحکام بر جاذب‌های مشتق از پسماند با وجود نقش مهم ظرفیت بر جذب زیاد و چرخه طولانی مدت

- بیشتر مطالعات با استفاده از گازهای شبیه سازی شده انجام شده است. توصیه می شود، مطالعات بیشتری در این راستا در شرایط دودکش واقعی و اجزای آن انجام شود.

- اگرچه برجذب مرحله ای ضروری در برجذب CO_2 بوده، اما عملکرد کلی فرایند بدون بازسازی ناقص است. بنابراین، برجذب باید از نظر گرمایی در برابر دمای دفع مقاوم باشد.

- مواد اولیه برجذب ممکن است در طول فرایند تولید، دارای آلاینده هایی باشند که ممکن است بر برجذب آن ها اثر بگذارد. افزون بر این، برجذب های استفاده شده ممکن است باعث آلودگی ثانویه شوند که برای رفع آن هزینه های کلی فرایند افزایش یابد.

- ایجاد یک پایگاه داده سامانمند با اطلاعات زیر مهم است:

الف- انتخاب مواد اولیه (دسترس پذیری، خواص و هزینه)؛
ب- روش های آماده سازی و آثار برجذب ها و خواص فیزیکی شیمیایی آن ها؛

پ- آثار سایر اجزای گاز دودکش؛

ت- شرایط بازسازی برجذب؛

ث- اقدامات دفع برجذب استفاده شده؛

ج- تجزیه و تحلیل هزینه؛

چ- آثار زیست محیطی مواد مختلف و

چنین پایگاه داده ای تصمیم گیری آگاهانه را آسان می کند [۳۵].

نتیجه گیری

مواد پلیمری با ساختار متخلخل دارای قابلیت های زیادی از جمله مساحت سطح زیاد و تنظیم پذیری، خواص گرمایی-مکانیکی، چگالی کم، پایداری فیزیکی شیمیایی زیاد، سینتیک سریع، استحکام و ظرفیت برجذب زیاد هستند که مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در زمینه برجذب کربن دی اکسید قرار گرفته اند. انواع POP ها مانند CMPs، COFs، HCP و CTFs محدوده برجذب CO_2 را در حدود 3 mmol.g^{-1} تا 6 mmol.g^{-1} در 273 K و 1 bar نشان می دهند. مشخصات ذاتی با توجه به ظرفیت برجذب CO_2 ، گزینش پذیری، پایداری شیمیایی و گرمایی، سینتیک

سریع، قابلیت بازیابی، مصرف انرژی، هزینه ساخت کم و استحکام مکانیکی از جمله ویژگی های مورد نیاز برای انتخاب برجذب است. برجذب های مشتق از مواد پلیمری دارای مزایای بسیاری از جمله دسترس پذیری، تجدید پذیری، مقدار کربن زیاد، هزینه باری و خورندگی کم هستند. با استفاده از مواد اصلاح کننده سطح به ویژه آمین ها، می توان خواص سطحی برجذب را بهبود و ظرفیت برجذب را افزایش داد. هر یک از پلیمرها در فرایند برجذب CO_2 ، خواص و چالش های منحصر به فردی دارند. برای مثال، HCP ها و CMP ها دارای سطح ویژه بیشتری هستند، در حالی که زیست پلیمرها به دلیل انعطاف پذیری در زیست تخریب پذیری و ارزانی، نسبت به سایر پلیمرها برتری دارند. CMP ها به دلیل مواد اولیه کم وزن آن ها بیشتر در زمینه های الکتریکی کاربرد دارند. در حالی که HCP ها به خاطر طرز تهیه راحت و سریع نسبت به سایر POP ها، بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته اند. اما افزایش ظرفیت برجذب آن ها نیازمند تغییرات در سطح است. استفاده از مواد زائد پلیمری سنتزی مانند پلاستیک ها، به عنوان پیش ساز کربن متخلخل موجب کنترل ترکیب شیمیایی برای دستیابی به شکل شناسی بهتر، اندازه منافذ تنظیم پذیر و توزیع آن و شیمی سطح هدف دار در مقایسه با انواع تهیه شده از ضایعات زیست توده می شود. نتایج این مطالعه نشان می دهد، پلیمرها می توانند به عنوان ابزارهای کارآمد و پایدار برای برجذب کربن دی اکسید و کاهش آثار گلخانه ای استفاده شوند. بدون سیاست های تغییرات آب و هوایی تخمینی، انتشار گازهای گلخانه ای در سطح جهان رو به افزایش است. برای جلوگیری از آثار مخرب و جبران ناپذیر تغییرات آب و هوایی باید افزایش دما و انتشار گاز کربن دی اکسید را کاهش داد. انتخاب بهترین روش برای کاهش کربن دی اکسید و حذف آن از دغدغه های روز دنیا محسوب می شود. در این مطالعه با پرداختن به ترکیبات پلیمری به عنوان یکی از روش های کارآمد در برجذب کربن دی اکسید سعی شد، با معرفی انواع پلیمرها و خواص هر یک از آن ها و نیز ارائه راهکارهای ارتقای کیفیت برجذب، در این مسیر گامی هر چند اندک برداشته شود. در نهایت، چالش های پیش رو نیز بررسی شده و راهکارهایی برای گذر از این چالش ها ارائه شد.

مراجع

1. Leung D.Y., Caramanna G., and Maroto-Valer M.M., An Overview of Current Status of Carbon Dioxide Capture and

Storage Technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **39**, 426-443, 2014.

2. Hee S., Chen G., Xiao H., Shi G., Ruan C., Ma Y. et al., Facile Preparation of N-Doped Activated Carbon Produced from Rice Husk for CO₂ Capture, *J. Colloid Interface Sci.*, **582**, 90-101, 2021.
3. Zou L., Sun Y., Che S., Yang X., Wang X., Bosch M. et al., Porous Organic Polymers for Post-Combustion Carbon Capture, *Adv. Mater.*, **29**, 1700229, 2017.
4. Singh G., Lee J., Karakoti A., Bahadur R., Yi J., Zhao D. et al., Emerging Trends in Porous Materials for CO₂ Capture and Conversion, *Chem. Soc. Rev.*, **49**, 4360-4404, 2020.
5. Senthilkumaran M. and Mareeswaran P.M., *Porous Polymers-based Adsorbent Materials for CO₂ Capture*, *Nanomaterials for CO₂ Capture, Storage, Conversion and Utilization*, Elsevier, 31-52, 2021.
6. Varghese A.M. and Karanikolos G.N., CO₂ Capture Adsorbents Functionalized by Amine-Bearing Polymers: A Review, *Int. J. Greenh. Gas Control*, **96**, 103005, 2020.
7. Indira V. and Abhitha K., A Review on Polymer Based Adsorbents for CO₂ Capture, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP, 2021.
8. Tan L. and Tan B., Hypercrosslinked Porous Polymer Materials: Design, Synthesis, and Applications, *Chem. Soc. Rev.*, **46**, 3322-3356, 2017.
9. Gu S., Yu W., Chen J., Zhang H., Wang Y., Tang J. et al., Building Metal-Functionalized Porous Carbons from Microporous Organic Polymers for CO₂ Capture and Conversion under Ambient Conditions, *Catal. Sci. Technol.*, **9**, 4422-4428, 2019.
10. Wang J. and Zhuang S., Covalent Organic Frameworks (COFs) for Environmental Applications, *Coord. Chem. Rev.*, **400**, 213046, 2019.
11. Kishan R., Rani P., Singh G., and Nagaraja C., Functionalized Covalent Triazine Framework (CTF) for Catalytic CO₂ Fixation and Synthesis of Value-Added Chemicals, *Cryst. Growth Des.*, **24**, 7878-7887, 2024.
12. Rostami P., Moradi M.R., Pordsari M.A., and Ghaemi A., Carboxylic Acid Functionalized Para-xylene Based Hypercrosslinked Polymer as a Novel and High Performance Adsorbent for Heavy Metal Removal, *Arab. J. Chem.*, **17**, 105634, 2024.
13. Khoshraftar Z. and Ghaemi A., Adsorption of Organic Pollutants from Pesticides Using Polymeric Adsorbents, Polymeric Adsorbents, in *Polymeric Adsorbents Characterization, Properties, Applications, and Modelling*, Ghaemi A., Norouzbeigi R., and Masoumi H., (Eds.), Elsevier, 461-512, 2024.
14. Torkashvand A., Moradi M.R., and Ghaemi A., Amine Grafting of Carbazole-Based Hypercrosslinked Polymer as an Adsorbent to Enhance CO₂ Capture, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, **8**, 100472, 2023.
15. Karami B., Bayat B., Penchah H.R., and Ghaemi A., Nano porous Hypercrosslinked Polymers as Cost-Effective Catalysts to Significantly Promote the CO₂ Absorption Performance of Water-Lean Solvents for Post-Combustion CO₂ Capture, *Fuel*, **363**, 130929, 2024.
16. Bahmei F., Hemmati A., Ghaemi A., and Bahreini M., Improving Hypercrosslinked Polymer CO₂/N₂ Selective Separation through Tuning Polymer's Porous Properties: Optimization Using RSM-BBD, *J. CO₂ Utilization*, **88**, 102926, 2024.
17. Karatayeva U., Al Siyabi S.A., Brahma Narzary B., Baker B.C., and Faul C.F., Conjugated Microporous Polymers for Catalytic CO₂ Conversion, *Adv. Sci.*, **11**, 2308228, 2024.
18. Shao L., Liu M., Sang Y., and Huang J., One-Pot Synthesis of Melamine-Based Porous Polyamides for CO₂ Capture, *Mesoporous Mater.*, **285**, 105-111, 2019.
19. Penzel E., Polyacrylates, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000. https://doi.org/10.1002/14356007.a21_157
20. Zhang Y., Guan J., Wang X., Yu J., and Ding B., Balsam-Pearl-Skin-Like Porous Polyacrylonitrile Nanofibrous Membranes Grafted with Polyethyleneimine for Postcombustion CO₂ Capture, *ACS Appl. Mater. Interf.*, **9**, 41087-41098, 2017.
21. Satterthwaite K., *Plastics Based on Styrene*, *Brydson's Plastics Materials*, Elsevier, 311-328, 2017.
22. Yang H., Li W., Liu J., Sun Y., and Liu W., Polyethylenimine-Impregnated Resins: The Effect of Support Structures on Selective Adsorption for CO₂ from Simulated Biogas, *Chem. Eng. J.*, **355**, 822-829, 2019.
23. Cai Y., Wang Z., Yi C., Bai Y., Wang J., and Wang S., Gas Transport Property of Polyallylamine-Poly(vinyl alcohol)/Polysulfone Composite Membranes, *J. Membr. Sci.*, **310**, 184-196, 2008.
24. Xu J., Li M., Zhao D., Zhong G., Sun Y., Hu X. et al., Research and Application Progress of Geopolymers in Adsorption: A Review, *Nanomaterials*, **12**, 3002, 2022.
25. Singh B., Ishwarya G., Gupta M., and Bhattacharyya S., Geopolymer Concrete: A Review of Some Recent Developments, *Constr. Build. Mater.*, **85**, 78-90, 2015.
26. Jha S., Akula B., Enyima H., Novak M., Amin V., and Liang H., Biodegradable Biobased Polymers: A Review of the State of the Art, Challenges, and Future Directions, *Polymers*, **16**, 2262, 2024.
27. Masoumi H., Types of Polymeric Adsorbents, Polymeric Adsorbents, in *Polymeric Adsorbents*, Ghaemi A., Norouzbeigi R., and Masoumi H., (Eds.), Elsevier, 1-46, 2024.
28. Sun J., Sun Y., Yang Y., Tong X., and Liu W., Plastic/Rubber Waste-Templated Carbide Slag Pellets for Regenerable CO₂ Capture at Elevated Temperature, *Appl. Energy*, **242**, 919-930, 2019.
29. Xian S., Xu F., Zhao Z., Li Y., Li Z., Xia Q. et al., A Novel

- Carbonized Polydopamine) C-PDA (Adsorbent with High CO₂ Adsorption Capacity and Water Vapor Resistance, *AIChE J.*, **62**, 3730-3738, 2016.
30. Deng J., Liu Z., Du Z., Zou W., and Zhang C., Fabrication of PEI-Grafted Porous Polymer Foam for CO₂ Capture, *J. Appl. Polym. Sci.*, **136**, 47844, 2019. doi: 10.1002/app.47844
31. Attia N., Jung M., Park J., Cho S.-Y., and Oh H., Facile Synthesis of Hybrid Porous Composites and Its Porous Carbon for Enhanced H₂ and CH₄ Storage, *Int. J. Hydrogen Energy*, **45**, 32797-32807, 2020.
32. Tiwari D., Bhunia H., and Bajpai P.K., Epoxy Based Oxygen Enriched Porous Carbons for CO₂ Capture, *Appl. Surf. Sci.*, **414**, 380-389, 2017.
33. To J.W.F., He J., Mei J., Haghpanah R., Chen Z., Kurosawa T. et al., Hierarchical N-Doped Carbon as CO₂ Adsorbent with High CO₂ Selectivity from Rationally Designed Polypyrrole Precursor, *J. Am. Chem. Soc.*, **138**, 1001-1009, 2016. doi: 10.1021/jacs.5b11955
34. Goel C., Bhunia H., and Bajpai P.K., Mesoporous Carbon Adsorbents from Melamine-Formaldehyde Resin Using Nanocasting Technique for CO₂ Adsorption, *J. Environ. Sci.*, **32**, 238-248, 2015.
35. Ochedi F.O., Liu Y., and Adewuyi Y.G., State-of-the-Art Review on Capture of CO₂ Using Adsorbents Prepared from Waste Materials, *Process Safety Environ. Prot.*, **139**, 1-25, 2020.

