

ساخت و ارزیابی عملکرد پلیمر آلی متخلخل آمورف در فرایند جذب دی‌اکسید کربن به منظور تولید هیدروژن آبی

سید مهدی مجمریان^۱، ناهید خندان^{۱*}، یاسمین بیده^{۲*}

^۱ گروه فناوریهای شیمیایی سبز، پژوهشکده فناوریهای شیمیایی، سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران
^۲ گروه صنایع شیمی آلی و دارویی، پژوهشکده فناوریهای شیمیایی، سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

Seyed Mahdi Mejmarian¹, Nahid Khandan^{۲*}, Yasamin Bide²

چکیده:

مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی نگرانی‌های جدی در مورد افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه آلودگی هوا و همچنین تغییرات آب و هوایی ایجاد کرده است. تولید هیدروژن آبی یک روش جدید برای جلوگیری از تولید دی‌اکسید کربن به شمار می‌آید. پلیمرهای آلی متخلخل با توجه به پایداری حرارتی و شیمیایی آنها جاذب‌های مناسبی برای جذب گاز دی‌اکسید کربن هستند و توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. از این رو در این مطالعه پلیمر آلی متخلخل آمیدی (AM-POP) از ملامین، ترفتالویل کلراید تحت شرایط رفلاکس به مدت ۶ ساعت سنتز شد و به وسیله روش‌های FTIR، SEM و BET شناسایی شد. متوسط اندازه حفرات ۱۵ نانومتر و مساحت سطح جاذب برابر ۳۳۹ متر مربع می‌باشد. اندازه ذرات گرفته شده در محدوده ۱۴ تا ۱۸ نانومتر می‌باشند. میزان ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن روی نانو ساختار سنتز شده با روش حجم سنجی در دمای ۲۹۸ کلوین و فشار ۱۶ بار اندازه‌گیری شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که ظرفیت جذب این ساختار برابر ۲.۳ میلی مول به ازای هر گرم جاذب است.

واژه‌های کلیدی: پلیمر آلی متخلخل، ملامین، جذب سطحی، دی‌اکسید کربن، هیدروژن آبی

مقدمه:

در دهه‌های اخیر مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی نگرانی‌های جدی در مورد افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه آلودگی هوا و همچنین تغییرات آب و هوایی ایجاد کرده است. علی‌رغم تعهدات کشورها در معاهده پاریس، از طریق اعمال مالیات بر کربن و اعمال مقررات سخت‌گیرانه، انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با انرژی جهانی در سال ۲۰۱۸ به بالاترین حد خود رسیده است.

khandan@irost.org, y.bide@irost.ir

^۱ پست الکترونیک عهده دار مکاتبات

^۲ Corresponding author Email: khandan@irost.org, y.bide@irost.ir

آلودگی هوای محیط نیز همچنان یک مشکل جدی باقی مانده است و سالانه حدود ۳ میلیون نفر در دنیا بر اثر این آلودگی جان خود را از دست می‌دهند (IPCC). گازهای گلخانه‌ای عمدتاً شامل دی‌اکسیدکربن، نیتروژن، بخار آب و متان است که از این میان دی‌اکسیدکربن بیشترین تأثیر را بر آلودگی هوا دارد، لذا یافتن راه‌هایی برای کاهش تولید این گازها امری بسیار مهم است. کاهش گازهای گلخانه‌ای از طریق کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، استفاده از زغال سنگ‌های گیاهی و در نهایت جذب و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن حاصل از احتراق امکان پذیر است (Aniruddha, et al. 2020; Aslannezhad, et al. 2024; Ben-Mansour, et al. 2020). (Ritchie, et al. 2020; IPCC; D'Alessandro and McDonald 2010; 2016; عموقین, et al. 1389; مالکی and مطهری ۱۳۹۸) از سال ۱۹۹۰ میلادی تولید هیدروژن پاک به عنوان یک روش برای جلوگیری از تولید دی‌اکسیدکربن مورد بررسی قرار گرفته است (Pistidda 2021).

هیدروژن به عنوان ماده اولیه برای بسیاری از صنایع نظیر تولید آمونیاک، متانول، پالایش نفت و... کاربرد دارد (Levin and Chahine 2010; Rambhujun, et al. 2020). کشورهای چین، ایالات متحده، اتحادیه اروپا، هند، ژاپن و کره جنوبی متقاضی هیدروژن هستند و کشورهای دیگر نظیر شیلی، مراکش صادرکننده هیدروژن می‌باشند. کشورهای استرالیا، عمان، عربستان سعودی و امارات متحده عربی که صادرکننده سوخت‌های فسیلی هستند در حال بررسی روش‌های استفاده از هیدروژن هستند. هیدروژن را می‌توان از سوخت‌های فسیلی، زیست توده، انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی هسته‌ای و... بدست آورد. هیدروژن‌های تولیدی با توجه به فرایند تولیدی آنها به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شود و با رنگ‌بندی‌های مختلف نشان می‌دهند. هیدروژن کم‌کربن را هیدروژن آبی می‌گویند. هیدروژن آبی نوعی هیدروژن است که از گاز طبیعی از طریق فرآیندی به نام اصلاح متان بخار تولید می‌شود. در طی این فرایند، گاز طبیعی (بیشتر متان) با بخار واکنش می‌دهد و گاز هیدروژن و دی‌اکسید کربن تولید می‌کند. اصطلاح "آبی" به این واقعیت اشاره دارد که CO₂ تولید شده در طول این فرایند جذب و ذخیره می‌شود و از انتشار آن در جو جلوگیری می‌کند. جذب CO₂ نقش مهمی در تولید هیدروژن آبی با جذب و جداسازی CO₂ از جریان هیدروژن ایفا می‌کند. تولید هیدروژن آبی یک روش برای جلوگیری از تولید دی‌اکسیدکربن به شمار می‌آید (Jung, et al. 2024; Massarweh, et al. 2023; Matus, et al. 2023; Yang, et al. 2019).

جذب و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن را می‌توان به چهار روش انجام داد: ۱- جذب دی‌اکسیدکربن پس از احتراق، ۲- جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن پیش از احتراق، ۳- جذب دی‌اکسیدکربن پس از احتراق سوخت با اکسیژن خالص و ۴- جداسازی دی‌اکسیدکربن با فرایند حلقه‌های شیمیایی. دی‌اکسیدکربن حاصل از فرایندهای پس از احتراق را می‌توان با روش‌های جذب سطحی، جذب با استفاده از حلال‌ها، جذب با روش برودتی و جذب با استفاده از غشا، جداسازی کرد (Abanades, et al. 2015; Carpenter and Long III 2017; Cuéllar-Franca and Azapagic 2015; Jansen, et al. 2015; Liang, et al. 2015; Madejski, et al. 2016; Raganati, et al. 2021; Salvinder, et al. 2019; Sreedhar, et al. 2017; Theo, et al. 2022).

از بین روش‌های ذکر شده، جذب دی‌اکسیدکربن پس از احتراق به دلیل این که روی تجهیزات و امکانات موجود در صنعت قابل پیاده‌سازی است نسبت به روش‌های دیگر ارجحیت دارد. این روش نیازی به تغییرات کلی در فرایندها ندارد و با اضافه کردن ادوات در پایان فرایند که معمولاً دودکش‌ها قرار دارند می‌توان جذب و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن را انجام داد. جذب سطحی

در فرایند جذب دی‌اکسیدکربن بسیار امیدوار کننده‌تر نسبت به سایر روش‌ها است. از جاذب‌های مختلفی برای جذب گاز استفاده می‌شود و می‌توان با تغییر در پارامترهای نظیر دما، میزان جریان گاز و غلظت گاز، بسترهای مختلفی را طراحی و ارزیابی کرد. مواد مختلفی براساس نوع و اندازه حفرات برای جذب کردن دی‌اکسیدکربن وجود دارد که می‌توان به هیدروتالسیت‌ها^۱، مواد متخلخل میکروپور^۲ و مزوپور^۳ مثل زئولیت‌ها، مواد پایه کربنی، چارچوب‌های فلزی-آلی^۴ و پلیمرهای آلی متخلخل^۵ اشاره کرد (Ben-Mansour, et al. 2016; Panda, et al. 2023; Seong, et al. 2024). از میان جاذب‌های گفته شده، پلیمرهای آلی متخلخل (POPs) یک دسته از مواد شبکه‌ای متخلخل چند بعدی هستند که از طریق پیوندهای کووالانسی قوی بین بلوک‌های ساختمانی آلی مختلف با هندسه و توپولوژی‌های مختلف ساخته می‌شوند و اخیراً به یک زمینه تحقیقاتی رو به رشد در مواد متخلخل تبدیل شده‌اند. POPها را می‌توان به طور کلی به دو دسته شامل آمورف (به عنوان مثال، پلیمرهای با پیوند بیش از حد متقاطع^۶، پلیمرهای میکرو متخلخل مزدوج^۷، پلیمرهای میکرو متخلخل ذاتی^۸، چارچوب‌های آروماتیک متخلخل^۹ و کریستالی (به عنوان مثال، چارچوب‌های آلی کووالانسی^{۱۰}) تقسیم کرد. POPها با توجه به مزایایی همچون وزن کم، تخلخل ذاتی بالا، پایداری عالی، ساختارها و عملکردهای از پیش طراحی شده و قابل تنظیم، توجه و علاقه تحقیقاتی زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این مواد کاربردهای فوق‌العاده‌ای در ذخیره/جداسازی گاز، به عنوان کاتالیست ناهمگن، تبدیل فوتوالکتریک، سنجش شیمیایی و زیستی، ذخیره و تبدیل انرژی و غیره را دارند. ساختار متخلخل، اندازه منافذ و سطوح این ساختار را می‌توان با تغییر در واحد‌های سازنده آنها برای کاربردی خاص طراحی و تنظیم کرد (Abuzeid, et al. 2021; Dalapati, et al. 2013; Diaz de Grenu, et al. 2021; Geng, et al. 2020; Guan, et al. 2020; Huang, et al. 2021; Kuhn, et al. 2008; Lohse and Bein 2018; Osadchii, et al. 2017; Uribe-Romo, et al. 2009; Wang, et al. 2020; Xiao, et al. 2021; Zhu, et al. 2016). روش‌های متداول سنتز POPها عبارتند از: سنتز یونوترمال، سولوترمال، سنتز به وسیله ماکرو ویو، سنتز در دمای اتاق، سنتز به وسیله اسپری درایر (Diaz, et al. 2021; Abuzeid, et al. 2021; de Grenu, et al. 2021; Suryanarayana 2001; Troyano, et al. 2020). انواع مختلفی از روش‌های آزمایش جذب دی‌اکسیدکربن با جاذب‌های جامد وجود دارد، از جمله روش وزن سنجی (Jin, et al. 2011)، روش حجمی (Karimi, et al. 2021; Khalili, et al. 2015)، روش جذب نوسان دما (Ben-Mansour and Qasem 2018)، روش جذب نوسان فشار (Siqueira, et al. 2017)، روش منحنی پیشرفت (Boonchuay and Worathanakul 2022) و... اشاره کرد.

^۱ Hydrotalcite

^۲ microporous

^۳ mesoporous

^۴ Metal organic framework

^۵ porous organic polymers

^۶ hyper-cross-linked polymers (HCPs)

^۷ conjugated microporous polymers (CMPs)

^۸ polymers of intrinsic micro porosity (PIMs)

^۹ porous aromatic frameworks (PAFs)

^{۱۰} covalent organic frameworks (COFs)

تا به امروز پلیمرهای آلی متخلخل متنوعی سنتز شده است و تحقیقات متنوعی در مورد جذب دی‌اکسیدکربن توسط این چارچوب‌ها به انجام رسیده است که نتایج امیدوارکننده‌ای را از خود نشان داده‌اند. در ادامه چند مورد از نتایج حاصل از این تحقیقات ارائه می‌شود.

باغی و همکاران در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ چارچوب‌های COF-1، COF-5، COF-6، COF-8، COF-10، COF-102 و COF-103 را سنتز و جذب دی‌اکسیدکربن آنها را بررسی کردند که COF-102 و COF-103 بهترین عملکرد را برای جذب دی‌اکسیدکربن در پی داشت (Cote, et al. 2005; Cote, et al. 2007; Furukawa and Yaghi 2009). سال ۲۰۱۴ توسط پی لی^۱ چارچوب آلی کووالانسی بر پایه آزین ایجاد شد و مورد بررسی قرار گرفت و مقدار جذب دی‌اکسیدکربن (در دمای ۲۷۳ کلوین و فشار ۱ بار) ۱۷۷ میلی گرم بر هر گرم جاذب بدست آمد (Li, et al. 2014). سال ۲۰۱۹ وانگ^۲ و همکاران چارچوب‌های مبتنی بر تریازین با سایت‌های نیتروژن، که جذب دی‌اکسیدکربن را افزایش می‌دهد، سنتز کردند (Wang, et al. 2019). سال ۲۰۲۰ توسط پوتیاراج^۳ و همکاران TPA-TCIF را بر مبنای ایمین سنتز کردند و مقدار جذب دی‌اکسیدکربن (در دمای ۲۷۳ کلوین و فشار ۱ بار) ۷۷/۳ میلی گرم بر هر گرم جاذب بدست آوردند (Puthiaraj, et al. 2020). POP‌های آمورف نسبت به نوع کریستالی آنها از شرایط سنتز راحتی برخوردارند و برای صنعتی شدن مناسب تر هستند. به طور مثال چند مورد از این ساختارهای آمورف POP ها در اینجا آورده شده. در سال ۲۰۱۱ تنگ بن و همکاران نوعی از چارچوب‌های آروماتیک متخلخل مخفف PAF را سنتز کردند. میزان جذب دی‌اکسیدکربن را برای این ساختارها در دمای محیط و فشار ۱ بار و دمای ۲۷۳ کلوین ۸۰ میلی گرم به ازای هر گرم جاذب برای PAF-3 و ۵۰ میلی گرم به ازای هر گرم جاذب برای PAF-4 گزارش کردند. این مواد پایداری خوبی در اکثر حلال‌ها نظیر DMF و استون و الکل‌ها دارند (Ben, et al. 2011). سال ۲۰۲۱ امین ابید و همکاران POP‌های در دسته ای پلیمرها با پیوند بیش از حد متقاطع سنتز کردند و نام این ماده را HCP-PN گذاشتند. میزان جذب دی‌اکسیدکربن این ساختار را در دمای ۲۷۳ کلوین تقریباً برابر ۷۲ میلی گرم به ازای هر گرم جاذب و در دمای ۲۹۸ کلوین تقریباً برابر ۵۷ میلی گرم به ازای هر گرم جاذب بدست آوردند (Abid, et al. 2021).

در این کار ما ابتدا POP آمورف به نام AM-POP را سنتز خواهیم کرد و آنالیزهای FT-IR و BET را برای تعیین گروه‌های عاملی و اندازه حفرات و سطح ساختار می‌گیریم. سپس میزان جذب دی‌اکسیدکربن این ساختار را بررسی می‌کنیم.

¹ Li

² Wang

³ Puthiaraj

روش کار:

مواد:

ملامین (۲۵۲ میلی گرم)، حلال دی متیل سولفکساید (۱۵ میلی گرم)، تری اتیل آمین (۱۵ میلی لیتر)، ترفتالویل کلراید (۶۰۹ میلی گرم)، متانول (۶۰ میلی گرم) همگی مواد از شرکت مرک آلمان تهیه شده اند.

تجهیزات:

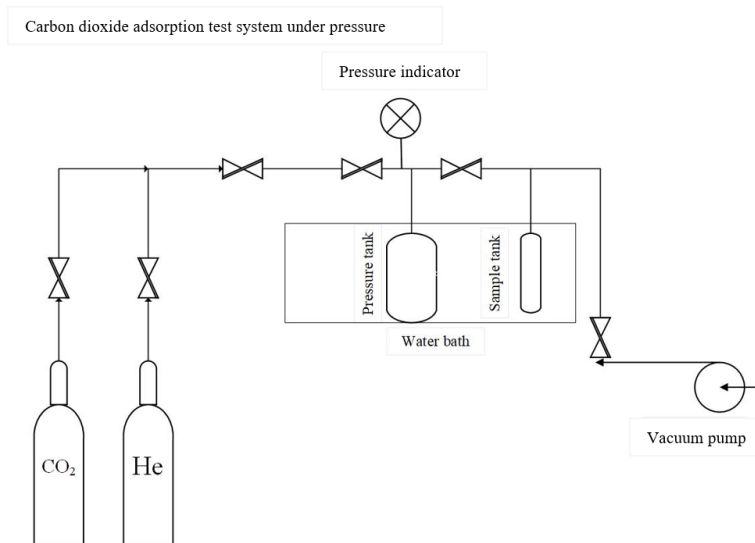
بالن ته گرد ۱۰۰ میلی لیتری، استیرر و هیتر، حمام روغن، کندانسور، ترازو، بشر، سانتریفیوژ، پیپت ۱۰ میلی لیتر، پوار، دستگاه های مورد استفاده برای شناسایی ساختاری جاذب های سنتز شده شامل دستگاه الکترونی روبشی (SEM) (PHILIPS XL 30)، دستگاه اندازه گیری جذب و واجذب نیتروژن (BET) (Belsorp- mini II)، دستگاه طیفسنج زیرقرمز تبدیل فوری (FTIR) (Tensor 27 ساخت شرکت Bruker کشور آلمان) است.

سنتز AM-POP:

مقدار ۱۵ سی سی دی متیل سولفکساید داخل بالن ریخته شد و نیم میلی لیتر تری اتانول آمین اضافه کردیم و ۲۵۲ میلی گرم و در آخر ۶۰۹ میلی گرم ترفتالیک کلراید اضافه شد بعد محلول حدود ۲۰ دقیقه توسط همزن مغناطیسی همزده شد و کاملاً یکنواخت شد. بعد از ترکیب مواد و یکنواخت شدن محلول در سیستم رفلکس قرار داده شد. حمام روغن روی استیرر با دما ۱۹۰ درجه سانتیگراد تنظیم گردید و به مدت ۶ ساعت سنتز انجام شد. بعد از آن نمونه سه مرتبه با متانول شسته شد و با سانتریفیوژ جداسازی شد. سرعت و زمان سانتریفیوژ به ترتیب ۵۰۰۰ دور بر دقیقه و ۵ دقیقه تنظیم شد. بعد از آن پودر جمع آوری شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط خشک شد.

تست جذب دی اکسید کربن:

آزمایش جذب دی اکسید کربن با POP سنتز شده با استفاده از روش حجم سنجی انجام شد. شکل (۱) شماتیکی از سیستم حجم سنجی را نشان می دهد. شامل دو سلول از جنس فولاد ضد زنگ (سلول تحت فشار و سلول نمونه)، چند عدد شیرسوزنی و دو عدد فشارسنج با دقت ۰/۰۱ بار است. حجم سلول تحت فشار و نمونه به ترتیب ۱۴۴ و ۳۰ میلی لیتر می باشد. به منظور ثابت نگهداشتن دما در طی آزمایشات جذب، سلول تحت فشار و سلول نمونه در حمام ترمواستاتیکی با سیستم چرخشی آب قرار داده شد. به علاوه قبل از شروع آزمایش جذب، تست نشتی با گاز هلیوم در فشار ۱۶ بار از سیستم گرفته شد. قبل از هر آزمایش جذب، سلول جذب تمیز گردید و یک گرم از جاذب در سلول نمونه قرار داده شد. سیستم به مدت ۲ ساعت با پمپ خلا در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد گاز زدایی شد. آزمایشات جذب در فشار در محدوده ۱۶-۰ بار در دمای محیط انجام شد. برای تعیین حجم مرده کل سیستم جذب گاز، از گاز هلیوم استفاده شد. مقدار کلی دی اکسید کربن جذب شده با اندازه گیری حجم سلول نمونه، فشار دی اکسید کربن قبل و بعد از جذب و با اندازه گیری دمای سیستم به دست آمد.



شکل ۱ شماتیک سیستم حجم سنجی برای جذب دی‌اکسید کربن

نتایج و بحث:

پلیمر آلی متخلخل آمورف AM-POP از تراکم ترفتالویل کلراید و ملامین تحت شرایط رفلکس سنتز شد. این ساختار را می‌توان از روش‌های نظیر ماکروبیوو و مکانیکی نیز سنتز کرد (Sarma, et al. 2021). شکل (۲) شماتیک سنتز AM-POP را نشان می‌دهد.

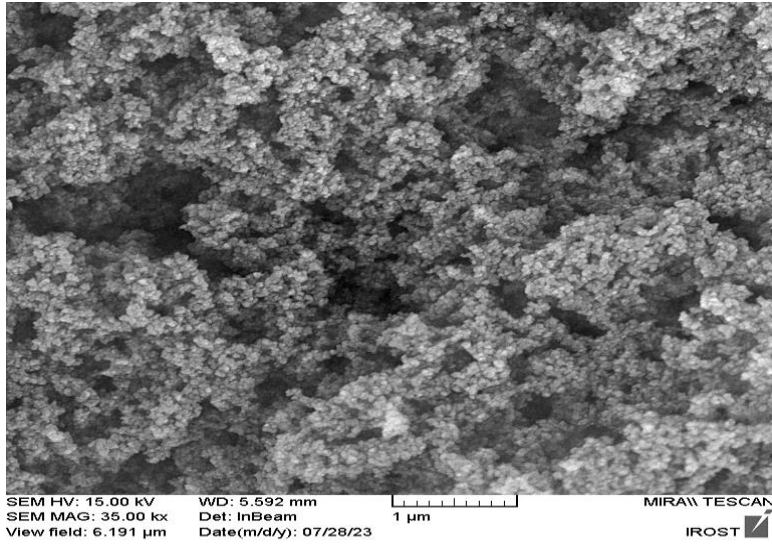


شکل ۲ شماتیک سنتز AM-POP

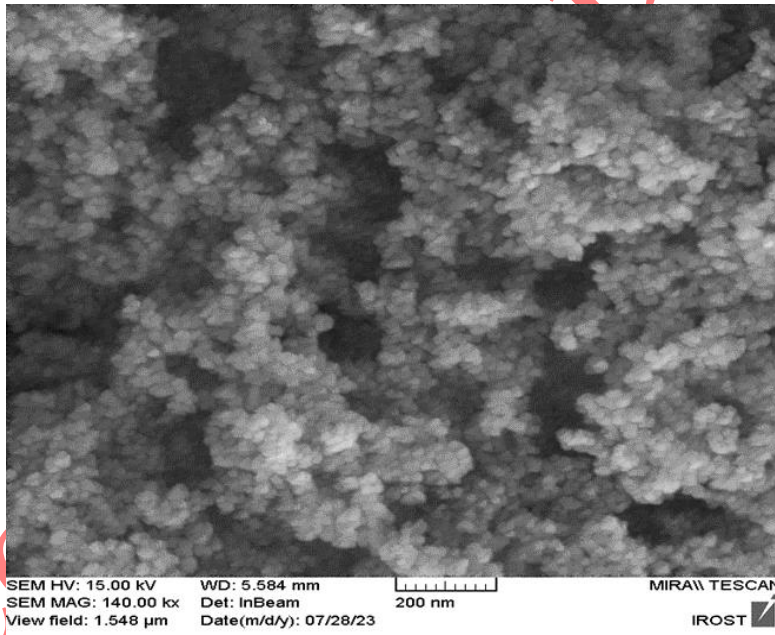
نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی:

ریخت شناسی سطح جاذب‌های سنتز شده با روش میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. در تصویر SEM نمونه AM-POP (شکل ۳) مشاهده می‌شود. SEM با بزرگ‌نمایی ۳۵k و ۱۴۰k گرفته شده. مورفولوژی آمورف و شبه‌کرولی ذرات را نشان می‌دهد.

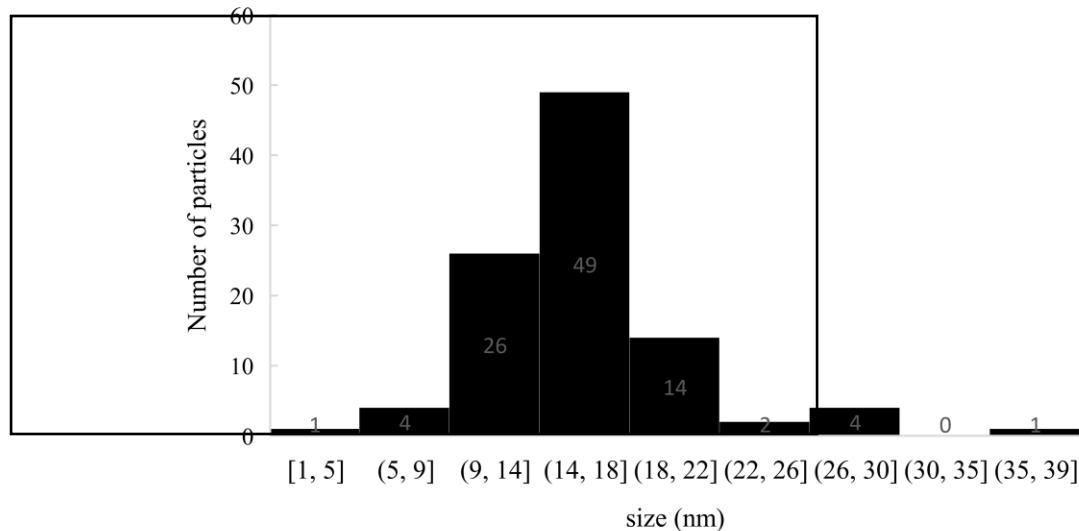
A



B



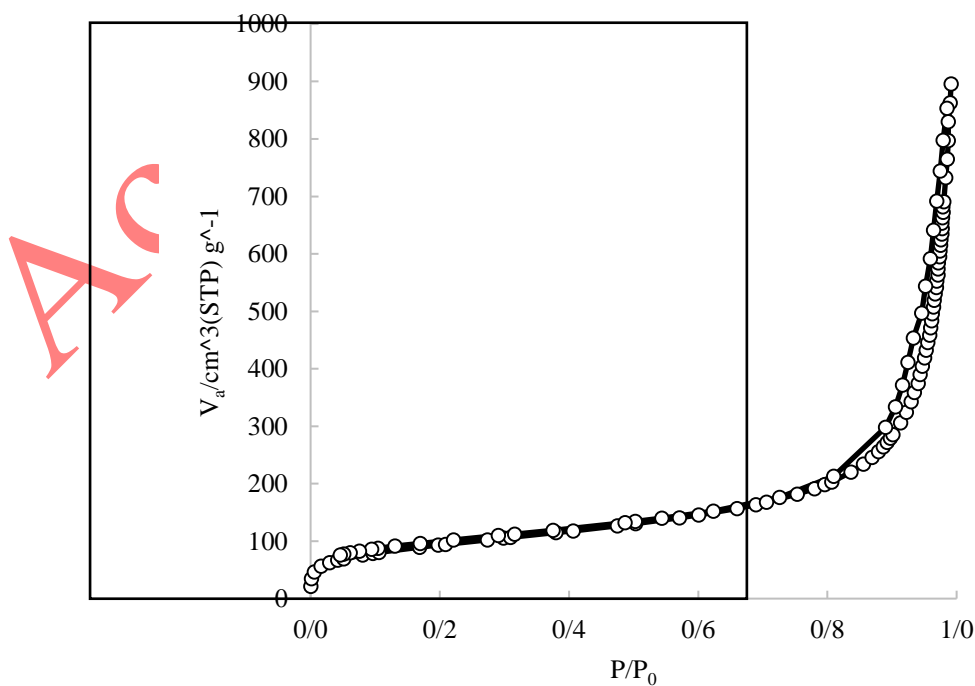
شکل ۳ تصویر SEM گرفته شده از AM-POP (A) تصویر با بزرگ نمایی ۳۵k و (B) تصویر با بزرگ نمایی ۱۴۰k
شکل (۴) هیستوگرام اندازه ذرات را نشان می دهد که اغلب اندازه ذرات سنتز شده در محدوده ۱۴ تا ۱۸ نانومتر می باشند.



شکل ۴ نمودار اندازه ذرات AM-POP

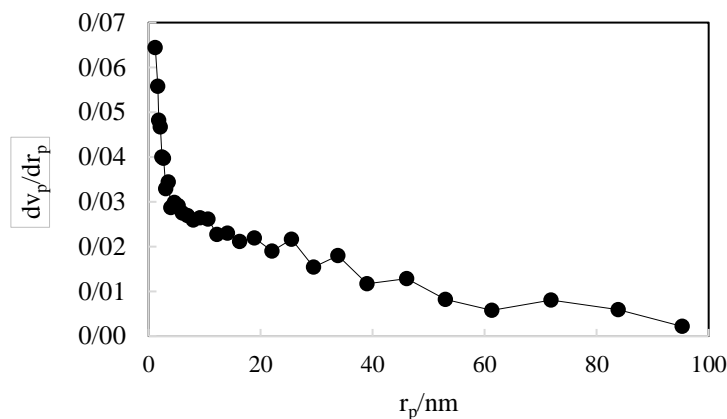
بررسی آزمایش جذب و واجذب نیتروژن:

از POP سنتز شده تست BET گرفته شد. همانطور که در شکل (۵) می بینید ایزوترم جذب و دفع نیتروژن از نوع چهار می باشد. که این نوع از ایزوترم نشان دهنده این است که در فشارهای پایین تشکیل مونو لایه روی سطح جاذب وجود دارد و جاذب سنتز شده در دسته مزوپروس ها قرار دارد (Andala, et al. 2009). میانگین اندازه حفرات ۱۵ نانومتر و مساحت سطح جاذب برابر ۳۳۹ متر مربع می باشد.



شکل ۵ ایزوترم جذب و واجذب گاز نیتروژن AM-POP

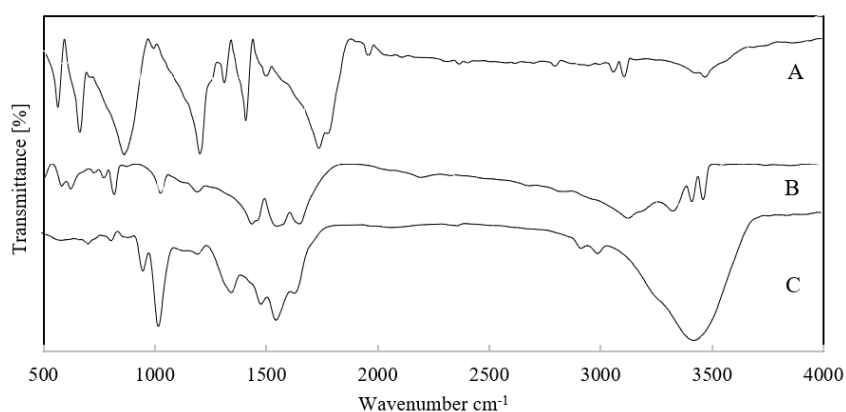
شکل (۶) نمودار BJH نمونه AM-POP را نشان می‌دهد که میانگین اندازه حفرات ۲,۱ نانومتر است.



شکل ۶ نمودار BJH نمونه AM-POP

نتایج طیف سنج زیر قرمز تبدیل فوریه :

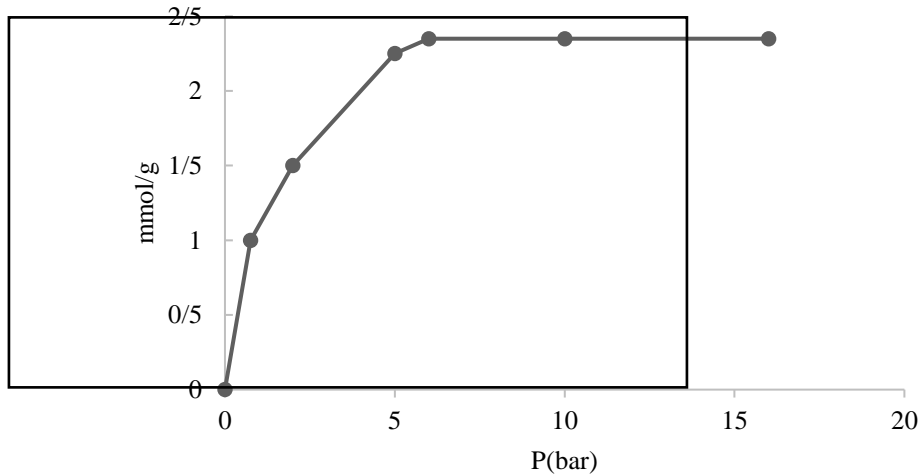
شکل (۷) طیف FTIR به ترتیب ترفتالویل کلراید، ملامین و AM-POP سنتز شده را نشان می‌دهد. در نمودار طیف ترفتالوید کلراید پیک های ناحیه $3100-3000\text{ cm}^{-1}$ مربوط به C-H های آروماتیک است پیک های ناحیه $1800-1770\text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروه های کربونیل می باشد. در نمودار طیف ملامین پیک های ناحیه 3600 cm^{-1} مربوط به گروه NH_2 پیک های ناحیه 1600 مربوط به حلقه های تری آزین می باشد. با بررسی پیک های آنالیز و مقایسه آنالیز FT-IR مواد تشکیل دهنده ساختار و گروه های عاملی آنها این ماده به درستی سنتز شده که پیک های آمیدی در ناحیه 3200 cm^{-1} تا 3500 cm^{-1} تشکیل شده اند و پیک های کربونیل آمیدی در ناحیه 1600 cm^{-1} تا 1870 cm^{-1} مشخص شده اند (Dai, et al. 2013; Umar and Abdalla 2015; Zhu and Xu 2018).



شکل ۷ طیف FTIR (A) ترفتالویل کلراید، (B) ملامین و (C) AM-POP سنتز شده

نتیجه تست جذب دی‌اکسیدکربن:

شکل (۸) منحنی هم‌دمای جذب سطحی دی‌اکسیدکربن بر حسب میلی‌مول گاز جذب شده به ازای هر گرم جاذب، بر روی POP سنتز شده را نشان می‌دهد. این منحنی در فشار گاز دی‌اکسیدکربن ۰ تا ۱۶ بار در دمای ۲۹۸ کلوین و پس از گذشت ۵ دقیقه به دست آمد.



شکل ۸ منحنی هم‌دمای جذب سطحی دی‌اکسیدکربن AM-POP

نتیجه گیری:

در این مطالعه پلیمر آلی متخلخل AM-POP به منظور جذب دی‌اکسیدکربن سنتز شده است. بر اساس نتایج، این ساختار متخلخل سنتز شده در دسته مزوپروس ها قرار می‌گیرد و برای جذب دی‌اکسیدکربن مناسب است. در این کار ابتدا POP آمورف را سنتز شد و پس از مشخصه یابی با آنالیزهای گوناگون، میزان جذب دی‌اکسیدکربن به روش حجم سنجی در فشار ۱۶ بار و دمای محیط اندازه گیری شد. POP سنتز شده در دسته آمورف قرار دارد و روش سنتز راحتی نسبت به نوع کریستالی آنها دارد که برای صنعتی شدن گزینه مناسبتری می‌باشد. متوسط اندازه حفرات ۱۵ نانومتر و مساحت سطح جاذب برابر ۳۳۹ متر مربع می‌باشد. اندازه ذرات سنتز شده در محدوده ۱۴ تا ۱۸ نانومتر می‌باشند. بیشترین مقدار جذب دی‌اکسیدکربن این ماده برابر ۲,۳ میلی‌مول به ازای هر گرم جاذب بدست آمده است.

مراجع:

Abanades, JC, et al.

۲۰۱۵ Emerging CO2 capture systems. International Journal of Greenhouse Gas Control 40:126-166.

Abid, Amin, et al.

- ٢٠٢١ Eco-Friendly Phosphorus and Nitrogen-Rich Inorganic–Organic Hybrid Hypercross-linked Porous Polymers via a Low-Cost Strategy. *Macromolecules* 54(12):5848-5855.
Abuzeid, Hesham R, Ahmed FM EL-Mahdy, and Shiao-Wei Kuo
- ٢٠٢١ Covalent organic frameworks: Design principles, synthetic strategies, and diverse applications. *Giant* 6:100054.
Andala, Dickson, et al.
- ٢٠٠٩ Photocatalytic Synthesis of Au Nanoparticles Supported On TiO₂ Nanofibers: Electrospinning and Photocatalysis.
Aniruddha, R, I Sreedhar, and Benjaram M Reddy
- ٢٠٢٠ MOFs in carbon capture–past, present and future. *Journal of CO₂ Utilization* 42:101297.
Aslannezhad, Masoud, et al.
- ٢٠٢٤ Identification of early opportunities for simultaneous H₂ separation and CO₂ storage using depleted coal seams. *Separation and Purification Technology* 330:125364.
Ben-Mansour, R, et al.
- ٢٠١٦ Carbon capture by physical adsorption: materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations—a review. *Applied Energy* 161:225-255.
Ben-Mansour, Rached, and Naef AA Qasem
- ٢٠١٨ An efficient temperature swing adsorption (TSA) process for separating CO₂ from CO₂/N₂ mixture using Mg-MOF-74. *Energy Conversion and Management* 156:10-24.
Ben, Teng, et al.
- ٢٠١١ Gas storage in porous aromatic frameworks (PAFs). *Energy & Environmental Science* 4(10):3991-3999.
Boonchuay, Arunaporn, and Patcharin Worathanakul
- ٢٠٢٢ The diffusion behavior of CO₂ adsorption from a CO₂/N₂ gas mixture on zeolite 5A in a fixed-bed column. *Atmosphere* 13(4):513.
Carpenter, Steven M, and Henry A Long III
- ٢٠١٧ Integration of carbon capture in IGCC systems. *In Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies*. Pp. 445-463: Elsevier.
Cote, Adrien P, et al.
- ٢٠٠٥ Porous, crystalline, covalent organic frameworks. *science* 310(5751):1166-1170.
Cote, Adrien P, et al.
- ٢٠٠٧ Reticular synthesis of microporous and mesoporous 2D covalent organic frameworks. *Journal of the American Chemical Society* 129(43):12914-12915.
Cuéllar-Franca, Rosa M, and Adisa Azapagic
- ٢٠١٥ Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO₂ utilization* 9:82-102.
D'Alessandro, Deanna M, and Thomas McDonald
- ٢٠١٠ Toward carbon dioxide capture using nanoporous materials. *Pure and Applied Chemistry* 83(1):57-66.
Dai, Hongzhe, et al.
- ٢٠١٣ Synthesis and characterization of graphitic carbon nitride sub-microspheres using microwave method under mild condition. *Diamond and Related Materials* 38:109-117.
Dalapati, Sasanka, et al.

۲۰۱۳ An azine-linked covalent organic framework. *Journal of the American Chemical Society* 135(46):17310-17313.

Diaz de Grenu, Borja, et al.

۲۰۲۱ Microwave-assisted synthesis of covalent organic frameworks: A review. *ChemSusChem* 14(1):208-233.

Furukawa, Hiroyasu, and Omar M Yaghi

۲۰۰۹ Storage of hydrogen, methane, and carbon dioxide in highly porous covalent organic frameworks for clean energy applications. *Journal of the American Chemical Society* 131(25):8875-8883.

Geng, Keyu, et al.

۲۰۲۰ Covalent organic frameworks: design, synthesis, and functions. *Chemical Reviews* 120(16):8814-8933.

Guan, Qun, et al.

۲۰۲۰ Nanoscale covalent organic frameworks as theranostic platforms for oncotherapy: synthesis, functionalization, and applications. *Nanoscale Advances* 2(9):3656-3733.

Huang, Jing, et al.

۲۰۲۱ Functionalization of covalent organic frameworks by metal modification: Construction, properties and applications. *Chemical Engineering Journal* 404:127136.

IPCC, 2023

Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Jansen, Daniel, et al.

۲۰۱۵ Pre-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40:167-187.

Jin, Yusung, et al.

۲۰۱۱ Gravimetric analysis of CO₂ adsorption on activated carbon at various pressures and temperatures using piezoelectric microcantilevers. *Analytical chemistry* 83(18):7194-7197.

Jung, JongYeon, Yutaek Seo, and Colin D. Wood

۲۰۲۴ Application of amine infused hydrogels (AIHs) for selective capture of CO₂ from H₂/CO₂ and N₂/CO₂ gas mixture. *Chemical Engineering Science* 288:119799.

Karimi, Mohsen, Alirio E Rodrigues, and Jose AC Silva

۲۰۲۱ Designing a simple volumetric apparatus for measuring gas adsorption equilibria and kinetics of sorption. Application and validation for CO₂, CH₄ and N₂ adsorption in binder-free beads of 4A zeolite. *Chemical Engineering Journal* 425:130538.

Khalili, S, B Khoshandam, and M Jahanshahi

۲۰۱۵ Optimization of production conditions for synthesis of chemically activated carbon produced from pine cone using response surface methodology for CO₂ adsorption. *RSC Advances* 5(114):94115-94129.

Kuhn, Pierre, Markus Antonietti, and Arne Thomas

۲۰۰۸ Porous, covalent triazine-based frameworks prepared by ionothermal synthesis. *Angewandte Chemie International Edition* 47(18):3450-3453.

Levin, David B., and Richard Chahine

۲۰۱۰ Challenges for renewable hydrogen production from biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*. ۴۹۶۹-۴۹۶۲:(۱۰)۳۵

Li, Zhongping, et al.

2014 A 2D azine-linked covalent organic framework for gas storage applications. *Chemical Communications* 50(89):13825-13828.

Liang, Zhiwu Henry, et al.

2010 Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40:26-54.

Lohse, Maria S, and Thomas Bein

2018 Covalent organic frameworks: structures, synthesis, and applications. *Advanced Functional Materials* 28(33).1700003:

Madejski, Paweł, et al.

2022 Methods and techniques for CO₂ capture: Review of potential solutions and applications in modern energy technologies. *Energies* 15(3):887.

Massarweh, Osama, et al.

2023 Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility. *Journal of CO₂ Utilization* 70:102438.

Matus, EV, et al.

2023 Hydrogen Production from Methane with CO₂ Utilization over Exsolution Derived Bimetallic NiCu/CeO₂ Catalysts. *Catalysis Letters*:1-14.

Osadchii, Dmitrii Yu, et al.

2017 Revisiting nitrogen species in covalent triazine frameworks. *Langmuir* 33(50):14278-14285.

Panda, Prasanta Kumar, Benudhar Sahoo, and Seeram Ramakrishna

2023 Hydrogen production, purification, storage, transportation, and their applications: a review. *Energy Technology* 11(7):2201434.

Pistidda, Claudio

2021 Solid-state hydrogen storage for a decarbonized society. *Hydrogen* 2(4):428-443.

Puthiaraj, Pillaiyar, et al.

2020 Triphenylamine-based covalent imine framework for CO₂ capture and catalytic conversion into cyclic carbonates. *Microporous and Mesoporous Materials* 297:110011.

Raganati, Federica, Francesco Miccio, and Paola Ammendola

2021 Adsorption of carbon dioxide for post-combustion capture: A review. *energy & fuels* 35(16):12121-12130

Rambhujun, Nigel, et al.

2020 Renewable hydrogen for the chemical industry. *MRS Energy & Sustainability* 7(1):33.

Ritchie, Hannah, Max Roser, and Pablo Rosado

2020 CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our world in data*.

Salvinder, KMS, et al.

2019 An overview on control strategies for CO₂ capture using absorption/stripping system. *Chemical Engineering Research and Design* 147:319-337.

Sarma, Parishmita, et al.

2021 A readily accessible porous organic polymer facilitates high-yielding Knoevenagel condensation at room temperature both in water and under solvent-free mechanochemical conditions. *Catalysis Communications* 154:106304.

Seong, Gimyeong, et al.

٢٠٢٤ Effect of Exposed Facets and Oxidation State of CeO₂ Nanoparticles on CO₂ Adsorption and Desorption. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 12(19):7532-7540.

Siqueira, Rafael M, et al.

٢٠١٧ Carbon dioxide capture by pressure swing adsorption. *Energy Procedia* 114:2182-2192.

Sreedhar, Inkollu, et al.

٢٠١٧ Carbon capture by absorption–Path covered and ahead. *Renewable and sustainable energy reviews* 76:1080-1107.

Suryanarayana, Cury

٢٠٠١ Mechanical alloying and milling. *Progress in materials science* 46(1-2):1-184.

Theo, Wai Lip, et al.

٢٠١٦ Review of pre-combustion capture and ionic liquid in carbon capture and storage. *Applied energy* 183:1633-1663.

Troyano, Javier, et al.

٢٠٢٠ Spray-drying synthesis of MOFs, COFs, and related composites. *Accounts of chemical research* 53(6):1206-1217.

Umar, Yunusa, and Sahar Abdalla

٢٠١٥ Experimental FTIR and Theoretical Investigation of the Molecular Structure and Vibrational Spectra of Terephthaloyl Chloride by Density Functional Theory. *IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC)* 8(9):26-34.

Uribe-Romo, Fernando J, et al.

٢٠٠٩ A crystalline imine-linked 3-D porous covalent organic framework. *Journal of the American Chemical Society* 131(13):4570-4571.

Wang, Guangbo, et al.

٢٠١٩ Novel hexaazatriphthalene-based covalent triazine frameworks as high-performance platforms for efficient carbon capture and storage. *Microporous and Mesoporous Materials* 290:109650.

Wang, Tian-Xiong, et al.

٢٠٢٠ Emerging applications of porous organic polymers in visible-light photocatalysis. *Journal of materials chemistry A* 8(15):7003-7034.

Xiao, Jing, et al.

٢٠٢٢ Synthesis strategies of covalent organic frameworks: An overview from nonconventional heating methods and reaction media. *Green Energy & Environment*.

Yang, Meng, et al.

٢٠١٩ Recent Advances in CO₂ Adsorption from Air: a Review. *Current Pollution Reports* 5(4):272.٢٩٣-

Zhu, Heng, and Shi-ai Xu

٢٠١٨ Preparation and fire behavior of rigid polyurethane foams synthesized from modified urea–melamine–formaldehyde resins. *RSC advances* 8(32):17879-17887.

Zhu, Xiang, et al.

٢٠١٦ In situ doping strategy for the preparation of conjugated triazine frameworks displaying efficient CO₂ capture performance. *Journal of the American Chemical Society* 138(36):11497-11500.

عبدادي عموقين, أبتين , et al.

۱۳۸۹ ABS/PEG جداسازی دی اکسیدکربن/ نیترژن با استفاده از غشای آلیاژی
کاظم مطهری and مالکی, نیما,

عملکرد جذب دی اکسید کربن در محلول پی زایلین دی آمین: اندازه گیری آزمایشگاهی و ۱۳۹۸
مدل سازی با استفاده از تئوری پاسخ سطح پژوهش نفت ۱۳۵:۲۹-۱۴۵.

Fabrication and performance evaluation of amorphous porous organic polymers for carbon dioxide adsorption process to produce blue hydrogen

Abstract:

Excessive consumption of fossil fuels has caused serious concerns about the increase in greenhouse gas production and as a result air pollution as well as climate change. One new way to stop carbon dioxide from being produced is to produce blue hydrogen. Porous organic polymers have garnered a lot of attention as potential adsorbents for carbon dioxide gas adsorption because of their thermal and chemical stability. Therefore, in this study, amide porous organic polymer (AM-POP) was synthesized from melamine, terephthaloyl chloride in dimethyl sulfoxide solvent under reflux conditions for 6 hours and identified by SEM, FTIR and BET methods. The average size of the holes is 15 nm and the surface area of the adsorber is 339 m². The size of the particles taken is in the range of 14 to 18 nm, the carbon dioxide adsorption capacity on the synthesized nanostructure was determined at 16 bar of pressure and 298 K of temperature. The results obtained indicate that this structure has an adsorption capacity of 2.3 mmol/g of adsorbent.

Keywords: Porous organic polymer, Melamine, Surface adsorption, Carbon dioxide, Blue hydrogen.