مقاله مروری

فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی
سال دهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۳۹، پاییز ۱۴۰۴
Vol. 10, No. 3 Issue No. 39
Atumn 2025, Quarterly
صفحه ۴۰-۲۹

Iran Polymer Technology: Research and Development

مروری بر روش‌های ساخت اسفنج پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و معرفی ویژگی‌های کلیدی آن

نوید علیپور، علیرضا کیاست*، رویا میرزاجانی
اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم، گروه شیمی

چکیده ...

اسفنج‌های پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) به‌دلیل ترکیب بی‌نظیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی برجسته، به عنوان مواد کلیدی در حوزه‌های صنعتی و پزشکی مطرح شده‌اند. این مواد به‌دلیل قابلیت‌های منحصربه‌فردشان، در کاربردهای نوآورانه‌ای مانند مهندسی بافت، سامانه‌های میکروسیال (Microfluidic)، حسگرها، جاذب‌ها و دستگاه‌های پزشکی زیست‌سازگار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مقاله به بررسی و تحلیل روش‌های گوناگون ساخت اسفنج‌های متخلخل PDMS می‌پردازد. فنون مورد بحث شامل قالب‌برداری سخت، روش امولسیون، اسفنج‌سازی گازی، جداسازی فاز توسط تبخیر (Evaporation Induced Phase Separation) و چاپ سه‌بعدی است. برای هر روش، سازوکارهای شکل‌گیری منافذ و تأثیر آن‌ها بر مورفولوژی، اندازه منافذ و خواص نهایی اسفنج به تفصیل شرح داده شده است. علاوه بر این، ویژگی‌های ذاتی و برجسته اسفنج PDMS مانند آب‌گریزی، چگالی بسیار پایین، انعطاف‌پذیری استثنایی، پایداری شیمیایی و حرارتی بالا، زیست‌سازگاری مطلوب، شفافیت نوری و جذب کم نور معرفی شده و دلایل علمی و بنیادی هر یک با استناد به ساختار مولکولی و ماهیت شیمیایی PDMS تبیین شده است. این مقاله به وضوح نشان می‌دهد که انتخاب هوشمندانه روش ساخت، در کنار بهره‌برداری بهینه از خصوصیات ذاتی بی‌نظیر PDMS، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به عملکرد بهینه و اختصاصی این اسفنج‌ها برای کاربردهای مورد نظر دارد و مسیر را برای توسعه مواد پیشرفته‌تر هموار می‌سازد.

واژه‌های کلیدی:

اسفنج،
پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان،
اسفنج‌های متخلخل
PDMS

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
akiasat@scu.ac.ir

۱ مقدمه

پلیمرهای متخلخل به‌دلیل ترکیب ویژگی‌های ساختاری مواد متخلخل و مزایای ذاتی پلیمرها، در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. این مواد در مقایسه با پلیمرهای غیرمتخلخل، سطح ویژه بالاتر، تخلخل مشخص، قابلیت فرایندپذیری مطلوب و امکان سنتز و عامل‌دارسازی از مسیرهای متنوع را ارائه می‌دهند [۱].

در میان این خانواده، اسفنج‌های PDMS به‌دلیل ساختار متخلخل کشسان و ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود پلیمر، جایگاه برجسته‌ای پیدا کرده‌اند. PDMS که از دهه ۱۹۹۰ توجه کاربردی بیشتری را به خود جلب کرده؛ امروزه به‌عنوان یکی از پرکاربردترین الاستومرهای آلی سیلیکونی شناخته می‌شود [۲]. این ماده گرانروکشسان، زیست‌سازگار و مقاوم در برابر عوامل شیمیایی و مکانیکی است و همچنین دمای انتقال شیشه‌ای پایینی دارد و فرایندپذیری و قالب‌گیری آن بسیار آسان است. مجموعه این ویژگی‌ها باعث شده‌است که در گستره وسیعی از صنایع مورد استفاده قرار گیرد [۳، ۴].

ساختار مولکولی PDMS با پیوندهای Si–O–Si عامل اصلی بسیاری از ویژگی‌های ممتاز آن است. این ماده علاوه بر انعطاف‌پذیری و چگالی پایین، غیرسمی و مقاوم در برابر شعله بوده و از پایداری حرارتی و الکتریکی بالایی برخوردار است. همچنین مقاومت در برابر پرتو فرابنفش، شفافیت و جذب نوری اندک، آن را برای کاربردهای نوری و لیزری مناسب ساخته است [۵]. از نظر سطحی نیز PDMS دارای انرژی سطحی پایین و خاصیت آب‌گریزی است، اما این سطح به‌راحتی با روش‌های مختلف (مانند پلاسما یا وارد کردن گروه‌های عاملی) قابل اصلاح و مهندسی است [۶].

ویژگی‌های منحصربه‌فرد اسفنج PDMS باعث شده به‌عنوان گزینه‌ای جذاب و چندمنظوره مطرح شود و نقشی پررنگ در طراحی و گسترش مواد نوین با کاربردهای متنوع ایفا کند. این اسفنج‌ها علاوه بر دارا بودن ویژگی‌های گفته شده، قابلیت تولید از مسیرهای مختلف (قالب قربانی (Porogens)، امولسیون، شکل‌دهی با گاز و چاپ سه‌بعدی) و همچنین کنترل میزان و شکل تخلخل را دارند [۷].

با وجود این تنوع، پراکندگی نتایج و چالش‌های باقی‌مانده ضرورت مرور جامع در این زمینه را آشکار می‌سازد. هدف این مقاله، مروری جامع بر اسفنج‌های PDMS از منظر معرفی این مواد، بررسی روش‌های متداول ساخت، تحلیل ویژگی‌های برجسته و کاربرد آن‌هاست.

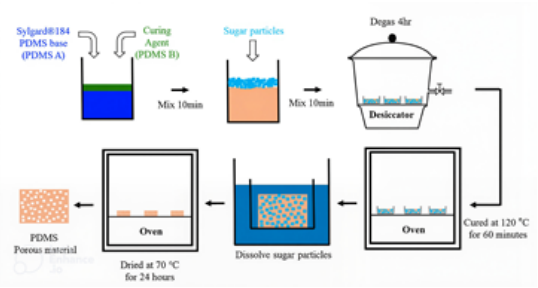
۲ روش‌های ساخت

اسفنج‌های PDMS از طریق مسیرهای سنتزی متنوعی قابل تهیه هستند که هر روش ساخت، ویژگی‌های خاصی از نظر تخلخل، یکنواختی ساختار و خواص سطحی ایجاد می‌کند که در ادامه، پنج روش اصلی برای سنتز این اسفنج‌ها معرفی و مرور می‌شود.

۲–۱ روش شست‌وشوی قالب سخت (قالب‌گیری با شکر / نمک)

در میان رویکردهای مختلف سنتز اسفنج‌های متخلخل PDMS، روش قالب‌سخت به‌دلیل سادگی، هزینه پایین و کارایی بالا، جایگاه ویژه‌ای یافته است. در این روش معمولاً از کیت کشسان سیلیکونی Sylgard ۱۸۴ به‌عنوان متداول‌ترین منبع تجاری PDMS استفاده می‌شود. این کیت شامل پیش‌پلیمر و عامل پخت است که در نسبت وزنی مرسوم ۱۰:۱ با یکدیگر مخلوط شده و پس از رسیدن به یکنواختی، بر روی قالب‌های جامدی نظیر مکعب‌های قند یا بلورهای نمک ریخته می‌شود. مخلوط حاصل تحت عملیات گاززدایی در خلأ قرار گرفته و سپس در شرایط دمایی کنترل‌شده فرایند پخت را طی می‌کند.

در ادامه، حذف انتخابی قالب‌های جامد با استفاده از حلال سازگار ـ که غالباً آب گرم به‌دلیل سهولت، ایمنی و ملاحظات زیست‌محیطی است؛ صورت می‌گیرد. در نتیجه‌ی این فرایند، شبکه سه‌بعدی متخلخل و به‌هم‌پیوسته از PDMS باقی می‌ماند که تخلخل آن به‌طور مستقیم به نوع و اندازه ذرات قالب بستگی دارد (شکل ۱). هرچند امکان به‌کارگیری مواد مختلفی همچون پودرهای اکسیدفلزی، فوم نیکل و ذرات پلیمری محلول وجود دارد، اما استفاده از قند و نمک به‌دلیل دسترسی بالا، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و ایمنی بیشتر نسبت به سایر قالب‌ها، کاربرد گسترده‌تری یافته است. از این‌رو، روش قالب سخت یکی از گزینه‌های مهم و پایدار برای تولید اسفنج‌های متخلخل PDMS در مقیاس‌های آزمایشگاهی و صنعتی محسوب می‌شود [۸، ۷، ۳].



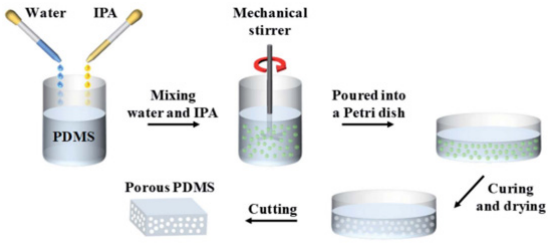
شکل ۱ فرایند سنتز اسفنج‌های پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با از طریق حذف قالب‌های تخلخل‌زا [۸].

۲-۲ روش امولیسیون

روش قالب امولسیونی (Emulsion Templating) یکی از روش‌های مهم برای ساخت اسفنج‌های متخلخل PDMS است که می‌تواند اندازه و میزان حفره‌ها را کنترل کند. در این روش، مخلوطی به نام امولسیون تهیه می‌شود که در آن قطرات آب (گاهی همراه با ایزوپروپانول برای بهتر مخلوط شدن) در ترکیب پایه‌ی PDMS همراه با عامل پخت (۱۰ به ۱) مخلوط و پخش می‌شوند. همزدن شدید یا استفاده از سطح فعال‌ها باعث می‌شود این قطرات آب شکل یکنواختی داشته باشند. در این فرایند، آب مثل قالب موقت عمل می‌کند و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، تخلخل یا میزان سوراخ‌های اسفنج نهایی هم بیشتر خواهد شد. پس از تشکیل امولسیون، مخلوط در قالب ریخته شده و تحت شرایط حرارتی کنترل‌شده پخت می‌شود تا شبکه سیلیکونی اطراف قطرات شکل گیرد. سپس با تبخیر یا شست‌وشوی قطرات آبی، ساختاری متخلخل، سبک و به‌هم‌پیوسته به دست می‌آید (شکل ۲) [۹]. همچنین عوامل مختلفی همچون سرعت همزدن، گرانروی فاز پیوسته و نسبت آب به PDMS، بر توزیع اندازه حفرات و ریزساختار نهایی مؤثر هستند [۱۰]. مزیت اصلی این روش در مقایسه با روش‌های مبتنی بر قالب‌های جامد (نظیر شکر یا نمک) این است که نیازی به حذف ذرات جامد وجود ندارد و کنترل دقیق‌تری بر مورفولوژی منافذ فراهم می‌شود.

۲-۳ روش شکل‌دهی با گاز

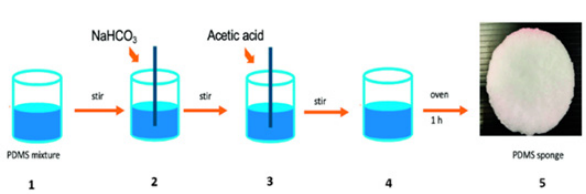
روش شکل‌دهی با گاز رویکردی ساده، کم‌هزینه و ایمن برای تولید اسفنج‌های متخلخل PDMS به‌شمار می‌رود که هم در کاربردهای صنعتی نظیر عایق‌کاری، ضربه‌گیری و آب‌بندی و هم در حوزه‌های زیست‌پزشکی از جمله داربست‌های مهندسی بافت قابل استفاده است. در این فرایند، حباب‌های گاز طی مرحله پخت درون پیش‌پلیمر PDMS ایجاد می‌شوند. این امر یا از طریق واکنش‌های شیمیایی مانند واکنش پیرس- روبینشتاین (واکنش آلکوکسی‌سیلان‌ها با هیدروسیلان‌ها که منجر به آزادسازی هیدروژن یا هیدروکربن‌های سبک می‌شود) رخ می‌دهد، یا با استفاده از عوامل تولیدکننده گاز مانند بی‌کربنات سدیم که در اثر گرما یا اسید، دی‌اکسیدکربن تولید می‌کنند (شکل ۳) [۱۱]. این حباب‌ها در حین پخت انبساط یافته و در شبکه سیلیکونی در حال سخت‌شدن به دام می‌افتند و پس از خروج گاز، ساختاری متخلخل و به‌هم‌پیوسته ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، می‌توان از قالب‌های جامد مانند بلورهای نمک به همراه روش اسفنج‌سازی گازی استفاده کرد تا منافذ بزرگ‌تر و یکنواخت‌تری ایجاد شوند؛ به این ترتیب پس از حل کردن این ذرات، اسفنج نهایی دارای اتصال بین‌حفره‌ای بهبودیافته خواهد بود [۱۲].



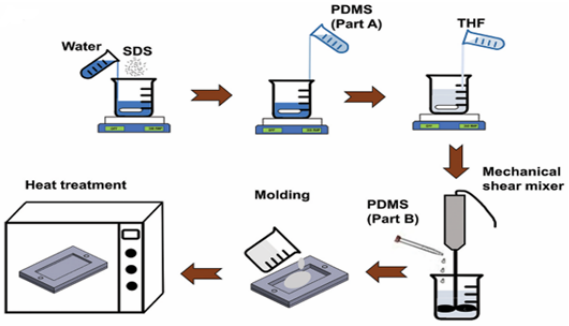
شکل ۲ تشکیل ساختار متخلخل PDMS از طریق امولسیون آب/ایزوپروپانول در PDMS [۹].

۲-۴ روش جداسازی فاز ناشی از تبخیر حلال

روش جداسازی فاز القاشده توسط تبخیر یکی از فنون ساخت اسفنج‌های متخلخل PDMS است که بر اساس پدیده‌ی جدایش فازی در حین تبخیر حلال عمل می‌کند. در این روش، ابتدا پیش‌پلیمر PDMS در حلال آلی فرار و غیرقابل اختلاط با آب (مانند هگزان یا تولوئن) حل می‌شود. گاهی غیرحلالی مانند اتانول نیز به مخلوط افزوده می‌شود تا فرایند جدایش فاز تسهیل شود. پس از تهیه محلول یکنواخت، آن را در قالب ریخته یا بر روی بستر دلخواه قرار می‌دهند. با آغاز تبخیر حلال در شرایط محیطی یا حرارتی کنترل‌شده، اختلاف در حلالیت میان PDMS و سامانه حلال‌غیرحلال باعث جدایش فازی می‌شود؛ بدین صورت که PDMS شبکه‌ی پیوسته‌ای تشکیل می‌دهد و فاز غنی از حلال به‌عنوان قالب موقت منافذ عمل می‌کند. با ادامه تبخیر، ساختار PDMS تثبیت شده و شکل متخلخل آن قفل می‌شود. در نهایت، حلال‌های باقی‌مانده با خشک کردن در دمای ملایم یا تحت خلأ حذف می‌شوند و اسفنج سبک، ارتجاعی و دارای ساختار سلول باز به دست می‌آید. اندازه و توزیع منافذ در این روش به عواملی مانند نوع و نسبت حلال به غیرحلال، سرعت تبخیر و غلظت پلیمر بستگی دارد [۷، ۱۳-۱۵].



شکل ۳ طرح‌واره فرایند تولید فوم PDMS: (۱) مخلوط پیش‌پلیمر و عامل پخت، (۲) افزودن بی‌کربنات سدیم، (۳) افزودن اسیداستیک، (۴) پخت درون آون، (۵) فوم نهایی PDMS [۱۱].

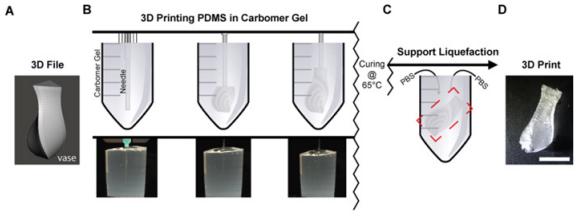


شکل ۴ تشکیل PDMS با استفاده از THF [۱۴].

۲-۵ چاپ سه‌بعدی

روش چاپ سه‌بعدی به‌عنوان یکی از رویکردهای نوظهور در ساخت اسفنج‌های متخلخل PDMS شناخته می‌شود که امکان کنترل دقیق بر توپولوژی یا مورفولوژی داخلی ساختار را فراهم می‌سازد با این حال، چاپ مستقیم PDMS به‌دلیل ویژگی‌های فیزیکی خاص آن در حالت پیش‌پلیمر با چالش‌هایی همراه است. یکی از چالش‌های اصلی، گرانروی پایین و مدول کشسانی محدود پیش‌پلیمر است که می‌تواند منجر به فروپاشی یا تغییر شکل ساختار چاپ‌شده شود.

برای غلبه بر این محدودیت، استفاده از بسترهای پشتیبان مانند ژل کاربومر (Carbomer) پیشنهاد شده است. در این روش، ژل هنگام عبور از افشانک موقتاً نرم شده و اجازه حرکت می‌دهد، اما بلافاصله پس از اکستروژن PDMS به‌عنوان تکیه‌گاه جامد عمل کرده و از ساختار پشتیبانی می‌کند. پس از چاپ و پخت، ژل به‌سادگی با محلول نمکی بافر فسفات شسته و حذف می‌شود، بدون آنکه به نمونه آسیبی برسد [۱۷، ۱۶].



شکل ۵ (A) فایل سه‌بعدی از گلدان وارد نرم‌افزار شده است (B) فایل سه‌بعدی به‌صورت لایه‌به‌لایه از PDMS تعبیه‌شده درون حمام پشتیبان کاربوپول توسط یک چاپگر سه‌بعدی مبتنی بر سرنگ بازسازی می‌گردد (بالا) نمایشی از فرایند چاپ را نشان می‌دهد (پایین) تصویری واقعی از گلدان چاپ‌شده از PDMS درون کاربوپول ارائه شده است؛ به‌دلیل شباهت ضریب شکست PDMS و کاربوپول، مشاهده گلدان دشوار است. (C) شسته شدن حمام کاربوپول با افزودن کاتیون‌های تک‌ظرفیتی پس از پخت PDMS تعبیه‌شده (D) پس از مایع‌سازی حمام پشتیبان، نمونه چاپ‌شده قابل جداسازی است [۱۶].

۳ ویژگی‌های کلیدی اسفنج پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS)

ویژگی‌های کلیدی اسفنج‌های PDMS ناشی از ترکیب دو عامل اصلی است: از یک‌سو ساختار اسفنجی و متخلخل آن‌ها که باعث سبکی، جذب بالا و سطح ویژه زیاد می‌شود، و از سوی دیگر خواص ذاتی پلیمر PDMS مانند آب‌گریزی، انعطاف‌پذیری، شفافیت و پایداری شیمیایی که عملکرد و گستره کاربردهای این اسفنج‌ها را به شکل چشمگیری گسترش می‌دهد که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته‌ایم.

۳-۱ آب‌گریزی و روغن‌دوستی

پدیده‌ی آب‌گریزی اصولاً ناشی از دو عامل اصلی است: نخست وجود ساختارهای میکرو-نانویی بر سطح ماده و دوم پایین بودن انرژی سطحی [۱۸]. در این میان، PDMS به‌طور ذاتی دارای انرژی سطحی بسیار پایین است که به گروه‌های متیل (CH_3) موجود در زنجیره‌اش بازمی‌گردد. این گروه‌ها ماهیتی غیرقطبی دارند و تمایلی به برهم‌کنش با مولکول‌های آب نشان نمی‌دهند؛ در نتیجه، حتی بدون اصلاح سطحی هم اسفنج PDMS ذاتاً آب‌گریز است [۱۱].

از سوی دیگر، ساختار اسفنجی متخلخل PDMS با شبکه‌ای از خلل‌وفرج به همراه همین انرژی سطحی پایین باعث تقویت خاصیت آب‌گریزی می‌شود (شکل ۶). این ویژگی ترکیبی منجر به ایجاد زاویه تماس بالای قطرات آب با سطح و دفع مؤثر آن‌ها می‌شود. در کاربردهای صنعتی، چنین رفتاری بسیار ارزشمند است؛ زیرا اسفنج‌های PDMS را به گزینه‌ای جذاب و کارآمد برای جداسازی نفت از آب، تصفیه پساب‌های آلوده به هیدروکربن و کاربردهای زیست‌محیطی تبدیل کرده است [۱۹].

۳-۲ چگالی پایین

اسفنج‌های PDMS به واسطه‌ی ساختار متخلخل و وجود

شکل ۶ آب‌گریزی اسفنج PDMS در تماس با مخلوط آب و نفت [۱۹].

شبکه‌ای گسترده از حفره‌ها، دارای چگالی بسیار پایین هستند. در این ساختار، بخش عمده‌ی حجم توسط فضاهای خالی اشغال شده و بدین ترتیب نسبت جرم به حجم به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. روش‌های متداول سنتز این اسفنج‌ها شامل استفاده از قالب‌های جامدی نظیر نمک یا قند و همچنین امولسیون‌های پایه‌آب به‌عنوان عامل تخلخل‌زا هستند که پس از حذف، شبکه‌ای سه‌بعدی از حفره‌های به‌هم‌پیوسته باقی می‌گذارد. در نتیجه، چگالی اسفنج‌های PDMS می‌تواند تا حدود (۰/۴–۰/۳ g/cm³) کاهش یابد [۲۰–۲۲]. چنین چگالی پایینی در کنار انعطاف‌پذیری و پایداری مکانیکی، این مواد را به گزینه‌ای بسیار جذاب برای کاربردهایی همچون جداسازی نفت از آب، عایق‌کاری حرارتی و ساخت حسگرهای مکانیکی حساس تبدیل می‌کند.

۳–۳ انعطاف‌پذیری

انعطاف‌پذیری زنجیره‌های PDMS ناشی از ویژگی‌های ساختاری ستون فقرات سیلوکسانی آن است. زاویه‌ی باز پیوند Si–O–Si (حدود ۱۴۳–۱۵۰ درجه) جدایی مناسبی میان گروه‌های جانبی دی‌متیل ایجاد کرده و مانع از تراکم زنجیره‌ای می‌شود [۲۳–۲۵]. علاوه بر این، قرارگیری متناوب اتم‌های اکسیژن، امکان جانشینی گروه‌های اضافی را محدود کرده و انرژی چرخش اطراف ستون فقرات را به مقدار بسیار کمی (۳/۳ kJ/mol) کاهش می‌دهد؛ مقداری که به‌مراتب کمتر از انرژی چرخش در پیوندهای کربن–کربن پلیمرهای آلی متداول مانند پلی‌اتیلن‌گلیکول (۱۳/۸ kJ/mol) است [۲۶]. این عوامل در مجموع باعث می‌شوند زنجیره‌های PDMS از انعطاف‌پذیری فوق‌العاده و توانایی بازآرایی سریع به حالت کمینه انرژی خود برخوردار باشند. انعطاف‌پذیری ذاتی زنجیره‌های PDMS، همراه با چگالی پایین و زیست‌سازگاری، این ماده را به گزینه‌ای ایده‌آل برای ساخت حسگرهای فشار و کرنش در تجهیزات پوشیدنی تبدیل کرده است [۲۷].

۳–۴ پایداری شیمیایی و حرارتی

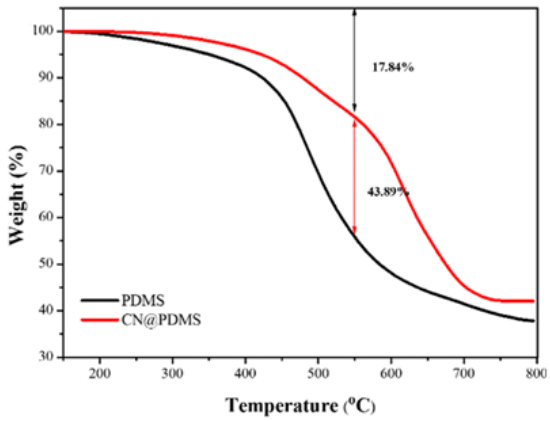
اسفنج‌های PDMS به‌دلیل ساختار ویژه زنجیره‌ی اصلی Si–O–Si از پایداری حرارتی و شیمیایی بالایی برخوردارند. انرژی پیوند Si–O (۴۵۰ kJ/mol) به‌مراتب بیشتر از پیوندهای C–C (۳۰۴ kJ/mol) یا C–O (۳۵۸ kJ/mol) در پلیمرهای آلی متداول است [۲۸]. این موضوع موجب می‌شود PDMS حتی در دماهای بالا (تا حدود ۲۰۰–۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) خواص مکانیکی و عملکرد خود را حفظ کند [۲۹]. علاوه بر این، اسفنج‌های PDMS در برابر بسیاری از حلال‌های آلی و محیط‌های شیمیایی خورنده (نظیر اسیدهای رقیق و بازها) مقاوم هستند و دچار تخریب یا انحلال نمی‌شوند [۳۰].

این سطح از پایداری حرارتی و شیمیایی، در کنار ویژگی‌هایی چون آب‌گریزی و انعطاف‌پذیری، باعث شده است که اسفنج‌های PDMS برای کاربردهایی نظیر جذب و جداسازی نفت از آب، صافش در محیط‌های خورنده، عایق‌کاری حرارتی گزینه‌ای مناسب باشد.

در پژوهشی که با هدف بررسی پایداری حرارتی اسفنج‌های PDMS اصلاح‌شده با نانومواد کربنی انجام شد، پایداری نمونه‌ی خالص PDMS نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمون گرماوزنی (TGA) نشان داد که اسفنج PDMS حتی در حالت خالص نیز از پایداری حرارتی قابل‌توجهی برخوردار است و کاهش وزن آن تنها در دماهای نسبتاً بالا آغاز می‌شود (شکل ۷) [۲۹].

۳–۵ زیست‌سازگاری و غیرسمی‌بودن

اسفنج‌های PDMS به‌دلیل داشتن ترکیب سیلوکسانی (Si–O–Si) و گروه‌های متیل غیرقطبی جانبی، علاوه بر خواص فیزیکی و شیمیایی ممتاز، دارای زیست‌سازگاری و ماهیت غیرسمی نیز هستند [۳۱]. این ساختار موجب می‌شود اسفنج‌های PDMS از نظر شیمیایی بی‌اثر باشند و در تماس مستقیم با محیط‌های زیستی و فیزیولوژیک واکنش نامطلوبی ایجاد نکنند. ویژگی‌هایی همچون پایداری شیمیایی، نفوذپذیری مناسب به گازها و شفافیت نوری سبب می‌شوند که اسفنج‌های PDMS برای کاربردهای زیست‌پزشکی ایمن تلقی شوند [۳۲]. به‌ویژه در مطالعات اخیر گزارش شده است که اسفنج‌های



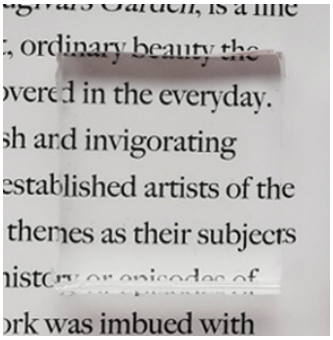
شکل ۷ آزمون گرماوزنی (TGA) اسفنج PDMS خالص و اسفنج کامپوزیتی حاوی نانوصفحه‌های کربن‌نیترید (CN) [۲۹].

متخلخل PDMS می‌توانند در مجاورت سلول‌های زنده مورد استفاده قرار گیرند و همین امر موجب کاربرد گسترده‌ی آن‌ها در زمینه‌هایی مانند مهندسی بافت، دارورسانی کنترل‌شده، سامانه‌های میکروسیالی (Microfluidic) و کاشتینه‌های زیستی شده است [۳۳].

۳–۶ شفافیت نوری و جذب نوری کم

اسفنج‌های PDMS علاوه بر خواص مکانیکی و شیمیایی مطلوب، دارای شفافیت نوری بالا و جذب نوری بسیار اندک هستند (شکل ۸). این ویژگی‌ها ریشه در ساختار شیمیایی و فیزیکی PDMS دارند. نخست، ستون فقرات سیلوکسانی (Si–O–Si) و گروه‌های جانبی متیل (CH_3) فاقد هرگونه گروه کروموفور (Chromophore)) هستند؛ ازاین‌رو در محدوده‌ی مرئی (nm ۴۰۰–۷۰۰) تقریباً هیچ جذبی رخ نمی‌دهد. مطالعات نشان داده که اسفنج‌های متخلخل PDMS میانگین جذب نوری کمتر از ۰٫۰۷ دارند، در حالی که نمونه‌های خالص PDMS جذب بیشتری (~۰٫۱۲) نشان می‌دهند [۳۴]. دوم، گزارش‌های اخیر نشان داده‌اند که PDMS در بازه‌ی گسترده‌ی ۲۴۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر شفاف است، که دلیل آن گذارهای الکترونی در پیوند Si–O است که عمدتاً در ناحیه فرابنفش رخ می‌دهند [۲]. سوم، ضریب شکست PDMS (n=۱/۴۱) نزدیک به شیشه است که موجب کاهش پراکندگی نور و افزایش شفافیت نوری می‌شود [۳۵]. همچنین این اسفنج‌ها به‌دلیل دارا بودن پیوندهای قوی Si–O در برابر پرتو فرابنفش مقاوم هستند [۳۶].

علاوه بر این، در ساختار متخلخل اسفنج‌های PDMS ، هرچند تخلخل بالا وجود دارد، دیواره‌های سلولی از همان PDMS شفاف ساخته شده‌اند. بنابراین، در این ساختار جذب نوری رخ نمی‌دهد و تنها مقدار اندکی پراکندگی مشاهده می‌شود [۳۷]. این خصوصیات موجب می‌شود که اسفنج‌های PDMS در کنار شفافیت و جذب پایین نور، گزینه‌ای ایده‌آل برای



شکل ۸– شفافیت PDMS به‌صورت توده [۳۶].

کاربردهای نوری، میکروسیالات (Microfluidic) نوری، ریزلنزها و سامانه‌های تصویربرداری زیستی باشند.

۳–۷ خاصیت صوتی

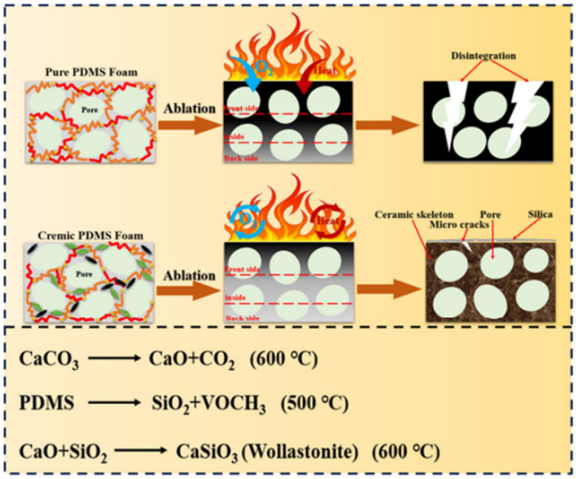
جذب صدا در مواد متخلخل برای عایق‌کاری صوتی، حسگرها و کاربردهای زیرآبی اهمیت زیادی دارد. اسفنج‌های متخلخل PDMS به‌دلیل داشتن شبکه‌ای از حفره‌ها و تخلخل بالا و همچنین به‌دلیل ماهیت گرانروکشسان و همسان‌گردی (Isotropic) خود پلیمر، می‌تواند بخشی از انرژی امواج صوتی را جذب کرده و باعث تضعیف آن‌ها شود [۳۸]. به‌طور مشخص، آزمایش‌ها نشان دادند که این اسفنج‌های متخلخل در بازه‌ی ۲۰۰ تا ۴۰۰ هرتز و همچنین ۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰ هرتز نسبت به نمونه‌های غیرمتخلخل عملکرد بهتری در جذب صوت دارند [۳۹]. علاوه بر این، پژوهش‌های جدیدتر نشان داده‌اند که ترکیبات PDMS می‌توانند طوری طراحی شوند که امپدانس صوتی آن‌ها تقریباً برابر با آب باشد. در این حالت، بازتاب صدا تقریباً به صفر می‌رسد و ماده می‌تواند در بازه‌ی بسامد گسترده‌ای (از ۰٫۵ تا ۶ مگاهرتز) صدا را به‌طور مؤثر جذب کند [۴۰].

۳–۸ خاصیت ضداحتراق

خاصیت ضداحتراق در پلیمرها اهمیت زیادی دارد، زیرا بیشتر پلیمرهای آلی به‌راحتی می‌سوزند و در برابر حرارت پایدار نیستند و همین موضوع استفاده‌ی آن‌ها را در صنایع مختلف از نظر ایمنی با محدودیت جدی مواجه می‌کند. اسفنج‌های PDMS به‌دلیل داشتن ترکیب (Si–O–Si) در زنجیره اصلی خود و انرژی بالای پیوندهای آن (۴۵۰ kJ/mol) از پایداری حرارتی بالایی برخوردارند [۲۸]. هنگام تماس با شعله، بخشی از ساختار PDMS به لایه‌ای از سیلیکا (SiO2) تبدیل می‌شود که مانند سپر محافظ عمل کرده و مانع رسیدن اکسیژن و گسترش شعله می‌شود [۴۱].علاوه بر این، افزودن پرکننده‌های معدنی مانند CaCO3 یا نانوذرات اکسید فلزی می‌تواند مقاومت در برابر آتش را بیشتر کرده و انتشار دود و گازهای سمی را کاهش دهد (شکل ۹) [۲۰]. این ویژگی‌ها باعث شده است اسفنج‌های PDMS گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی مانند عایق‌کاری حرارتی، پوشش‌های مقاوم در برابر آتش و صنایع الکترونیک باشند.

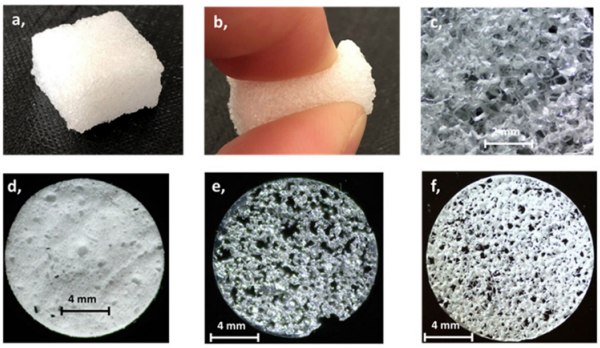
۳–۹ قابلیت مهندسی مورفولوژی و تخلخل در اسفنج‌های PDMS

یکی از مهم‌ترین خصوصیات اسفنج‌های PDMS ، امکان کنترل



شکل ۹ سازوکار ضداحتراق کامپوزیت‌های اسفنجی PDMS حاوی $CaCO_3$ [۲۰].

دقیق شکل، اندازه حفره‌ها و میزان تخلخل آن‌هاست. این قابلیت به‌دلیل سازگاری شیمیایی و انعطاف‌پذیری بالا در روش‌های مختلف ساخت از جمله قالب‌برداری سخت، قالب امولسیونی، اسفنج‌سازی گازی و چاپ سه‌بعدی حاصل می‌شود. با تغییر پارامترهایی مانند نسبت فازها، سرعت تبخیر یا شدت هم‌زدن، نسبت پلیمر به قالب‌ها، شرایط فشار و دما و طراحی هندسی در فرایند چاپ سه‌بعدی می‌توان ساختار و مورفولوژی نهایی اسفنج را مطابق نیازهای کاربردی تنظیم و بهینه‌سازی کرد [۴۳، ۴۲، ۱۱]. این کنترل‌پذیری موجب می‌شود تا اسفنج‌های PDMS با تخلخل بالا و ساختارهای به‌هم‌پیوسته برای کاربردهایی مانند جذب و جداسازی و یا با منافذ کوچک‌تر و یکنواخت‌تر برای استفاده در سامانه‌های میکروسیالی و داربست‌های مهندسی بافت بهینه‌سازی شوند [۴۵, ۴۶].



شکل ۱۰ (a, b) تصاویر اسفنج‌های PDMS ساخته‌شده با استفاده از مکعب قند به‌عنوان قالب فداشونده میکروتصویرهای نوری برش‌های نازک اسفنج‌های PDMS تهیه‌شده با قالب‌های مختلف: (c) مکعب قند، (d) پودر قند، (e) شکر دانه‌ای و (f) NaCl فشرده [۴۴].

۳-۱۰ عایق الکتریکی

اسفنج‌های خالص PDMS ذاتاً عایق الکتریکی هستند و هدایت الکتریکی ندارند. دلیل این موضوع به ساختار شیمیایی PDMS بازمی‌گردد؛ زنجیره اصلی آن از پیوندهای سیلوکسانی (Si–O–Si) و گروه‌های جانبی متیل تشکیل شده است که الکترون‌های آزاد یا مسیرهای پیوسته برای رسانش بار الکتریکی در آن وجود ندارد. در نتیجه، مقاومت ویژه‌ی PDMS بسیار بالا بوده و در محدوده‌ی ۱۰۱۲ Ω·cm یا بیشتر قرار می‌گیرد [۴۷].

برای ایجاد رسانایی، معمولاً از پرکننده‌های هادی مانند نانولوله‌های کربنی (CNTs)، گرافن یا نانوذرات فلزی استفاده می‌شود. این مواد درون شبکه‌ی متخلخل اسفنج پراکنده شده و با تشکیل مسیرهای رسانش، مقاومت الکتریکی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهند. چنین اصلاحاتی امکان تولید اسفنج‌های رسانا را فراهم می‌کند که برای حسگرهای فشار و کرنش و کاربردهای الکترونیکی انعطاف‌پذیر بسیار ارزشمند هستند [۱۲].

۳-۱۱ رسانایی حرارتی

اسفنج متخلخل PDMS به‌دلیل ساختار اسفنجی و پر از حفره‌ی خود، دارای رسانایی حرارتی بسیار پایینی هستند. رسانایی حرارتی اسفنج‌های PDMS به‌شدت به ریزساختار آن‌ها وابسته است؛ سلول‌های کوچک‌تر و متراکم‌تر و همچنین چگالی پایین‌تر موجب کاهش انتقال حرارت و در نتیجه کاهش رسانایی حرارتی می‌شوند، در حالی‌که سلول‌های باز تمایل به افزایش آن دارند، سلول‌های بسته اثر معکوس دارند [۴۸] رسانایی حرارتی گزارش‌شده برای اسفنج‌های خالص PDMS معمولاً ۰/۲(W/m·K) در نظر گرفته می‌شود که کمتر از بسیاری از پلیمرهای متراکم است [۴۹].

از سوی دیگر، این رسانایی حرارتی را می‌توان با افزودن پرکننده‌های رسانا مانند (CNTs)، گرافن یا ذرات فلزی تغییر داد. در چنین شرایطی، مسیرهای رسانش حرارتی درون شبکه‌ی متخلخل شکل گرفته و هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. این ویژگی امکان طراحی اسفنج‌های PDMS با عملکردهای دوگانه را فراهم می‌کند؛ به‌طوری‌که بسته به کاربرد، می‌توان آن‌ها را به‌عنوان عایق حرارتی سبک‌وزن یا به‌عنوان جاذب‌های حرارتی و مواد با قابلیت انتقال حرارت بالا مورد استفاده قرار داد [۴۹].

۴ کاربردهای اسفنج PDMS

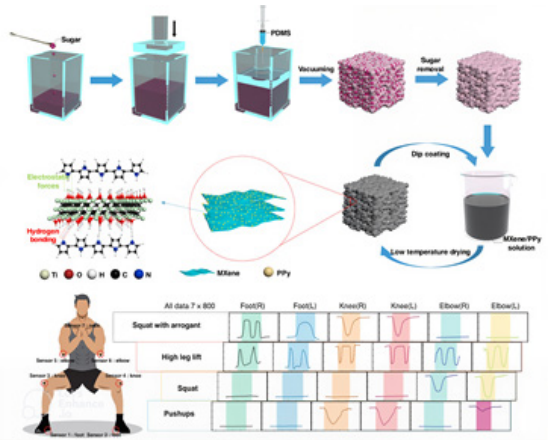
از جمله کاربردهای اسفنج PDMS می‌توان به حسگرها، جداسازی نفت از آب، نانوژنراتورها و کاربردهای زیستی اشاره کرد.

۴-۱ حسگرها

اسفنج‌های PDMS به‌دلیل ساختار متخلخل، انعطاف‌پذیری بالا، قابلیت فشرده‌سازی مناسب و پایداری مکانیکی، به‌طور گسترده در ساخت حسگرهای فشار و کرنش مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ماده به‌صورت ذاتی عایق الکتریکی است، اما با افزودن پرکننده‌های رسانا مانند نانوسیم‌های نقره، نانولوله‌های کربنی (CNTs)، نانوالیاف کربنی (CNFs) و گرافن، به ماده‌ای هوشمند و قابل‌حس تبدیل می‌شود. این ترکیبات موجب ایجاد مسیرهای رسانای پیوسته درون ساختار اسفنج شده و امکان تبدیل تغییرات فشار و کرنش به علایم الکتریکی را فراهم می‌سازند. افزون بر این، بهبود هم‌زمان خواص مکانیکی و الکتریکی از طریق این افزودنی‌ها باعث افزایش حساسیت و پایداری عملکرد حسگر می‌شود [۵۰].

در یکی از پژوهش‌های اخیر در سال ۲۰۲۳، هوی ژیا (Hui Xia) و همکاران کامپوزیت جدیدی از میکسین (MXene) و پلی‌پیرول (Polypyrrole) به روش پلیمری‌شدن درجا تهیه و بر روی اسفنج PDMS پوشش دادند تا حسگر فشار-مقاومتی MXene/PPy@PDMS (MPP) تولید شود (شکل ۱۱). وجود هم‌زمان این دو ماده در ساختار کامپوزیت، به‌دلیل تسهیل انتقال الکترون‌ها و ایجاد اثرات هم‌افزایشی، موجب شد حساسیت حسگر MPP حداقل پنج برابر بیشتر از حسگرهای ساخته‌شده با هر یک از این مواد به‌صورت جداگانه باشد [۵۱].

ساختار متخلخل اسفنج PDMS موجب حفظ پایداری عملکرد الکتریکی حسگر در بازه وسیعی از فشارها شد. این ویژگی برجسته نشان می‌دهد که خود اسفنج، به‌عنوان بستر اصلی، نقش کلیدی در انعطاف‌پذیری، پایداری و کارایی بالای حسگرهای فشار و پوشیدنی ایفا می‌کند.



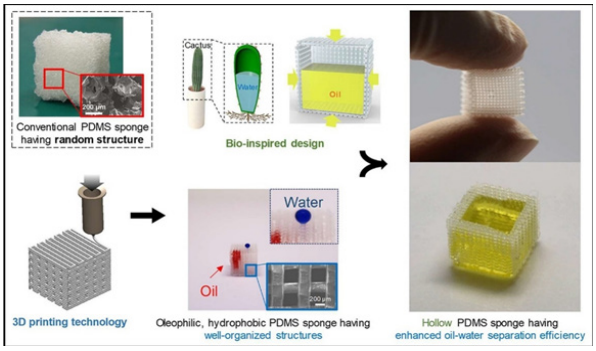
شکل ۱۱ سنتز حسگر فشار-مقاومتی MXene/PPy@PDMS (MPP) و استفاده از این حسگر بر روی مفاصل بدن [۵۱].

۴-۲ جداسازی نفت از آب

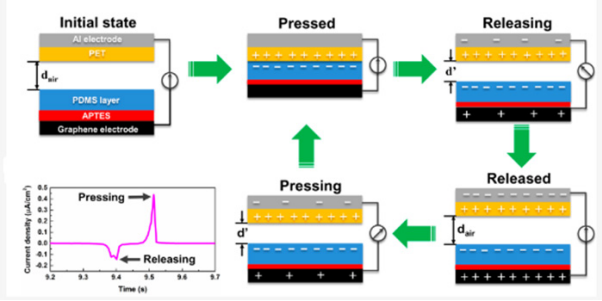
اسفنج PDMS به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، گزینه‌ای بسیار مناسب و رایج برای جداسازی نفت از آب به شمار می‌رود. این ماده به‌طور ذاتی آب‌گریز و روغن‌دوست است؛ به این معنا که تمایل زیادی به جذب نفت و حلال‌های آلی دارد و در عین حال آب را دفع می‌کند. چنین ویژگی‌ای باعث می‌شود هنگام تماس با مخلوط نفت و آب، به‌سرعت و به‌طور انتخابی، نفت را جذب کرده و آب را از خود عبور دهد یا پس بزند. علاوه بر این، ساختار اسفنجی و متخلخل پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان سطح تماس وسیعی در اختیار آن قرار می‌دهد که این امر ظرفیت جذب نفت را به‌میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد، به‌گونه‌ای که می‌تواند چندین برابر وزن خود، نفت یا حلال‌های آلی را درون ساختار خود جای دهد [۵۲].

۴-۳ نانو ژنراتورها

با پیشرفت فناوری‌های پوشیدنی و شبکه‌های حسگر بی‌سیم، نیاز به منابع انرژی قابل‌انعطاف و کارآمد بیشتر شده است. یکی از روش‌های جدید برای تولید انرژی، نانوژنراتورهای تریبوالکتریک (Triboelectric Nanogenerators) هستند که با استفاده از اصطکاک بین دو ماده، برق تولید می‌کنند. این دستگاه‌ها سبک، ساده و ارزان هستند و می‌توانند برای حسگرهای پوشیدنی و دستگاه‌های کوچک به کار روند. در ساخت این نانوژنراتورها، از مواد مختلفی استفاده می‌شود که یکی از بهترین آن‌ها پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان است. پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به‌دلیل داشتن انعطاف بالا، قابلیت جذب بار الکتریکی و سازگاری با بدن انسان، خیلی محبوب است [۵۰].



شکل ۱۲ اسفنج‌های PDMS با طراحی الهام‌گرفته از طبیعت، تولید شده با قالب‌های چاپ سه‌بعدی به‌منظور بهبود ظرفیت جداسازی نفت از آب [۵۲].



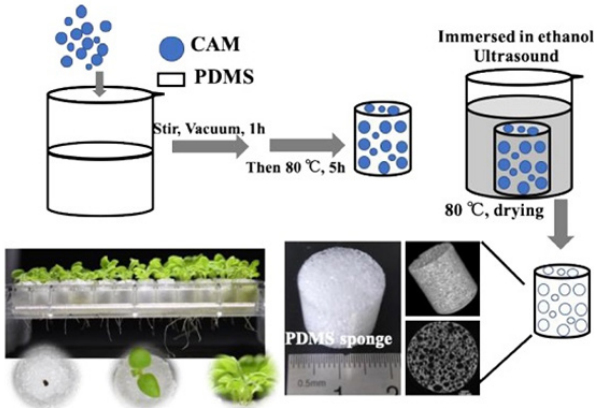
شکل ۱۳ چرخه‌ای از علامت جریان خروجی تولیدشده توسط TENG مبتنی بر اسفنج PDMS، همراه با مدل نظری و سازوکار پیشنهادی تولید بار [۵۳].

به‌عنوان نمونه‌ای از کاربرد اسفنج‌های PDMS در نانوژنراتورهای تریبوالکتریک، در پژوهش هابتامو گبیاهو منگ (Habtamu Geb-eyehu Menge) و تیمشان در سال ۲۰۰۲، از نانوذره‌های گرافن (Graphene Nanoparticles) برای بهبود خواص این اسفنج‌ها استفاده شد. در این طرح، اسفنج اصلاح‌شده‌ی GNP-PDMS با استفاده از ماده‌ی پیونددهنده‌ی ۳-آمین‌وپروپیل‌اتوکسی‌سیلان (APTES) به الکترود چندلایه از پلی‌وینیل‌الکل (PVA) و گرافن ترکیب‌شده با پلی(۴-استایرن‌سولفونیک‌اسید) (PSS) متصل شد (شکل ۱۳). نتایج نشان داد که افزودن مواد رسانا مانند گرافن می‌تواند عملکرد الکتریکی اسفنج‌های PDMS را به شکل قابل‌توجهی بهبود دهد. این یافته نشان می‌دهد که اسفنج‌های PDMS گزینه‌ای مناسب برای ساخت نانوژنراتورهای انعطاف‌پذیر و قابل‌حمل هستند [۵۳].

۴-۴ کاربردهای زیستی

اسفنج‌های PDMS به‌دلیل ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی منحصربه‌فرد، کاربرد گسترده‌ای در علوم زیستی و مهندسی مواد پیدا کرده‌اند. این ماده دارای پایداری شیمیایی بالا، مقاومت مناسب در برابر تجزیه زیستی، نفوذپذیری مطلوب به گازها و شفافیت نوری است و به‌دلیل ساختار کشسان خود، قابلیت انعطاف و تغییر شکل بالایی دارد. علاوه بر این، قابلیت قالب‌گیری آسان و تولید قطعات با ریزساختارهای دقیق از دیگر ویژگی‌های کلیدی اسفنج PDMS به شمار می‌روند که آن را برای استفاده در سامانه‌های زیستی مناسب می‌سازد [۵۴].

در سال ۲۰۲۰ فنگ چن (Feng Chen) و همکاران در پژوهشی اسفنج PDMS با استفاده از سیتریک‌اسیدمونوهیدرات (Citric Acid Monohydrate) به‌عنوان قالب تهیه شد تا ساختار متخلخل



شکل ۱۴ ساخت اسفنج PDMS با استفاده از قالب‌های CAM به‌عنوان محیطی برای شبیه‌سازی خاک و رشد گیاه [۵۵].

خاک برای کاربردهای زیستی شبیه‌سازی شود. تخلخل و توزیع اندازه منافذ از طریق تنظیم نسبت قالب و اصلاح سطح با Aminopropyltriethoxysilane-3 انجام شد. نتایج نشان داد که این نوع اسفنج می‌تواند به‌عنوان بستری سه‌بعدی و انعطاف‌پذیر برای شبیه‌سازی محیط‌های طبیعی و بررسی فرایندهای زیستی مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۱۴) [۵۵].

۵ نتیجه‌گیری

اسفنج‌های PDMS به‌عنوان دسته‌ای از مواد پلیمری سبک، منعطف و پایدار، در سال‌های اخیر توجه زیادی در تحقیقات علمی و کاربردهای صنعتی به خود جلب کرده‌اند. مرور روش‌های مختلف ساخت نشان داد که امکان کنترل ساختار متخلخل و بهبود ویژگی‌های سطحی این اسفنج‌ها فراهم است و همین موضوع سبب افزایش کارایی آن‌ها در حوزه‌های مختلف صنعتی، زیست‌پزشکی و زیست‌محیطی شده است

اگر چه برخی چالش‌ها مانند هزینه‌ی بالای تولید در مقیاس صنعتی، نیاز به بهبود دوام در محیط‌های خشن و توسعه‌ی روش‌های ساده‌تر ساخت همچنان وجود دارد ولی در مجموع، می‌توان گفت که اسفنج‌های PDMS نه‌تنها در حوزه‌های محیط‌زیستی و انرژی جایگاه مهمی یافته‌اند، بلکه با توسعه‌ی فناوری‌های نوین ساخت و اصلاح سطح، ظرفیت بالقوه‌ای برای ورود به حوزه‌های پیشرفته‌تر همچون مهندسی زیستی و پزشکی نیز دارند.

مراجع

1. Ding, S.-Y., Wang, W., "Covalent Organic Frameworks (COFs): from Design to Applications", *Chemical Society Reviews, 42, 548-68,* **2013.**
2. Li, S., Zhang, J., He, J., Liu, W., Wang, Y., Huang, Z., et al., "Functional PDMS Elastomers: Bulk Composites, Surface Engineering, and Precision Fabrication", *Advanced Science, 10, 2304506,* **2023.**
3. González-Rivera, J., Iglio, R., Barillaro, G., Duce, C., Tinè, M. R., "Structural and Thermoanalytical Characterization of 3D Porous PDMS Foam Materials: the Effect of Impurities Derived from a Sugar Templating Process", *Polymers, 10, 616,* **2018.**
4. Ariati, R., Sales, F., Souza, A., Lima, R. A., Ribeiro, J., "Polydimethylsiloxane Composites Characterization and its Applications: a Review", Polymers, 13, 4258, 2021.
5. Yilgör, E., Yilgör, I., "Silicone Containing Copolymers: Synthesis, Properties and Applications", *Progress in Polymer Science, 39, 1165-95,* **2014.**
6. Chen, I.-J., Lindner, E., "The Stability of Radio-Frequency Plasma-Treated Polydimethylsiloxane Surfaces", *Langmuir, 23, 3118-22,* **2007.**
7. Zhu, D., Handschuh-Wang, S., Zhou, X., "Recent Progress in Fabrication and Application of Polydimethylsiloxane Sponges", *Journal of Materials Chemistry A, 5, 16467-97,* **2017.**
8. Wang, C.-J., Kuan, W.-F., Lin, H.-P., Shchipunov, Y. A., Chen, L.-J., "Facile Hydrophilic Modification of Polydimethylsiloxane-Based Sponges for Efficient Oil–Water Separation", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 96, 144-55,* **2021.**
9. Kwak, Y., Kang, Y., Park, W., Jo, E., Kim, J., "Fabrication of Fine-Pored Polydimethylsiloxane Using an Isopropyl Alcohol and Water Mixture for Adjustable Mechanical, Optical, and Thermal Properties", *RSC Advances, 11, 18061-7,* **2021.**
10. Lee, S., Lee, G., Ryu, J., Lee, D. W., "Surfactant-Free, Spray-Assisted Water Droplet Templating for Efficient Fabrication of Ultraviolet-Curable Polydimethylsiloxane Sponge as a Reusable Oil Cleanup Sorbent"**,** *Chemical Engineering Journal, 488, 150958,* **2024.**
11. Alatawi, L., Abdullah, A. H., Jamil, S. N. A. M., Yunus, R., "A Facile and Green Synthesis of Hydrophobic Polydimethylsiloxane Foam for Benzene, Toluene, and Xylene Removal", *Separations, 10, 377,* **2023.**
12. Hong, S., Kim, H., Qaiser, N., Baumli, P., Hwang, B., "A Review of Recent Progress in Fabrication Methods and Applications of Polydimethylsiloxane Sponge", *Journal of Natural Fibers, 20, 2264497,* **2023.**
13. Abshirini, M., "Synthesis and Characterizations of Lightweight, Highly Flexible Porous Polydimethylsiloxane (PDMS) Structures with Piezoresistive Strain Sensing Capabilities Using Solvent Evaporation Technique" Oklahoma, **2022.**
14. Jung, S., Kim, J. H., Kim, J., Choi, S., Lee, J., Park, I., et al., "Reverse-Micelle-Induced Porous Pressure-Sensitive Rubber for Wearable Human-Machine Interfaces"**,** *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 26, 4825-30,* **2014.**
15. Zhao, J., Luo, G., Wu, J., Xia, H., "Preparation of Microporous Silicone Rubber Membrane with Tunable Pore Size via Solvent Evaporation-Induced Phase Separation", *ACS Applied Materials & Interfaces, 5, 2040-6,* **2013.**
16. Hinton, T. J., Hudson, A., Pusch, K., Lee, A., Feinberg, A. W., "3D Printing PDMS Elastomer in a Hydrophilic Support bath via Freeform Reversible Embedding", *ACS Biomaterials Science & Engineering, 2, 1781-6,* **2016.**
17. Tie, K. W., Sim, J. H., Tey, J. Y., Yeo, W. H., Lee, Z. H., Ng, L. Y., et al., "Additive Manufacturing via Direct Ink Writing of Customized Silicone Foam with Glycerol as Dispersed Phase for Diverse Applications", *Processes, 13, 677,* **2025.**
18. Bo, W., Xueqin, Z., Bingkun, L., Yijie, L., Chenguang, Y., Yujun, G., et al., "Advances in Superhydrophobic Material Research: from Preparation to Electrified Railway Protection", *RSC Advances, 14, 12204-17,* **2024.**
19. Yu, C., Yu, C., Cui, L., Song, Z., Zhao, X., Ma, Y., et al., "Facile Preparation of the Porous PDMS Oil-Absorbent for Oil/Water Separation", *Advanced Materials Interfaces, 4, 1600862,* **2017.**
20. He, X., Yang, M., Hu, F., Jiang, G., Shen, Y., "Comparative Study on the Foaming and Fireproof Properties of PDMS Foam Composites with Different Inorganic Fillers", *Buildings, 15, 1172,* **2025.**
21. Timusk, M., Nigol, I. A., Vlassov, S., Oras, S., Kangur, T., Linarts, A., et al., "Low-Density PDMS Foams by Controlled Destabilization of Thixotropic Emulsions", *Journal of Colloid and Interface Science, 626, 265-75,* **2022.**
22. Han, T.-L., Guo, B.-F., Zhang, G.-D., Tang, L.-C., "Facile Synthesis of Hollow Glass Microsphere Filled PDMS Foam Composites with Exceptional Lightweight, Mechanical Flexibility, and Thermal Insulating Property", *Molecules, 28, 2614,*

2023.

23. Chen, L., Huang, S., Ras, R. H., Tian, X., "Omniphobic Liquid-Like Surfaces", *Nature Reviews Chemistry, 7, 123-37,* **2023.**

24. Mark, J. E., "Conformations and Spatial Configurations of Inorganic Polymers", *Macromolecules, 11, 627-33,* **1978.**

25. Weinhold, F., West, R., "The Nature of the Silicon–Oxygen Bond", *Organometallics, 30, 5815-24,* **2011.**

26. Colas, A., Curtis, J., "Silicone Biomaterials: History and Chemistry", *Biomaterials Science: an Introduction to Materials in Medicine, 2, 80-5,* **2004.**

27. Trung, T. Q., Lee, N. E., "Recent Progress on Stretchable Electronic Devices with Intrinsically Stretchable Components", *Advanced Materials, 29, 1603167,* **2017.**

28. Morawska-Chochół, A., Szumera, M., Młyniec, A., Pielichowska, K., "The Effect of Aging Process Conditions on the Thermal Properties of Poly (Dimethylsiloxane)-Based Silicone Rubber", *Materials, 17, 5608,* **2024.**

29. Abdelhafeez, I. A., Zhou, X., Yao, Q., Yu, Z., Gong, Y., Chen, J., "Multifunctional Edge-Activated Carbon Nitride Nanosheet-Wrapped Polydimethylsiloxane Sponge Skeleton for Selective Oil Absorption and Photocatalysis", *ACS Omega, 5, 4181-90,* **2020.**

30. Zhao, X., Li, L., Li, B., Zhang, J., Wang, A., "Durable Superhydrophobic/Superoleophilic PDMS Sponges and their Applications in Selective Oil Absorption and in Plugging Oil Leakages", *Journal of Materials Chemistry A, 2, 18281-7,* **2014.**

31. Lee, J. N., Park, C., Whitesides, G. M., "Solvent Compatibility of Poly (dimethylsiloxane)-Based Microfluidic Devices", *Analytical Chemistry, 75, 6544-54,* **2003.**

32. Lima, R. A., "The Impact of Polydimethylsiloxane (PDMS) in Engineering: Recent Advances and Applications", *Fluids, 10, 41,* **2025.**

33. Regehr, K. J., Domenech, M., Koepsel, J. T., Carver, K. C., Ellison-Zelski, S. J., Murphy, W. L., et al., "Biological Implications of Polydimethylsiloxane-Based Microfluidic Cell Culture", *Lab on a Chip, 9, 2132-9,* **2009.**

34. Zhou, L., Rada, J., Zhang, H., Song, H., Mirniaharikandi, S., Ooi, B. S., et al., "Sustainable and Inexpensive Polydimethylsiloxane Sponges for Daytime Radiative Cooling", *Advanced Science, 8, 2102502,* **2021.**

35. McDonald, J. C., Whitesides, G. M., "Poly (dimethylsiloxane) as a Material for Fabricating Microfluidic Devices", *Accounts of Chemical Research, 35, 491-9,* **2002.**

36. Vlassov, S., Oras, S., Timusk, M., Zadin, V., Tiirats, T., Sosnin, I. M., et al., "Thermal, Mechanical, and Acoustic Properties of Polydimethylsiloxane Filled with Hollow Glass Microspheres", *Materials, 15, 1652,* **2022.**

37. Joseph, M., Van Hileghem, L., Postelmans, A., Lammertyn, J., Saeys, W., "Fabrication and Characterization of Porous Tissue-Mimicking Optical Phantoms as a Tool for Optical Sensor Validation", *Journal of Biophotonics, 16, e202200338,* **2023.**

38. Xu, G., Ni, Z., Chen, X., Tu, J., Guo, X., Bruus, H., et al., "Acoustic Characterization of Polydimethylsiloxane for Microscale Acoustofluidics", *Physical Review Applied, 13, 054069,* **2020.**

39. Rutkevičius, M., Mehl, G. H., Paunov, V. N., Qin, Q., Rubini, P. A., Stoyanov, S. D., et al., "Sound Absorption Properties of Porous Composites Fabricated by a Hydrogel Templating Technique", *Journal of Materials Research, 28, 2409-14,* **2013.**

40. Guillermic, R.-M., Lanoy, M., Strybulevych, A., Page, J. H., "A PDMS-Based Broadband Acoustic Impedance Matched Material for Underwater Applications", *Ultrasonics, 94, 152-7,* **2019.**

41. Camino, G., Lomakin, S., Lazzari, M., "Polydimethylsiloxane Thermal Degradation Part 1. Kinetic Aspects"**,** *Polymer, 42, 2395-402,* **2001.**

42. Diaz Lantada, A., Alarcon Iniesta, H., Pareja Sanchez, B., García-Ruíz, J. P., "Free-Form Rapid Prototyped Porous PDMS Scaffolds Incorporating Growth Factors Promote Chondrogenesis", *Advances in Materials Science and Engineering, 2014, 612976,* **2014.**

43. Abshirini, M., Saha, M. C., Altan, M. C., Liu, Y., "Synthesis and Characterization of Hierarchical Porous Structure of Polydimethylsiloxane (PDMS) Sheets via Two-step Phase separation Method", *Materials & Design, 212, 110194,* **2021.**

44. Szabó, P., Németh, Z., Szabó, R., Lázár, I., Pirger, Z., Gáspár, A., "Removal of Octinoxate, a UV-filter Compound, from Aquatic Environment Using Polydimethylsiloxane Sponge", *Water, 17, 2306,* **2025.**

45. Liao, W., Wang, P., Xu, Z., Huang, X., "Microfluidic Foaming of Polydimethylsiloxane (PDMS)", *Materials Letters, 379, 137653,* **2025.**

46. Choi, S.-J., Kwon, T.-H., Im, H., Moon, D.-I., Baek, D. J., Seol, M.-L., et al., "A Polydimethylsiloxane (PDMS) Sponge for the Selective Absorption of Oil From Water", *ACS Applied Materials & Interfaces, 3, 4552-6,* **2011.**

47. Karimi-Chaleshtori, R., Nassajpour-Esfahani, A., Saeri, M., Rezai, P., Doostmohammadi, A., "Silver Nanowire-Embedded PDMS with High Electrical Conductivity: Nanowires Synthesis, Composite Processing and Electrical Analysis", *Materials*

Today Chemistry, 21, 100496, **2021.**
48. Zhang, C., Qu, L., Wang, Y., Xu, T., Zhang, C., "Thermal Insulation and Stability of Polysiloxane Foams Containing Hydroxyl-Terminated Polydimethylsiloxanes", *RSC Advances, 8, 9901-9,* **2018.**
49. Wang, S., Feng, D., Guan, H., Guo, Y., Liu, X., Yan, C., et al., "Highly Efficient Thermal Conductivity of Polydimethylsiloxane Composites via Introducing "Line-Plane"-like Hetero-Structured Fillers", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 157, 106911,* **2022.**
50. Tan, X., Zheng, J., "A novel porous PDMS-AgNWs-PDMS (PAP)-Sponge-Based Capacitive Pressure Sensor", *Polymers, 14, 1495,* **2022.**
51. Xia, H., Wang, L., Zhang, H., Wang, Z., Zhu, L., Cai, H., et al., "MXene/PPy@ PDMS Sponge-Based Flexible Pressure Sensor for Human Posture Recognition with the Assistance of a Convolutional Neural Network in Deep Learning", *Microsystems & Nanoengineering, 9, 155,* **2023.**
52. Shin, J. H., Heo, J.-H., Jeon, S., Park, J. H., Kim, S., Kang, H.-W., "Bio-Inspired Hollow PDMS Sponge for Enhanced Oil–Water Separation", *Journal of Hazardous Materials, 365, 494-501,* **2019.**
53. Menge, H. G., Kim, J. O., Park, Y. T., "Enhanced Triboelectric Performance of Modified PDMS Nanocomposite Multilayered Nanogenerators", *Materials, 13, 4156,* **2020.**
54. Fujii, T., "PDMS-Based Microfluidic Devices for Biomedical Applications", *Microelectronic Engineering, 61, 907-14,* **2002.**
55. Chen, F., Chai, H., Song, Z., Yu, L., Fang, C., "Hydrophilic Porous Polydimethysiloxane Sponge as a Novel 3d Matrix Mimicking Heterogeneous Pores in Soil for Plant Cultivation", *Polymers, 12, 140,* **2020.**