

Synthesis of MOF-5 / Cellulose Aerogel Composite and Investigation of Its Performance in Removing Methylene Blue Dye

Mohammad Shiri¹, Majid Hosseinzadeh^{1*}, Shahrzad Javanshir², Soudeh Shiri³

1- Faculty of Civil Engineering, Department of Environmental Engineering, Iran University of Science and Technology, P. O. Code: 1684613114, Tehran, Iran.

2- Faculty of Chemistry, Department of Chemistry, Iran University of Science and Technology, P. O. Code: 1684613114, Tehran, Iran.

3- Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box. 16765-654, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10- 03- 2024

Accepted: 01- 07-2024

Available online: 14-10-2024

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI: 10.30509/JSCW.2024.167288.1188

Keywords:

MOF-5/ cellulose aerogel composite

Pampas

Wastewater treatments

Adsorption capacity

Methylene blue dye

ABSTRACT

Metal-organic framework (MOF) aerogels are porous materials with unique characteristics such as tunability, high surface area, chemical stability, and high mechanical strength, making them among the leading adsorbents in pollutant adsorption and identification. One of the fundamental challenges with these structures during the adsorption process is their separation at the end of the adsorption process due to their powdery nature. To address this issue, this study used aerogels and their composites with synthesized metal-organic framework (MOF). In this research, a composite of MOF-5/cellulose aerogel was fabricated using cellulose extracted from the cotton plant, and its effectiveness in removing an organic dye (methylene blue) from aqueous environments was investigated. Characterization was performed using electron microscopy, X-ray diffraction, and IR analysis. The adsorption of the pollutant (methylene blue cationic dye) was measured using a UV-vis spectrophotometer, showing a removal efficiency of 95% at alkaline pH within a 60-minute time frame. The effects of pH, time, and dye concentration were also examined. The reusability of the adsorbent material was demonstrated, with only a 5% reduction in adsorption capacity after three cycles of use.



ساخت کامپوزیت MOF-5/ هواژل سلولزی و بررسی عملکرد آن در حذف ماده رنگزای متیلن بلو

محمد شیری^۱، مجید حسین زاده^{۲*}، شهرزاد جوانشیر^۳، سوده شیری^۴

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، کدپستی: ۱۶۸۴۶۱۳۱۱۴.

۲- دانشیار، دانشکده عمران، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، کدپستی: ۱۶۸۴۶۱۳۱۱۴.

۳- دانشیار، دانشکده شیمی، گروه شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، کدپستی: ۱۶۸۴۶۱۳۱۱۴.

۴- دکتری، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

چکیده

چارچوب‌های فلزی-آلی مواد متخلخل هستند که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند قابلیت اصلاح‌پذیری، مساحت سطح زیاد، پایداری شیمیایی و مقاومت مکانیکی بالا از جمله پیشرفته‌ترین جاذب‌ها در حوزه جذب و شناسایی آلاینده‌ها می‌باشند. یکی از مشکلات اساسی این ساختارها در فرایند جذب، جداسازی آن‌ها در انتهای فرایند جذب به دلیل ساختار پودری شکل آن‌ها می‌باشد. در این مطالعه برای حل این مشکل از هواژل و کامپوزیت ساختن آن با چارچوب فلزی-آلی سنتز شده استفاده شد. در این پژوهش کامپوزیت MOF-5/ هواژل سلولزی با استفاده از سلولز استخراج‌شده از گیاه پامپاس ساخته شد و اثر آن برای حذف ماده رنگزای آلی (متیلن بلو) از محیط‌های آبی بررسی شد. مشخصه یبلو کامپوزیت ساخته شده، به وسیله آنالیزهای تصویر میکروسکوپ الکترونی، پراش اشعه ایکس و IR بررسی گردید. میزان جذب آلاینده (ماده رنگزای کاتیونی متیلن بلو) به وسیله دستگاه UV-vis نشان داد که میزان حذف ماده رنگزای کاتیونی در pH قلیایی مقدار ۹۵ درصد در مدت زمان ۶۰ دقیقه است. همچنین اثر pH، زمان، غلظت مواد رنگزا بررسی گردید. استفاده مجدد از ماده جاذب مشخص نمود که بعد از ۳ بار استفاده تنها ۵ درصد از قدرت جاذب کاسته شد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/JSCW.2024.167288.1188

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت MOF-5/ هواژل سلولزی

پامپاس

تصفیه پساب

ظرفیت جذب

ماده رنگزای متیلن بلو



۱- مقدمه

با توجه به رشد سریع صنایع، آلودگی آب به موضوعی نگران کننده در سراسر جهان تبدیل شده است. بحران آب که توسط آلودگی آب تشدید می شود، تهدید بزرگی برای اقتصاد جهانی به شمار می رود که در تحریک درگیری های مدنی یا بین المللی و اختلال در عملیات و زنجیره تأمین در صنایع ظاهر می شود (۱). سالانه آلاینده های مختلفی از صنایع وارد منابع آب می شوند که در میان آن ها، مواد رنگزا پرکاربرد مانند متیلن بلو (MB) (۲) و اسید بلو (AB) (۳) مهم ترین منابع آلاینده صنعتی هستند که از صنایع مختلفی مانند نساجی، آرایشی و بهداشتی، چرم، مواد غذایی، دارویی، مواد رنگزا و لاک، صنایع خمیر و کاغذ نشأت می گیرند. براساس برآورد اخیر، سالانه حدود ۶۴ هزار تن ماده رنگزا در سراسر جهان تولید می شود که انتشار این مواد رنگزا در پسماند صنعتی به داخل آب، سلامت انسان و محیط زیست را به خطر می اندازد (۴). بیشتر مواد رنگزا غیر قابل تجزیه پذیر، سمی، سرطان زا، تحریک کننده پوست، و دارای اثرات آلرژیک و جهش ژنتیک هستند (۷-۵، ۳). روش ها و مواد مختلفی برای حذف مواد رنگزا استفاده می شود. در این میان موادی که بیشترین ظرفیت جذب را دارند، به عنوان ترکیبات مؤثرتر شناخته می شوند (۱۱-۸).

چارچوب های فلزی-آلی (MOFs) شبکه های متخلخل بلورین پلیمری تشکیل شده از گره های فلزی (یون ها یا خوشه های فلزی) با اتصال دهنده های آلی هستند که خود توسط پیوندهای کووالانسی قوی به وجود آمده اند و شبکه های یک، دو یا سه بعدی را تشکیل می دهند. ویژگی های منحصر به فرد و چندوجهی MOFs آن ها را به موادی مناسب برای انواع مختلفی از کاربردهای پژوهشی و صنعتی تبدیل کرده اند. با این حال، مورفولوژی پودری چارچوب های فلزی آلی، کاربردهای آن را محدود می کند (۱۲). از جمله این راهکارها می توان به ترکیب مواد میکرو متخلخل مغناطیسی با MOF (۱۳)، کامپوزیت هواژل با چارچوب های فلزی آلی (۱۶-۱۴) و ایجاد بستر مناسب (مانند لایه های اکسید فلزی یا مواد پلیمری) اشاره کرد تا ترکیبات MOF به صورت پایداری به دست آید.

هواژل، یک نوع ماده متخلخل ویژه است که ویژگی های فیزیکی و شیمیایی برجسته دارد. این ویژگی ها شامل چگالی کم (از ۰/۰۰۳ تا ۰/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب)، تخلخل بالا (از ۸۰ تا ۹۹/۸ درصد)، سطح مخصوص بزرگ (از ۱۰۰ تا ۱۶۰۰ مترمربع بر گرم) و فعالیت شیمیایی سطحی مناسب می باشند. هواژل ها با توجه به ترکیباتشان به سه گروه کلی غیر آلی، هواژل های آلی و هیبریدی تقسیم بندی می شوند. هواژل سیلیسی متداول ترین هواژل های غیر آلی هستند. با این حال، به دلیل شکنندگی هواژل های غیر آلی از هواژل های آلی (از پلیمرهای طبیعی یا ترکیبی) که انعطاف پذیرتر و کمتر شکننده

هستند، استفاده می شوند. پلیمرهای زیستی تجدید پذیر مانند سلولز، جایگزین اقتصادی و سازگار با محیط زیست برای پلیمرهای ترکیبی از منابع نفتی هستند (۱۸، ۱۷).

سلولز می تواند از منابع مختلفی استخراج شود که به طور عمده شامل گیاهان و اجزای مختلف گیاهان مانند ساقه برنج (۱۹)، کنف (۲۰)، پنبه (۲۱)، چوب (۲۲)، سیب زمینی و باگاس یا تفاله نیشکر است (۲۳). ویژگی های عملکردی سلولز، مانند طول زنجیره مولکولی، اندازه، درجه بلورینگی و پایداری حرارتی، توسط گونه گیاهی که از آن استخراج می شود و همچنین فرایندهای استخراج استفاده شده در تولید آن، از جمله پیش عمل آوری، پس عمل آوری و فرایندهای تجزیه تعیین می شود؛ بنابراین، ساختار و عملکرد سلولز هواژل ها تحت تأثیر منبع گیاهی قرار می گیرد که سلولز آن ها از آن استخراج شده است.

MOF-5 (چارچوب فلزی-آلی) است که ترکیبی از ZnO₃(BDC) (BDC = یون بنزن دی کربوکسیلات) است. MOF-5 ماده ای است که به دلیل داشتن مساحت سطح بالا، از زمانی که ساختار آن در سال ۱۹۹۹ منتشر شد، به شدت مورد توجه در ادبیات علمی قرار گرفته است. MOF-5 به دلیل ساختار متخلخل خود، در حوزه های مختلفی مانند تصفیه هوا (۲۴)، ذخیره گاز (۲۵)، تصفیه آب (۲۶) مورد مطالعه قرار گرفته است (۲۷). برای این منظور در این تحقیق، ابتدا کامپوزیت هواژل سلولزی با MOF-5 سنتز می شود و ساختار آن قبل و پس از جذب توسط مواد رنگزا با استفاده از تجزیه زیرقرمز انتقال فوریه (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی می شود. همچنین، تأثیر عوامل محیطی مانند pH، زمان تماس، غلظت مواد رنگزا، مقدار جاذب و دما بر میزان جذب مورد بررسی قرار می گیرد. مدل های ایزوترمی لانگمویر، فروندلین و تمکین نیز برای بررسی رفتار تعادلی جذب، کارایی جاذب و تعیین ظرفیت جذب بیشینه استفاده می شوند. همچنین، از مدل های سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم نیز برای بررسی رفتار سینتیکی فرایند جذب سطحی استفاده می شود و مطالعات ترمودینامیکی نیز به منظور بررسی رفتار ترمودینامیکی جاذب انجام پذیرفت.

MOF ها، همراه با ماتریس هواژل سلولز، خواص منحصر به فردی را از خود نشان می دهند. این مطالعه خواص جذب رنگ های کاتیونی را با استفاده از یک ماده کامپوزیت شامل MOF-5 و هواژل سلولز بررسی می کند. MOF-5 به دلیل سطح استثنایی و تخلخل خود مشهور است، در حالی که هواژل سلولزی بعنوان پشتیبانی کننده مناسب از این ساختار معرفی می شود. انتخاب رنگ های کاتیونی نشان دهنده هدف گیری رنگ های با بار مثبت، با هدف حذف موثر آنها از فاضلاب است. مزایای کامپوزیت MOF-5 / هواژل سلولزی شامل افزایش ظرفیت جذب، بهبود پایداری و مناسب بودن

افتاد، باید به خوبی کنترل شود.

مرحله اسیدی: در این مرحله آبکافت همی سلولز با استفاده از محلول اسیدی رقیق برای تجزیه ی پلی ساکاریدها به قندهای ساده انجام می شود. همی سلولز به علت بی شکل بودن آن، نسب به سلولز واکنش پذیرتر است لذا بیشتر در معرض واکنش تخریب هست. بعد از اتمام آبکافت اسیدی رنگ آن از قهوه ای به زرد تبدیل می شود، مخلوط با استفاده از پمپ خلأ فیلتر و شسته شد تا مخلوط خنثی شود. در مرحله آخر رنگ زدایی با استفاده از هیپو کلریت سدیم انجام می شود تا رنگ سلولز سفید گردد. مخلوط حاصله شسته شد تا خنثی شود، سپس در آن خشک گردید تا وزن آن ثابت گردد.

۲-۳-۲- روش سنتز MOF-5

سنتز MOF-5 با استفاده از نمک روی نیترات دو آب $Zn(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$ و ترفتالیک اسید (TFA) به روش حلال گرمایی در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد و مدت ۲۴ ساعت، انجام شد.

۲-۳-۳- روش ساخت کامپوزیت MOF-5/ cellulose aerogel

فرایندی که توضیح داده شد، شامل مخلوط کردن آکریل آمید با سلولز در یک حلال آب و به دنبال آن افزودن یک چارچوب فلزی-آلی است. سپس مواد با استفاده از دستگاه فراصوت به مدت ۱ ساعت با توان ۹۰ وات مخلوط شد. در نهایت، مواد در دستگاه خشک کن انجمادی قرار داده شد، شکل (a, b) ۱ نشان دهنده کامپوزیت ساخته شده است.

۲-۳-۳-۱- تهیه محلول حاوی ماده رنگزا

محلول های حاوی ماده رنگزای متیلن بلو در غلظت های ۱۰۰ و ۵۰ ppm، ۲۵، ۵، تهیه شد. همچنین جهت دستیابی به بیشینه طول موج جذب، ماده رنگزای متیلن بلو توسط دستگاه طیف سنج Shimadzu 1800 (UV/VIS model) در محدوده طول موج بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر بررسی شد و طول موج ۶۸۱ به عنوان حداکثر طول موج جذب تعیین گردید.

۲-۳-۴- روش اندازه گیری غلظت ماده رنگزای باقیمانده در محلول

پس از جذب ماده رنگزا، جاذب کامپوزیتی توسط دستگاه گریزانه از محلول رنگی حذف شد و سپس غلظت ماده رنگزای باقی مانده در طول موج تعریف شده توسط دستگاه طیف سنج UV/VIS اندازه گیری شد و درصد حذف ماده رنگزا (R%) و ظرفیت جذب (q_t) در زمان t توسط رابطه های ۱ و ۲ به دست آمد.

برای کاربردهای در مقیاس بزرگ است. همچنین، یک رویکرد ساده و نوآورانه برای ساخت MOF های ساختاریافته با استفاده از گیاه پامپاس ارائه شد. هواژل ها از طریق روش پایه سل-ژل و با خشک کردن انجمادی سنتز شدند. در نهایت ظرفیت کامپوزیت سلولز MOF-5/aerogel را برای جذب رنگ های آلی بررسی گردید.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

برای تهیه کامپوزیت MOF-5 و هواژل سلولزی از روی نیترا ته ۶ آبه کشور ایران، تری اتیل آمین کشور ایران، دی متیل فرمامید (DMF) کشور کره، ۱،۴ دی بنزن کربوکسیلیک اسید کشور کره، آکریل آمید شرکت مرک آلمان، متیلن بلو شرکت سیگما آلدریج آلمان، سدیم هیدروکسید کشور ایران، اتانل ۹۹/۶ درصد کشور ایران، نیتریک اسید ۷۰ درصد کشور ایران و هیپوکلرید سدیم کشور ایران با درجه آزمایشگاهی تهیه شدند، همچنین گیاه پامپاس از فضای سبز اطراف شهر تهران تهیه شد.

۲-۲- دستگاه ها

در این مطالعه برای سنتز کامپوزیت ساخته شده از دستگاه فراصوت^۱ مدل ۱۶۰۰ UPT ساخت ایران، دستگاه خشک کن انجمادی^۲ ($VaCo_2$) کمپانی ZIRBUS ساخت آلمان استفاده شد. همچنین برای آنالیز جاذب سنتز شده از دستگاه طیف سنج فرورسرخ^۳ مدل Perkin Elmer ساخت آمریکا، دستگاه میکروسکوپ الکترون روبشی^۴ مدل Hitachi Su3500 ساخت ژاپن استفاده شد. به منظور تعیین غلظت ماده رنگزا از دستگاه UV-Vis مدل Shimadzu 1800 ساخت ژاپن استفاده شد.

۲-۳- روش ها

۲-۳-۱- روش استخراج سلولز

در ابتدا گیاه پامپاس شسته شد و خرد گردید. این عمل به منظور افزایش مساحت سطح و افزایش برهمکنش های بعدی با معرف های شیمیایی است که در نتیجه نیاز به زمان کمتری برای آبکافت پلی ساکاریدهای ثانویه دارد. سپس مراحل قلیایی و اسیدی به شرح زیر انجام می شود.

مرحله قلیایی: در این مرحله گیاه پامپاس خرد شده با محلول های قلیایی واکنش می دهد و منجر به حذف لیگنین می شود و همی سلولز باقی می ماند. در این مرحله زمان و مقدار قلیا برای جلوگیری از تخریب نامطلوب سلولز و اطمینان از اینکه آبکافت فقط در سطوح فیبر اتفاق

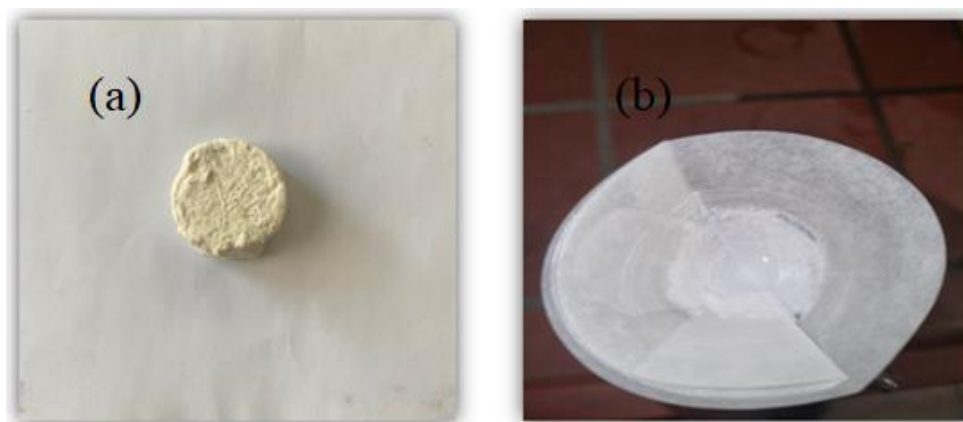
¹ Ultrasonic

² Freeze dryer

³ FTIR

⁴ SEM

⁵ Solvothermal

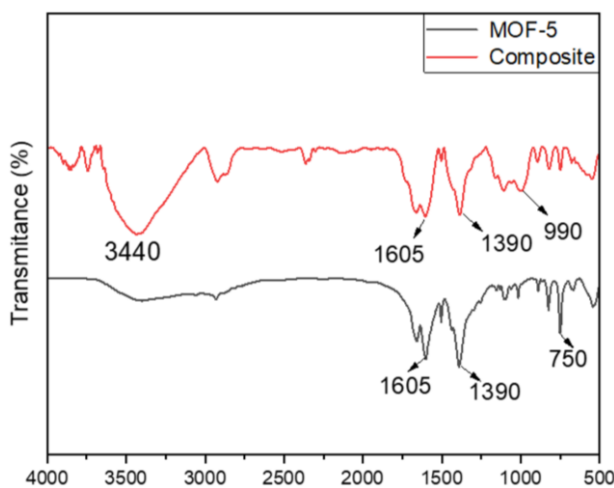


شکل ۱: (a) کامپوزیت ساخته شده بعد از قرار گرفتن در دستگاه خشک کن انجمادی و (b) ماده ساخته شده بعد از صاف شدن.

Figure 1: (a) composite made after being placed in freeze dryer, and (b) material made after smoothing.

۳-۱-۲- آنالیز SEM

ریخت‌شناسی سطح، اندازه و شکل MOF-5 و کامپوزیت MOF-5 / هواژل سلولزی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تجزیه و تحلیل شد و تصاویر SEM در شکل ۳ نمایش داده شده است. در شکل ۳ a به وضوح بلوره‌های مکعبی نشان داده شده است. اندازه تقریباً یکنواخت، نشان‌دهنده شکل‌گیری موفقیت‌آمیز MOF است. در تصویر SEM کامپوزیت هواژل سلولزی / MOF-5 (شکل 3b) یک الگوی انباشته از هواژل سلولزی و بلوره‌های MOF-5 را در اطراف الیاف نشان داده شده است که نشان‌دهنده سنتز موفقیت‌آمیز است. این مشخصه از مناسب بودن کامپوزیت برای کاربردهای مورد نظر آن، مانند فرایندهای مبتنی بر جذب یا اصلاح محیطی پشتیبانی می‌کند.



شکل ۲: طیف FT-IR نمونه (a) MOF-5 و (b) کامپوزیت ساخته شده.

Figure 2: FT-IR spectra of (a) MOF-5 sample, and (b) the synthesized composite.

$$R(\%) = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$q_t = (C_0 - C) \times \left[\frac{V}{m} \right] \quad (2)$$

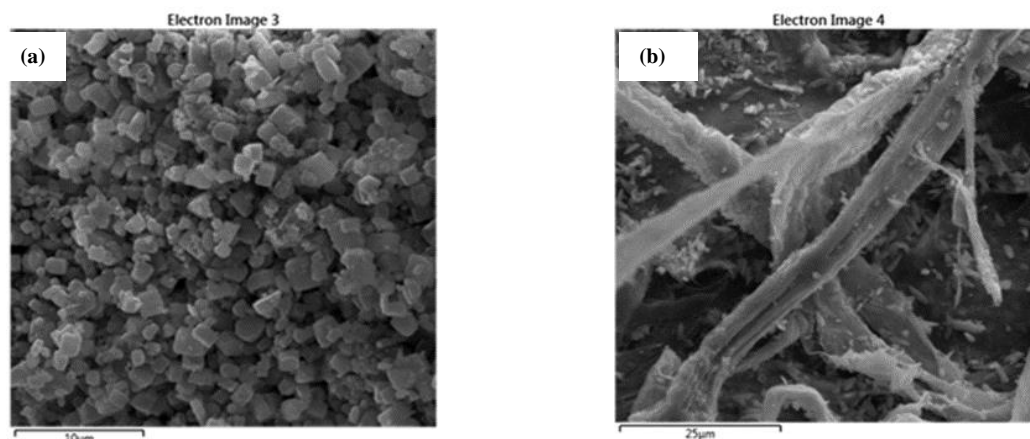
در این رابطه C_0 و C به ترتیب نشانگر غلظت اولیه و غلظت تعادلی ماده رنگزا (mg/lit)، V حجم محلول و M جرم جاذب است (۱۱، ۱۰).

۳- نتایج و بحث

۳-۱-۳- شناسایی جاذب

۳-۱-۱- آنالیز FT-IR

طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FT-IR) برای MOF-5 در شکل ۲ نشان داده شده است. طیف FT-IR چندین قله مشخصه مرتبط با ترکیب شیمیایی MOF-5 را نشان داده شده است. نوار جذب در حدود $1590 - 1580 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن گروه -COO- در پیونددهنده TPA است. یک قله تیز دیگر در حدود 1506 cm^{-1} به ارتعاش کششی C=C در پیونددهنده نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، ارتعاش C-H در ارتعاش تغییر شکل خارج از صفحه بلوره‌های MOF-5 با دو باند قابل توجه 2924 و 826 cm^{-1} نشان داده است که به عنوان اثرانگشت شیمیایی MOF-5 عمل می‌کند (۲۸). طیف FTIR همچنین شامل اطلاعاتی درباره کامپوزیت MOF-5 / سلولزی هواژل است. نوار جذب گسترده مشاهده شده در 3400 cm^{-1} به حضور گروه‌های هیدروکسیل (OH) در سطح کامپوزیت MOF-5 / هواژل سلولزی نسبت داده شده است. قله‌های 1080 cm^{-1} و 1339 cm^{-1} به ترتیب با ارتعاشات گروه‌های C-O و C-OH در ساختار کامپوزیت MOF-5 / سلولزی هواژل مطابقت دارند. علاوه بر این، نوار جذب در 1367 cm^{-1} به ارتعاشات کششی پیوندهای C-N مربوط می‌شود (همان‌طور که در مرجع (۲۹) گزارش شده است).



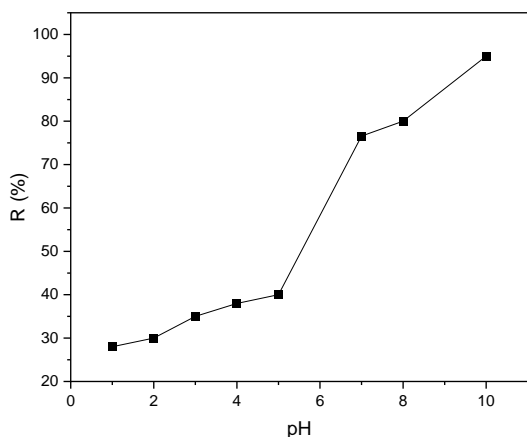
شکل ۳: تصاویر SEM نمونه‌های (a) MOF-5 و (b) کامپوزیت هواژل سلولزی / MOF-5.
Figure 3: SEM images of samples (a) MOF-5, and (b) cellulose aerogel/MOF-5 composite.

از کامپوزیت هواژل سلولزی / MOF-5 در محلول‌های حاوی ماده رنگزا متیلن بلو غوطه‌ور شد. با گذشت زمان، رنگ محلول به تدریج کاهش یافت و در نهایت بی‌رنگ شد. به‌طور هم‌زمان، قله جذب UV-Vis در ۶۸۱ نانومتر کاهش قابل توجهی را نشان داد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، جالب اینکه رنگ خود قطعه هواژل از سفید به بلو تبدیل شد.

جدول ۱: مقدار جاذب بهینه در pH برابر با ۷/۲، وزن جاذب ۰/۱ گرم و مدت زمان تماس ۶۰ دقیقه.

Table 1: Optimum adsorbent dose at pH equal to 7.2, adsorbent weight 0.1 g and contact time 60 minutes.

Entry	MOF	Adsorption%
Composite	0.01	30 %
Composite	0.1	76 %



شکل ۴: اثر pH بر روی میزان جذب در وزن جاذب ۰/۱ گرم و غلظت ماده رنگزا ۵۰ ppm.

Figure 4: The effect of pH on the adsorption in the adsorbent weight of 0.1 g and the dye concentration of 50 ppm.

۲-۳- عوامل مؤثر بر عملکرد جذب کامپوزیت

۱-۲-۳- تعیین pH در نقطه بار صفر (pH_{ZPC})

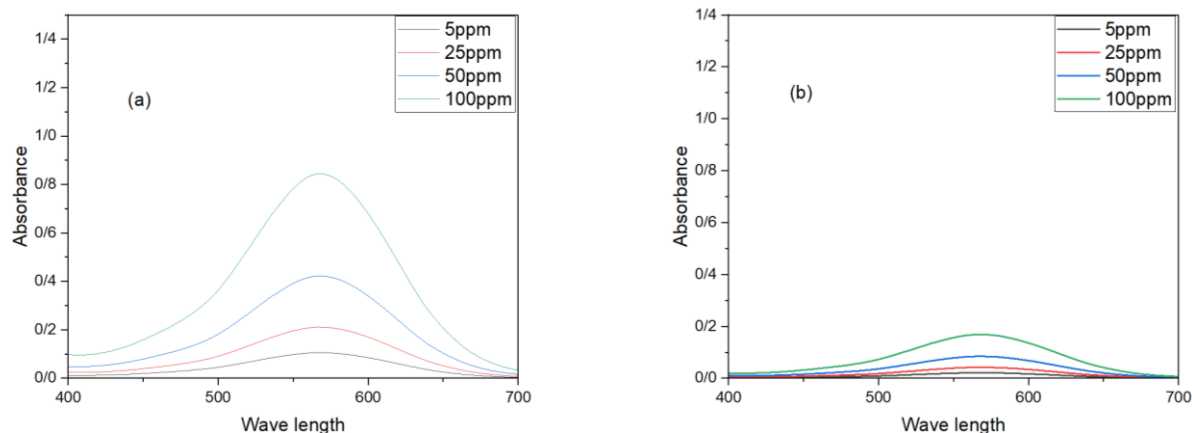
pH پارامتر بسیار مهمی است که بر روی فرایند جذب تأثیر می‌گذارد. در مهندسی محیط‌زیست، pH_{ZPC} یعنی pH در نقطه‌ای که بار خالص ذره صفر است و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر اساس مطالعات انجام‌شده قبلی MOF-5 دارای pH_{ZPC} حدود ۷ است (۱۳، ۱۴). هم‌چنین هواژل سلولزی دارای pH_{ZPC} حدود ۶/۸ است. از مفهوم pH_{ZPC} چنین استنباط می‌شود که در pH بالاتر از pH_{ZPC} سطح جاذب دارای بار منفی و در pH پایین‌تر از pH_{ZPC} سطح جاذب دارای بار مثبت است. شکل ۴ اثر pH محلول را بر حذف ماده رنگزا توسط کامپوزیت MOF-5/cellulose aerogel نشان می‌دهد. برای ماده رنگزای کاتیونی متیلن بلو، بهترین pH برای جذب، pH قلیایی ۱۰ است.

۲-۲-۳- دوز جاذب

برای مطالعه اثر مقدار جرم جاذب در فرایند حذف، مقادیر بین ۱ تا ۱۰ میلی‌گرم از جاذب یعنی کامپوزیت MOF-5 / cellulose aerogel برای جذب انتخاب شد که مقادیر ۳۰ تا ۷۶ درصد برای میزان جذب متیلن بلو ثبت شد که نشان‌دهنده افزایش چشمگیر درصد جذب متیلن بلو توسط کامپوزیت سنتز شده است که دلیل این افزایش بازده، بیشتر شدن مکان‌های فعال جاذب در فرایند جذب است. نتایج در جدول ۱ آورده شده است.

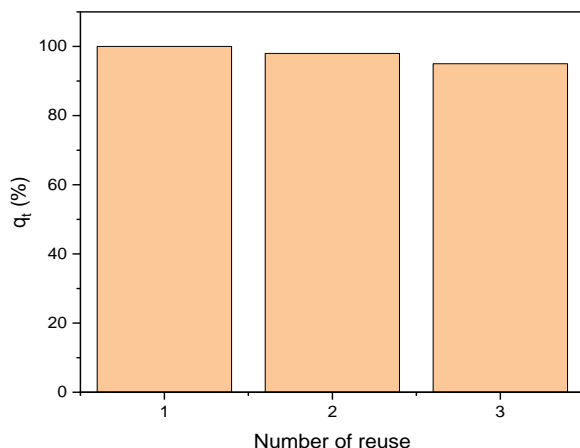
۳-۲-۳- UV-VIS

ماده رنگزای متیلن بلو از آلاینده‌های متعدد برای بررسی ظرفیت جذب کامپوزیت هواژل سلولزی / MOF-5 انتخاب شد. برای ارزیابی عملکرد جذب کامپوزیت، از یک طیف‌سنج UV-Vis استفاده کردیم که به‌طور خاص جذب را در طول موج ۶۸۱ نانومتر برای متیلن بلو اندازه‌گیری می‌کند، استفاده شد. در این آزمایش، یک قطعه کوچک



شکل ۵: طیف UV-Vis محلول‌ها (a) قبل از و (b) بعد از قرار گرفتن در معرض کامپوزیت هواژل سلولزی MOF-5 در pH برابر با ۱۰، وزن جاذب ۰/۱ گرم و مدت زمان تماس ۶۰ دقیقه.

Figure 5: The UV-Vis spectra of solutions (a) before, and (b) after exposure to MOF-5 cellulose aerogel composite at pH equal to 7.8, adsorbent weight 0.1 g and contact time 180 minutes.



شکل ۶: نتایج بازیابی و استفاده مجدد از کامپوزیت در pH برابر با ۱۰، وزن جاذب ۰/۱ گرم و مدت زمان تماس ۶۰ دقیقه و غلظت ماده رنگزا ۵۰ ppm. Figure 6: Recovery and reuse results of the composite at pH equal to 10, adsorbent weight 0.1 g, contact time 60 minutes, and dye concentration 50 ppm.

مدل‌های ایزوترم جذب در ارزیابی پیشرفت جذب و بررسی سازوکارهای جذب بسیار مهم هستند. در این مطالعه، داده‌های تعادلی کامپوزیت MOF-5/ سلولزی هواژل با استفاده از مدل‌های لانگمیر، فروندلیچ، تمکین همان‌طور که در معادلات ۳-۵ توضیح داده شده است، تجزیه و تحلیل شد. کاربرد این مدل‌های ایزوترم در تیمار جذب از طریق ارزیابی ضریب همبستگی (R^2) مورد بررسی قرار گرفت.

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{c_e}{q_m} + \frac{1}{bq_m} \quad (3)$$

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

$$q_e = k \cdot \ln C_e \quad (5)$$

این تغییر نشان می‌دهد که کامپوزیت هواژل سلولزی MOF-5 به‌طور مؤثر مولکول‌های متیلن بلو را جذب می‌کند. برای بررسی غلظت اولیه ماده رنگزای متیلن بلو بر روی جذب، چهار محلول ۱۰۰ میلی لیتری در غلظت ۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ppm تهیه شد. به هر یک از محلول‌ها مقدار ۰/۱ گرم جاذب اضافه شده و به مدت ۱۲۰ دقیقه در دستگاه همزن مغناطیسی قرار گرفت. سپس مقادیر جذب محلول‌ها با کمک دستگاه طیف‌سنج بررسی گردید و با توجه به بررسی‌های انجام شده، بیشترین مقدار جذب در غلظت ۵۰ ppm بدست آمد.

۴-۲-۳- مطالعه استفاده مجدد کامپوزیت cellulose aerogel MOF-5/

شکل ۶ نتیجه بازیابی و استفاده مجدد از کامپوزیت cellulose aerogel MOF-5/ را نشان می‌دهد. اتانل رقیق به‌عنوان عامل شستشو برای متیلن بلو استفاده شد. پس از سه‌چرخه بازیابی و استفاده مجدد، ظرفیت جذب کامپوزیت تنها ۵ درصد کاهش یافت.

۳-۳- ایزوترم جذب

به‌طور کلی، ایزوترم جذب منحنی است که پدیده حفظ (یا آزادسازی) یا حرکت ماده از یک بستر متخلخل آبی یا محیط آبی به فاز جامد در دما و pH ثابت را توصیف می‌کند (۳۰). معادلات جذب (نسبت) مقدار جذب‌شده با باقی‌مانده در محلول) زمانی ایجاد می‌شود که جذب‌شونده به مدت‌زمان کافی با جاذب در محلول تماس یافته و غلظت جذب‌شونده در محلول در یک تعادل دینامیکی با غلظت مرزی بین جاذب و جذب‌شونده باشد (۳۱، ۳۲).

جدول ۲: نتایج ایزوترم جذب برای کامپوزیت MOF-5 / هواژل سلولز در pH برابر با ۱۰، وزن جاذب ۰/۱ گرم و مدت زمان تماس ۶۰ دقیقه و غلظت رنگزا ۵۰ ppm

Table 2: Adsorption isotherm data for MOF-5/cellulose aerogel composite at pH equal to 10, absorbent weight 0.1 g, contact time 60 minutes, and dye concentration 50 ppm.

Isotherm	Parameters	MOF-5/cellulose aerogel composite
Langmuir	B	0.49
	q_e	60
	R^2	0.9753
Freundlich	K_f (mg/g)	25.58
	n	6.16
	R^2	0.9514
Temkin	B	117.81
	Q	18.8
	R^2	0.7841

۳-۳-۱- مطالعه سینتیک جذب

سینتیک جذب کامپوزیت هواژل/MOF-5 سلولز با استفاده از مدل‌های مختلف ریاضی در معادله ۷ و ۶ توضیح داده شد. در این زمینه، q_t (mg/g) و q_e (mg/g) به ترتیب ظرفیت جذب را در زمان t (دقیقه) و در حالت تعادل نشان می‌دهند. k_1 و k_2 ثابت‌های سرعت را برای سینتیک‌های جذب شبه مرتبه اول (min^{-1}) و شبه مرتبه دوم ($\text{mg}^{-1} \text{min}^{-1}$) نشان می‌دهد.

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1 t}{2.303} \quad (5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (6)$$

مدل‌های ریاضی برای محاسبه ضریب همبستگی (R^2) و مقادیر ثابت نرخ آزاد (K) از طریق تحلیل رگرسیون استفاده می‌شود. این مقادیر اطلاعات ارزشمندی را در مورد سینتیک‌ها و مکانیسم‌های رهاسازی ارائه می‌دهند. نتایج نشان داده شده در شکل ۷ و جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل سینتیکی شبه مرتبه اول بالاترین ضریب رگرسیون را نشان می‌دهد.

۳-۳-۲- مقایسه سایر جاذب‌ها

نتایج بیشینه ظرفیت جذب کامپوزیت هواژل/MOF-5 سلولز برای جذب رنگ در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج به دست آمده ظرفیت جذب خوب کامپوزیت MOF را در مقایسه با سایر جاذب‌ها نشان می‌دهد.

ایزوترم جذب لانگمویر، ابتدا برای توصیف جذب فاز گازی به فاز جامد بر روی کربن فعال توسعه یافته است، به‌طور سنتی برای اندازه‌گیری و مقایسه عملکرد مختلف جاذب‌های زیستی (۳۳) استفاده شده است. در فرمول بندی آن، این مدل تجربی جذب تک لایه را فرض می‌کند. شکل خطی مدل ایزوترم لانگمویر در معادله ۳ بیان شده است (۳۴).

ایزوترم فروندلیچ یک مدل تجربی است که فرایندهای جذب غیرایده‌آل و قابل بازگشت را توصیف می‌کند و به تشکیل تک‌لایه محدود نمی‌شود. پیشنهاد شده توسط هربرت فروندلیچ در سال ۱۹۰۶، این مدل یکی از قدیمی‌ترین روابط شناخته شده برای جذب است. ایزوترم فروندلیچ به‌ویژه برای دستگاه‌هایی که جذب چندلایه‌ای رخ می‌دهد مفید است و یک توزیع غیریکنواخت از گرمای جذب و تمایل‌ها روی یک سطح متنوع را در نظر می‌گیرد. نمایش ریاضی مدل ایزوترم فروندلیچ در معادله ۴ بیان شده است (۳۵).

ایزو ترم تمکین^۱ یکی از مدل‌های ایزوترم‌های جذب است که برای توصیف رفتار جذب مولکول‌ها در فرایند جذب گاز-مایع به سطح جاذب استفاده می‌شود. ایزوترم تمکین به‌ویژه برای توصیف جذب مولکول‌ها در سطوح مختلف جاذب‌های نانوساختار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل بر اساس فرضیه‌هایی درباره توزیع همگن مولکول‌ها در محلول و ماهیت سطح جاذب استوار است. از ایزو ترم تمکین برای توصیف فرایند جذب مولکول‌ها با توجه به مشاهدات تجربی استفاده می‌شود. این ایزوترم معمولاً به شکل رابطه‌های ریاضی برای توصیف نسبت مولکول‌های جذب شده به مقدار باقی‌مانده در محلول ارائه می‌شود. بیان ریاضی مدل ایزوترم تمکین با معادله ۵ نشان داده شده است (۳۶).

نتایج به دست آمده برای همه مدل‌ها در (جدول ۲) ارائه شده است. مقدار ضریب همبستگی R^2 برای مدل لانگمویر برابر با ۰/۹۷۵۳ است که بالاتر از مقادیر محاسبه شده برای ایزوترم‌های فروندلیچ و تمکین است. بنابراین، به نظر می‌رسد که ایزوترم لانگمویر جذب ماده رنگزای متیلن بلو توسط کامپوزیت MOF-5 / هواژل سلولز را بهتر توصیف می‌کند. مدل ایزوترم لانگمویر، بر اساس این فرض که جذب در مکان‌های یکنواخت روی سطح جاذب رخ می‌دهد، استفاده شد. طبق این مدل، هنگامی که سطح جاذب به‌طور کامل توسط ماده رنگزا پوشانده شود، جذب بیشتر در آن سطح متوقف می‌شود (۳۴). q_m نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت جذب (همچنین به‌عنوان ظرفیت جذب لانگمویر شناخته می‌شود)، نشان‌دهنده حداکثر مقدار جذبی است که می‌تواند در واحد جرم جاذب در پوشش تک لایه جذب شود. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشینه ظرفیت جذب برای کامپوزیت ساخته شده ۶۰ میلی‌گرم بر گرم است.

¹ Temkin

جدول ۳: نتایج سینتیک جذب برای کامپوزیت MOF-5/ هواژل سلولزی در pH برابر با ۱۰، وزن جاذب ۰/۱ گرم و مدت زمان تماس ۶۰ دقیقه غلظت رنگزا ۵۰ ppm.

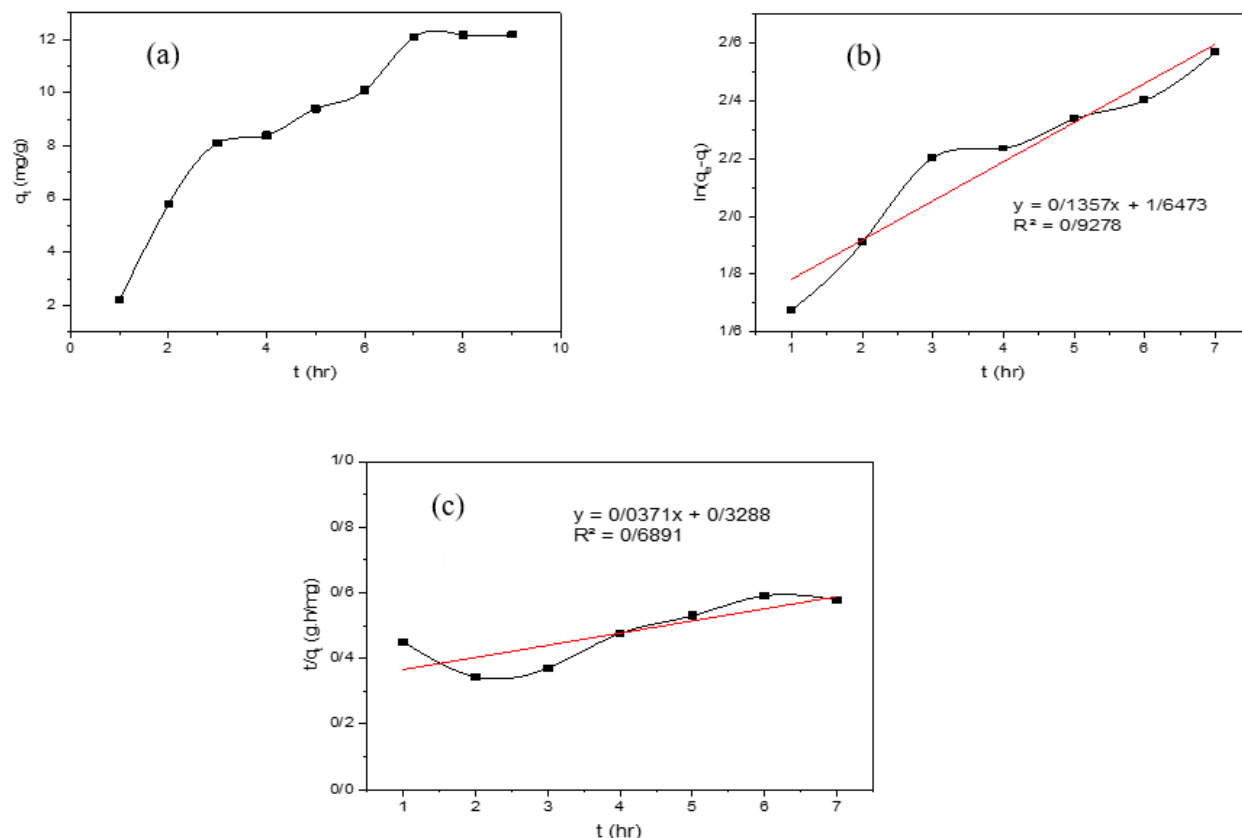
Table 3: Adsorption kinetic data for MOF-5/cellulose aerogel composite at pH equal to 10, adsorbent weight 0.1 g, contact time 60 minutes, and dye concentration 50 ppm.

Adsorbent	C ₀ Methylene Blue Dye (mg/l)	pseudo-first-order model			Pseudo-second-order model		
		k ₁	R ²	q _e (mg/g)	K ₂	R ²	q _e (mg/g)
MOF-5/ cellulose aerogel	50	0.135	0.927	60	0.03	0.689	15.6

جدول ۴: مطالعات قبلی در مورد بیشینه مقادیر جذب شده.

Table 4. Previous studies on maximum absorbed values.

Adsorbent	Dye	Removal (%)	q _m (mg/g)	Ref
MOF-199	Methylene blue	45	15.28	(36)
Fe ₃ O ₄ @MIL-100 (Fe)	Methylene blue	75	49.41	(37)
Activated carbon	Methylene blue	80	46	(38)
MOF-5/cellulose aerogel composite	Methylene blue	95	60	This Work



شکل ۷: (a) تأثیر زمان تماس بر ظرفیت جذب MOF-5/ هواژل سلولزی، (b) مدل سینتیک شبه مرتبه اول و (c) مدل سینتیک شبه مرتبه دوم و رنگزای متیلین بلو و جاذب MOF-5/ هواژل سلولزی در pH برابر با ۱۰، وزن جاذب ۰/۱ گرم و مدت زمان تماس ۶۰ دقیقه غلظت رنگزا ۵۰ ppm.

Figure 7: (a) The effect of contact time on the adsorption capacity of MOF-5/cellulose aerogel, (b) Pseudo-first-order kinetic model, and (c) Pseudo-second-order kinetic model of acid blue dye and MOF-5/cellulose aerogel adsorbent at pH equal to 10, adsorbent weight 0.1 g, contact time 60 minutes, and dye concentration 50 ppm.

می‌کند. جاذب cellulose aerogel / MOF-5 کارایی مناسب برای استفاده در چند سیکل متوالی دارد. این مطالعه روشی کارآمد برای حذف سریع ماده رنگزای متیلن بلو از آب است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت دانشگاه علم و صنعت تشکر و قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، در ابتدا کامپوزیت cellulose aerogel / MOF-5 ساخته شد و عملکرد آن در حذف ماده رنگزای متیلن بلو به‌وسیله کامپوزیت cellulose aerogel / MOF-5 بررسی گردید. نتایج نشان داد که غلظت ۵۰ میلی‌گرم از ماده رنگزا در ۱/۰ گرم از ماده جاذب در شرایط خنثی، pH برابر با ۷/۸ در مدت‌زمان ۱۸۰ دقیقه به حذف ۷۶/۵۸ درصد رسیده است و در شرایط قلیایی pH برابر با ۱۰ در دمای محیط، مدت‌زمان کم‌تر از ۶۰ دقیقه به حذف ۹۵ درصد رسیده است که نشان‌دهنده تأثیر مهم pH در فرایند حذف است. رفتار جذب ماده رنگزای متیلن بلو روی کامپوزیت cellulose aerogel / MOF-5 از مدل سینتیکی شبه مرتبه اول و ایزوترم لانگمویر پیروی

۵- مراجع

- Yang X, Tang Q, Jiang Y, Zhang M, Wang M, Mao L. Nanoscale ATP-responsive zeolitic imidazole framework-90 as a general platform for cytosolic protein delivery and genome editing. ACS.2019;141(9):3782-6https://doi.org/10.1021/jacs.8b11996.
- Zhou Y ,Wang D, Feng Q, Wu Q, Cao F, Jiang L, et al. A facile synthesis of a Ce-based MOF at room temperature for effective adsorption of methylene blue. Crys tEng Comm. 2024;26(14):2009-1.https://doi.org/10.1039/D4CE00096J.
- El Messaoudi N, El Mouden A, El Khomri M, Bouich A, Fernine Y, Cığeroğlu Z, et al. Experimental study and theoretical statistical modeling of acid blue 25 remediation using activated carbon from Citrus sinensis leaf. Fluid Ph. Equilib. 2023;563:113585. https://doi.org/10.1016/j.fluid.2022.113585
- Cao Y, Lu S, Cui W, Xu Y, Cao Z, Zeng Y. Adsorption desulfurization via π -complexation with Ag⁺-exchanged anionic metal-organic framework. I&EC Res. 2019;58(16):6704-11. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00617.
- Kitchamsetti N, Chakra CS, De Barros ALF, Kim D. Development of MOF based recyclable photocatalyst for the removal of different organic dye pollutants. Nanomater. 2023;13(2):336. https://doi.org/10.3390/nano13020336.
- Lin J, Ye W, Xie M, Seo DH, Luo J, Wan Y, et al. Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. Nat Rev Earth Environ . 2023;4(11):785-803. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00489-8.
- Hemashenpagam N, Selvajeyanthi S. Textile Dyes and Their Effect on Human Beings. Nanohybrid Materials for Treatment of Textiles Dyes: Springer; 2023. p. 41-60. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3901-5_3.
- Solayman H, Hossen MA, Abd Aziz A, Yahya NY, Leong KH, Sim LC, et al. Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: A review. J Environ Chem Eng. 2023;11(3):109610.https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109610
- Khan MD, Singh A, Khan MZ, Tabraiz S, Sheikh J. Current perspectives, recent advancements, and efficiencies of various dye-containing wastewater treatment technologies. JWPE. 2023;53:103579.
- Taher T, Munandar A, Mawaddah N, Wisnubroto MS, Siregar PMSBN, Palapa NR, et al. Synthesis and characterization of montmorillonite-Mixed metal oxide composite and its adsorption performance for anionic and cationic dyes removal. Inorg Chem Commun.2023;147:110231.https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103579.
- Lawal IM, Soja UB, Hussaini A, Saleh D, Aliyu M, Noor A, et al. Sequential batch reactors for aerobic and anaerobic dye removal: a mini-review.CSCEE. 2023:100547. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100547
- Zhu L, Zong L, Wu X, Li M, Wang H, You J, et al. Shapeable fibrous aerogels of metal-organic-frameworks templated with nanocellulose for rapid and large-capacity adsorption .ACS nano. 2018;12(5):4462-8.https://doi.org/10.1021/acsnano.8b00566
- Aghayi-Anaraki M, Safarifard V. Fe3O4@ MOF magnetic nanocomposites: Synthesis and applications. Eur J Inorg. Chem. 2020;2020(20):1916-37. https://doi.org/10.1002/ejic.202000012
- Shaheed N, Javanshir S, Esmkhani M, Dekamin MG, Naimi-Jamal MR. Synthesis of nanocellulose aerogels and Cu-BTC/nanocellulose aerogel composites for adsorption of organic dyes and heavy metal ions. Sci Rep. 2021;11(1):18553. https://doi.org/10.1038/s41598-021-97861-9
- Lei C, Gao J, Ren W, Xie Y, Abdalkarim SYH, Wang S, et al. Fabrication of metal-organic frameworks@ cellulose aerogels composite materials for removal of heavy metal ions in water. Carbohydr Polym.2019;205:35-41 https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.029
- Ma X, Lou Y, Chen X-B, Shi Z, Xu Y. Multifunctional flexible composite aerogels constructed through in-situ growth of metal-organic framework nanoparticles on bacterial cellulose. J Chem Eng. 2019;356:227-35. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.034

17. Long L-Y, Weng Y-X, Wang Y-Z. Cellulose aerogels: Synthesis, applications, and prospects. *Polymers*. 2018;10(6):623. <https://doi.org/10.3390/polym10060623>.
18. Hoepfner S, Ratke L, Milow B. Synthesis and characterisation of nanofibrillar cellulose aerogels. *Cellulose*. 2008;15:121-9. <https://doi.org/10.1007/s10570-007-9146-8>.
19. Zhou Y, Hu Y, Tan Z, Zhou T. Cellulose extraction from rice straw waste for biodegradable ethyl cellulose films preparation using green chemical technology. *J Clean Prod*. 2024;439:140839 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140839>.
20. Manian AP, Cordin M, Pham T. Extraction of cellulose fibers from flax and hemp: a review. *Cellulose*. 2021;28(13):8275-94. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04051-x>.
21. Zhai X, Xiang Y, Tian Y, Wang A, Li Z, Wang W, et al. Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from cotton fiber by enzymatic hydrolysis-assisted high-pressure homogenization. *J Vinyl Addit Technol*. 2021;27(4):781-94. <https://doi.org/10.1002/vnl.21849>.
22. Vinhas S, Sarragaça M, Moniz T, Reis S, Rangel M. A New Microwave-Assisted Protocol for Cellulose Extraction from Eucalyptus and Pine Tree Wood Waste. *Polym*. 2023;16(1):20. <https://doi.org/10.3390/polym16010020>.
23. Emenike EC, Iwuzor KO, Saliu OD, Ramontja J, Adeniyi AG. Advances in the extraction, classification, modification, emerging and advanced applications of crystalline cellulose: a review. *Carbohydr Polym*. 2023;100337. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100337>.
24. Zhou J, Liu M, Bai S, Sun J, Wei J, Wang J. Well-Dispersed MOF-5 on The Polyvinylpyrrolidone-Coated Random Lamellas of Clinoptilolites for Adsorptive Separation Performance of CO₂, CH₄, and N₂. *Adv Sustain. Syst*. 2024;2300466. <https://doi.org/10.1002/adsu.202300466>.
25. Yu S, Ai L, Qiao Y, Ju X. Li-decorated C48B12 and Li12C48B12-impregnated MOF-5 for hydrogen storage: A multi-scale simulation study. *Int J Hydrogen Energy*. 2024;69:570-5. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.123>.
26. Zhang S, Ding J, Tian D, Su W, Liu F, Li Q, et al. Preparation of novel poly (sodium p-styrenesulfonate) /sodium alginate hydrogel incorporated with MOF-5 nanoparticles for the adsorption of Pb (II) and tetracycline. *J Mol Struct*. 2024;1300:137313. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.137313>.
27. Cheng S, Li Y, Yu Z, Gu R, Wu W, Su Y. Waste PET-derived MOF-5 for high-efficiency removal of tetracycline. *Sep Purif Technol*. 2024;339:126490. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126490>.
28. Jun B-M, Heo J, Taheri-Qazvini N, Park CM, Yoon Y. Adsorption of selected dyes on Ti3C2Tx MXene and Al-based metal-organic framework. *Ceram Int*. 2020;46(3):2960-8. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.293>.
29. Liu S, Zhang X, Wang J, Wu J, Jiang X, Xu M. Preparation of underwater superoleophobic polyimide mesh for oil/water separation via a simple Ce/Cu-MOF in-situ growth strategy *Surf Coat Technol*. 2021;421:127422. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127422>.
30. Wang J, Wang X, Zhao G, Song G, Chen D, Chen H, et al. Polyvinylpyrrolidone and polyacrylamide intercalated molybdenum disulfide as adsorbents for enhanced removal of chromium (VI) from aqueous solutions. *J Chem Eng*. 2018;334:569-78. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2017.10.068>.
31. Khan NA, Bhadra BN, Jung SH. Heteropoly acid-loaded ionic liquid@ metal-organic frameworks: Effective and reusable adsorbents for the desulfurization of a liquid model fuel. *J Chem Eng*. 2018;334:2215-21. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2017.11.159>.
32. Özacar M, Şengil İA. A two stage batch adsorber design for methylene blue removal to minimize contact time. *J. Environ. Manage*. 2006;80(4):372-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.10.004>.
33. Hethnawi A, Nassar NN, Manasrah AD, Vitale G. Polyethylenimine-functionalized pyroxene nanoparticles embedded on Diatomite for adsorptive removal of dye from textile wastewater in a fixed-bed column. *J Chem Eng*. 389:320-404,2017. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2017.03.057>.
34. Liang Z, Marshall M, Chaffee AL. CO₂ adsorption, selectivity and water tolerance of pillared-layer metal organic frameworks. *Micropor Mesopor Mat*. 2010;132(3):305-10. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.11.026>.
35. Freundlich H. Über die adsorption in lösungen. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1907;57(1):385-470.
36. Shao Y, Zhou L, Bao C, Ma J, Liu M, Wang F. Magnetic responsive metal-organic frameworks@ nanosphere with core-shell structure for highly efficient removal of methylene blue. *J Chem Eng*. 2016;283:1127-36. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2015.08.051>.
37. Zhang C-F, Qiu L-G, Ke F, Zhu Y-J, Yuan Y-P, Xu G-S, et al. A novel magnetic recyclable photocatalyst based on a core-shell metal-organic framework Fe₃O₄@ MIL-100 (Fe) for the decolorization of methylene blue dye. *J Mater Chem. A*. 2013;1(45):14329-34. <https://doi.org/10.1039/C3TA13030D>.
38. Liu T, Li Y, Du Q, Sun J, Jiao Y, Yang G, et al. Adsorption of methylene blue from aqueous solution by graphene. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2012;90:197-203. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2011.10.019>.

How to cite this article:

Shiri M, Hosseinzadeh M, Javanshir Sh, Shiri S. Synthesis of MOF-5 / cellulose aerogel composite and investigation of its performance in removing methylene blue dye. *J Stud Color World*. 2024;14(3):193-203. <https://doi.org/10.30509/JSCW.2024.167288.1188> [In Persian].