

سنتر سیلیکا آبروژل از پوسته برنج به روش خشک کردن محیطی

محمد احمدی دریاکناری^{۱*}، احمد احمدی دریاکناری^۲ و مصطفی حاجیان حیدری^۱

۱- دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

۲- گروه نانو فناوری دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۰/۰۹/۲۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

چکیده

منبع عمده اکسید سیلیکون برای تولید آبروژل‌ها معمولاً تترا اتوکسی سیلان، تترا متوکسی سیلان و یا سیلیکات سدیم هست. البته می‌توان از خاکستر پوسته برنج به عنوان منبع اکسید سیلیکون استفاده کرد. پوسته برنج منبع بسیار عالی، با درجه بالایی سیلیس بی‌شکل می‌باشد. اهمیت بی‌شکل بودن سیلیکات بدست آمده در این است که سیلیکات بی‌شکل، فعال است و می‌توان از آن سیلیکا آبروژل بدست آورد. برای سنتز سیلیکا آبروژل ابتدا پوسته‌های برنج با اسید سولفوریک شسته می‌شود و بعد در هوا خشک می‌شود. سپس پوسته‌ها به مدت ۷ ساعت در دمای 700°C سوزانده می‌شود. با آنالیز XRF مشخص شد که این خاکستر پوسته برنج دارای بیش از ۹۸ درصد سیلیکا است. همچنین با XRD مشخص شد که ساختار سیلیکاتی که به روش خشک کردن محیطی آبروژل سنتز می‌شود آمورف است با استفاده از چگالی ظاهری و چگالی ساختاری سیلیکا که بوسیله پیکنومتر گازی بدست آمد، مشخص شد که این سیلیکا آبروژل دارای بیش از ۹۰ درصد تخلخل است. با تحلیل آنالیز SEM و BET مورفولوژی حفره‌ها بدست آمد و مشخص شد که اندازه متوسط حفره‌ها ۳۷ نانومتر می‌باشد و دارای سطح ویژه $325/98\text{ m}^2/\text{g}$ می‌باشد. همچنین ضریب هدایت حرارتی آن با استفاده از آنالیز K_2Pro مشخص شد که حدود $0/03\text{ W/m.K}$ هست. این ضریب هدایت حرارتی بسیار پایین هست و بنابراین می‌توان از آن به عنوان عایق حرارتی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: پوسته برنج، سیلیکا، آبروژل، ضریب هدایت حرارتی.

۱- مقدمه

در صنایع مختلف دارند. آبروژل‌های بر پایه سیلیکا امروزه سهم قابل توجهی از تولیدات صنعتی آبروژل را به خود اختصاص داده است. فرایند ساخت آبروژل شامل دو مرحله می‌باشد. مرحله ساخت ژل که حلال در آن نفوذ می‌کند و مرحله حذف حلال یا خشک کردن می‌باشد. منابع عمده سیلیکون برای تولید هیدروژل پیش‌ماده‌هایی مانند تترا اتوکسی سیلان و تترا متوکسی سیلان و یا سیلیکات سدیم

سیلیکا آبروژل‌ها موادی با حفره‌های نانومتری، چگالی پایین و تخلخل بالا هستند. این ویژگی‌ها باعث ایجاد خصوصیات استثنایی و منحصر بفرد مانند هدایت گرمایی پایین، سرعت صوت پایین و عملکرد به عنوان عایق صوتی و حرارتی می‌شود. لذا سیلیکا آبروژل‌ها موادی هستند که کاربرد زیادی

* عهده‌دار مکاتبات: محمد احمدی دریاکناری

نشانی: شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی شیمی و مواد

تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۰۰۲۵۷، دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۰۰۲۵۷، پست الکترونیکی: dariakenari@gmail.com

است. البته جایگزین‌های ارزان دیگری برای سیلیکون، مانند خاکستر پوسته برنج نیز وجود دارد.

میزان تولید سالانه برنج پوسته‌دار در سطح دنیا به ۶۸۰ میلیون تن می‌رسد که تقریباً ۱۰۸ میلیون تن از این مقدار را پوسته برنج تشکیل می‌دهد. حجم پوسته برنج تولید شده در ایران بالغ بر نیم میلیون تن در سال است. تولید نسبتاً بالای سالانه برنج در کشور، سبب جمع‌آوری مقدار زیادی پوسته برنج می‌گردد. این واقعیت سبب شد تا تحقیقاتی بر روی پوسته برنج جهت استخراج سیلیکا انجام شود. پوسته برنج محصول جانبی عمده صنعت عمل‌آوری برنج است که می‌تواند ماده خام در دسترس و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه برای تولید سیلیکات‌ها و سیلیکا باشد [۱،۲].

سیلیکا یک ماده خام اولیه است که با توجه به قطر کوچک ذرات آن دارای کاربردهای زیادی در فناوری‌های مختلف همچون کاربرد در صنایع الکترونیک، سرامیک، مواد پلیمری، تصفیه روغن نباتی، محصولات دارویی، مواد شوینده، چسب، پر کردن ستون دستگاه‌های کروماتوگرافی و اخیراً در تولید آبروژل کاربرد دارد [۳،۴].

آبروژل‌ها ابتدا توسط واکنش‌های پلیمریزاسیون ترکیبات مختلف بصورت ژل تهیه می‌شوند و سپس این ژل‌های مرطوب بوسیله روش‌های مختلفی خشکانده می‌شوند. در نتیجه نمونه‌های خشک که موادی با بافت بسیار متخلخل و سبک هستند، تولید می‌شوند. روش‌های خشک کردن ژل به صورت‌های زیر می‌باشد:

- خشک کردن فوق‌بحرانی دما بالا (HTSCD)

- خشک کردن فوق‌بحرانی دما پایین (LTSCD)

- خشک کردن فشار محیطی

خشک کردن فوق‌بحرانی دما بالا، روش اصلی استفاده شده توسط کیسچر برای خشک کردن آبروژل است. اگر اقدامات ایمنی مناسب گرفته نشود، این فرآیند می‌تواند خطرناک باشد. در اینجا دما و فشار ژل مرطوب ممکن است به ۱۰۰ bar و دما 240°C برسد [۵]. خشک کردن فوق‌بحرانی دما پایین در اواسط سال ۱۹۸۰ گسترش یافته بود. در

اینجا، حلال داخل ژل مرطوب با CO_2 مایع قبل از خشک کردن جایگزین شده است، که آن یک نقطه بحرانی نزدیکتر به دمای محیطی دارد. بنابراین خشک کردن در تقریباً ۱۰۰ bar و دما 40°C انجام می‌گیرد [۶].

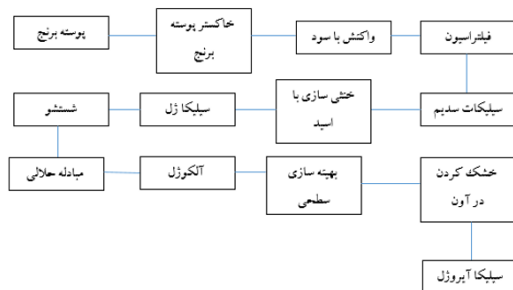
خشک کردن فشار محیطی همچنین در اواسط سال ۱۹۹۰ ظهور شد. این فرآیند شامل اصلاح شیمیایی سطح یک ژل مرطوب است که آن قبل از خشک کردن، آبگریز می‌شود. ژل خشک شده توسط خشک کردن فشار محیطی معمولاً تخلخل‌های کمتر از آبروژل‌های خشک شده فوق‌بحرانی دارند. بنابراین، دارای شفافیت کمتر ولی از لحاظ مکانیکی قوی‌تر هستند [۷].

سیلیکات سدیم یکی از منابع تولید آبروژل هست و سیلیکات سدیم معمولاً از ذوب کوارتز با کربنات سدیم در 1311°C بدست می‌آید که یک فرآیند زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی جهت استفاده از خاکستر دمای بدون کربن (خاکستر سفید) برخی از پسماندهای گیاهی همچون پوسته برنج جهت استخراج سیلیکا شده است تا هزینه تولید سیلیکا آبروژل کاهش یابد [۸،۹].

پوسته برنج منبع بسیار عالی، با درجه بالایی سیلیس بی‌شکل می‌باشد. اهمیت بی‌شکل بودن سیلیکای بدست آمده در این است که سیلیکای بی‌شکل، فعال است. سیلیکای فعال، سیلیکای واکنش‌پذیر است که در واکنش‌ها شرکت می‌کند در حالیکه سیلیکا در شکل بلورین، غیرفعال بوده و در واکنش‌ها شرکت نمی‌کند. سوزاندن پوسته برنج منجر به تشکیل خاکستر پوسته برنج با محتوای SiO_2 بی‌شکل با درجه خلوص ۸۵ تا ۹۸ درصد می‌شود و بعد می‌توان از آن در سنتز سیلیکا آبروژل استفاده کرد [۱۰،۱۱].

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای سنتز سیلیکا آبروژل از پوسته برنج به روش خشک کردن فوق‌بحرانی دما بالا و دما پایین صورت گرفت [۱۲،۱۳] و در روش خشک کردن محیطی، سنتز سیلیکا آبروژل دارای تخلخل بیش از ۸۰ درصد انجام شد ولی به تخلخل ۹۰ درصد نرسید [۱۴]. در این تحقیق سنتز سیلیکا آبروژل دارای تخلخل بیش از ۹۰

درصد وزنی مناسب از ماده شروع کننده برسیم، سیلیکات سدیم با نسبت ۱ به ۴ رقیق می شود و سپس با اسید تارتاریک با نسبت ۳/۷ مخلوط می شود. سپس به مخلوط مورد نظر min ۲۵ فرصت داده می شود تا ژل تشکیل شود. بعد از آن به مدت ۳ ساعت در دمای ۵۸ °C در آون قرار می گیرد تا ژل ها به استحکام لازم برسند. به منظور برداشتن تارتارات سدیم و یون سدیم، ژل ها به مدت ۴،۲۴ h بار شسته می شوند. در مرحله بعد هیدروژل ها در ایزوپروپیل الکل برای مدت ۲۴ h در دمای ۵۸ °C غوطه ور می شود تا حفره هایی که در محلول آبی تشکیل شده است با الکل مبادله شود و همچنین ژل ها مستحکم شود. ژل ها در محلول هگزان/تری متیل کلرو سیلان با نسبت ۲۰ درصد تری متیل کلرو سیلان برای مدت ۲۴ h در دمای ۵۵ °C قرار داده می شود. بعد ژل ها برای ۲۴ h در دمای محیط نگه داشته می شود و در این مرحله آب باقیمانده از سیلیکا آبروژل خارج می شود و در انتها به مدت ۵ h در دمای ۱۰۰ °C در آون خشک می شود. نمای کلی فرآیند سنتر سیلیکا آبروژل از پوسته برنج به صورت شکل ۱ می باشد.



شکل ۱: نمای کلی فرآیند سنتر سیلیکا آبروژل از پوسته برنج.

جدول ۲: روش های مشخصه یابی پودر سیلیکا آبروژل.

جهت استفاده	روش تست
جهت تعیین چگالی واقعی پودرها	پیکنومتر گازی (Gas Pyc Ge-1803)
جهت مشخص کردن ساختار	XRD (X Pert Pro MPD)
جهت مشخص کردن مورفولوژی پودرها	FE-SEM (TESCAN-MIRA3) (PHILIPS EM 208)-TEM
جهت مشخص کردن سطح و حجم و قطر متوسط حفره ها	Blsorp-max (BET)
جهت مشخص کردن هدایت حرارتی و ظرفیت ویژه پودرها	هدایت حرارتی سنج (TLS-100)
جهت تعیین ظرفیت ویژه پودرها	DSC-Q600

درصد به روش خشک کردن محیطی (روش ارزان و ساده) از خاکستر سفید پوسته برنج، انجام شد و سپس به بررسی تخلخل، مورفو لوژی، ساختار، سطح ویژه، هدایت گرمایی و تغییرات آن با دما پرداخته شد.

۲- فعالیت های تجربی

پوسته برنج بوسیله آب مقطر شسته می شود. سپس پوسته برنج در هوا خشک می شود. این پوسته ها به مدت ۷ ساعت در دمای ۷۰۰ °C قرار می گیرد. اگر خلوص بالای ۹۸ درصد مورد تقاضا هست، لازم هست این خاکسترها در اسید سولفوریک ۱ M شسته شود و سپس در هوا خشک شود و عمل احتراق انجام گیرد. با استفاده از آنالیز طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس، عناصر خاکستر پوسته برنج به صورت جدول ۱ ارائه می شود.

جدول ۱: عناصر خاکستر پوسته برنج.

عناصر	درصد جرمی
SiO ₂	۹۸/۱۳۷
K ₂ O	۰/۷۳۹
CaO	۰/۳۸۵
P ₂ O ₅	۰/۲۸۲
MgO	۰/۲۷۶
SO ₃	۰/۱۳۴
Al ₂ O ₃	۰/۰۴۳

۳۵ g از خاکستر پوسته برنج در ۱۴ گرم هیدروکسید سدیم در ۴۵۰ cc آب با دمای ۹۰ °C حل می شود. سپس در دمای ۹۰ °C به مدت ۶ h در آون خشک می شود و بدین ترتیب سیلیکات سدیم بدست می آید. مواد مورد استفاده در این آزمایش TMCS تری متیل کلرو سیلان، اسید تارتاریک ایزروپروپیل الکل و هگزان می باشد که همگی از شرکت مرک تهیه شده است. در شروع برای سنتر سیلیکا آبروژل از ترکیب داده های تجربی Rohani Bakara-Uzma Bangi استفاده شد [۱۵،۱۶] و سپس به بهینه شرایط سنتر سیلیکا آبروژل از طریق آزمون و خطا رسیده شد. برای اینکه به

۳- نتایج و بحث

برای محاسبه درصد تخلخل از معادله ۱ استفاده می شود:

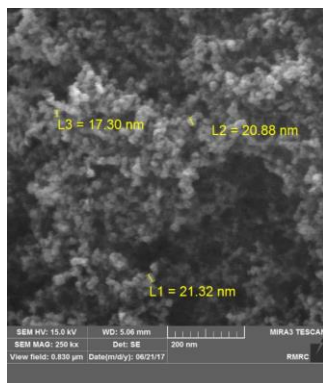
$$\text{Porosity} = (1 - \rho_b / \rho_s) \quad (1)$$

ρ_b : دانسیته ظاهری یا دانسیته حجمی که از تقسیم جرم پودرها در یک حجم مشخصی بدست می آید. مثلاً پودرها را در یک بشر ۱۰۰ cc ریخته و بعد این پودرها را در ترازو وزن می کنیم. از تقسیم وزن پودرها (بر حسب g) بر ۱۰۰ دانسیته ظاهری پودر را (بر حسب g/cm^3) بدست می آوریم.

ρ_s : دانسیته ساختاری یا دانسیته واقعی که به وسیله پیکنومتر گازی بدست می آید.

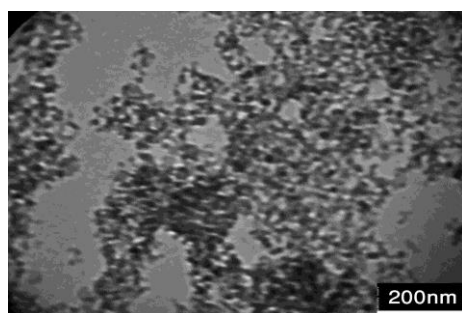
دانسیته واقعی از پیکنومتر گازی حدود $2/25 \text{ g/cm}^3$ بدست می آید. دانسیته ظاهری $0/15 \text{ g/cm}^3$ می باشد که با قرار دادن در فرمول بالا تخلخل ۹۳ درصد بدست می آید.

میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (FE-SEM) دارای قدرت تفکیک در حد $1/5 \text{ nm}$ می باشد و امکان تصویربرداری از سطح نانوپودرها، نانوفیلم ها و نانوالیاف را فراهم می آورد. تصویر FE-SEM سیلیکا آبروژل خالص در شکل ۲ نشان داده شده است. این تصویر بزرگنمایی و حد تفکیک خوبی دارد و نشان می دهد که سطح سیلیکا آبروژل از ساختار شبکه متخلخل تشکیل شده است که ذرات سیلیکا در محدوده ۱۷ تا 30 nm می باشد. در این تصویر بخش های سفید سیلیکا و بخش های سیاه حفره های درون سیلیکا آبروژل هستند که اندازه متوسط این حفره ها به صورت یکنواخت نیستند و در محدوده ۲۰ تا 100 nm هستند که از طریق آزمایش BET مشخص شد که متوسط حفره ها حدود 37 nm می باشد.



شکل ۲: تصویر سطح پودر سیلیکا آبروژل با بزرگنمایی ۲۵۰ هزار.

میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) یک ابزار قدرتمند برای مطالعه ساختار و مورفولوژی نانومواد و نانوساختار می باشد. آنالیز FE-SEM فقط ساختار و خواص سطح ماده سیلیکا آبروژل را مورد بررسی قرار می دهد در حالی که تکنیک TEM با عبور پرتوها از درون به نمونه ساختار داخلی سیلیکا آبروژل را نیز مورد بررسی قرار می دهد. با توجه به تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (شکل ۳) به وضوح مشخص است که پودر سیلیکا آبروژل مانند سطحش (مطابق شکل ۲) از ذرات سیلیکا در محدوده ۱۵ تا 20 nm و اندازه حفره ها هم در محدوده ۲۰ تا 50 nm هستند.

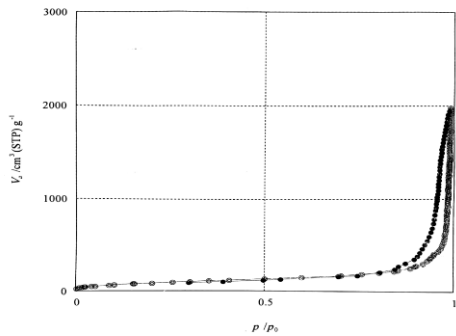


شکل ۳: تصویر پودر سیلیکا آبروژل با استفاده از TEM.

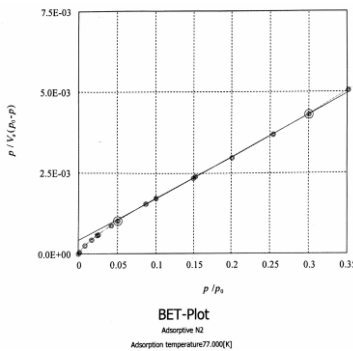
در شکل ۴ تصویر تفرق اشعه ایکس پودر سیلیکا آبروژل

V_m = حجم گاز جذب شده در حالت استاندارد برای تولید یک تک لایه روی سطح نمونه بر حسب cc که برابر با معادله ۲ می باشد.

دیده می شود و دارای 2θ بین ۴ تا ۷۰ درجه می باشد و قدم اندازه گیری آن ۰/۰۲ درجه می باشد. این تصویر دارای هیچ پیک مشخصی نمی باشد پس می توان به این نتیجه رسید که ساختار پودر سیلیکا آیزول بدست آمده آمورف است.



شکل ۵: نمودار جذب و و جذب گاز.



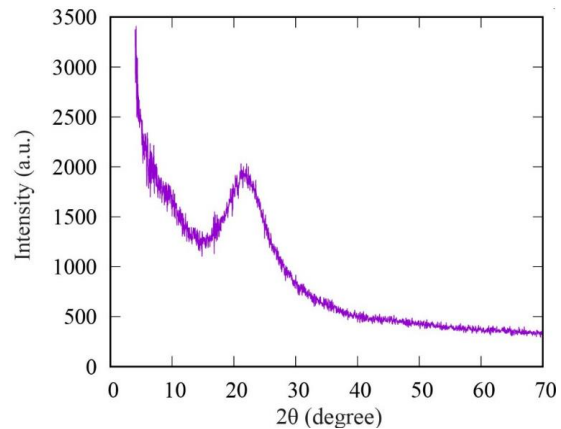
شکل ۶: نمودار BET.

$$V_m = 1/(A+I) \quad (2)$$

که I عرض از مبدا نمودار BET و A: شیب نمودار BET است. سطح ویژه ماده (S_{BET}) توسط معادله ۳ تعریف می شود که a، سطح مقطع موثر یک مولکول جذب شده بر حسب میلی متر مربع که در اینجا حدود 161×10^{-15} هست.

$$S = V_m \cdot N_a / 22400m \quad (3)$$

m = جرم نمونه تست شده بر حسب و N_a عدد آووگادرو است. همچنین حجم ویژه حفره ها از شکل ۳ بر اساس فرمول ۴ بدست می آید:



شکل ۴: تصویر تفرق اشعه ایکس پودر سیلیکا آیزول.

با استفاده از شکل های ۵ و ۶ که به ترتیب نمودارهای حجم گازهای جذب شده-وا جذب شده در شرایط استاندارد و نمودار BET می باشد. که نتایج به صورت جدول ۳ می باشد.

جدول ۳: جدول نتایج تست BET.

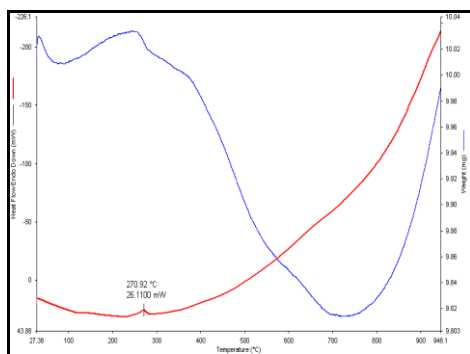
۳۲۵/۹۸	سطح ویژه بر حسب مترمربع بر گرم
۳/۲۹۲	حجم تخلخل بر حسب سانتی متر مکعب بر گرم
۳۷/۱۷۰	متوسط قطر حفره ها بر حسب نانومتر

در این تست ها وزن نمونه 0.397 g و فشار بخار اولیه دود $87/718$ kPa و مدت زمان انجام تست 37 min و 19 s بود. شکل ۶ نشان می دهد. که در این نمودار:

P = فشار جزئی گاز جذب شده در حالت تعادل در دمای K
 Pa بر حسب $77/4$
 P_0 = فشار بخار اولیه
 V_a = حجم گاز جذب شده در شرایط استاندارد (فشار 760 mmHg و دما $273/15$ K) بر حسب cc

هدایت گرمایی ماده سیلیکا آبروژل پایین هست که این به خاطر وجود کم ماده سیلیکا و تخلخل های بسیار زیاد آن می باشد.

شکل ۷ نمودار اختلاف تفاضل گرمایی DSC و کاهش وزن TG بر اساس دما نشان می دهد. ابتدا یک کاهش وزنی از دمای محیط تا دمای 80°C دیده می شود که مربوط به از بین رفتن حلال های آلی و پیش ماده های باقیمانده نسبت داده می شود بنابراین از دمای محیط تا 80°C کاهش وزن مشاهده می شود. سپس پیک گرمایی در حدود 270°C دیده می شود که گونه های آلی در سطح حفره های بزرگ در این دما اکسید می شود و این دلیل آبدوستی پودر سیلیکا آبروژل بعد از گرم کردن در 80°C می باشد. در واقع از 80°C تا 270°C گونه های آلی اکسید می شود که این موجب افزایش جرم در حین گرما می شود. از 270°C تا 770°C گونه های آلی اکسیدی روی سطح در حال سوختن می باشد بنابراین جرم در حین گرم کردن کاهش می یابد. از 770°C تا 1000°C افزایش جرم دیده می شود که به خاطر این هست که ساختار آمورف سیلیکا به ساختار آلفا تغییر می کند.



شکل ۷: نمودار اختلاف تفاضل گرمایی DSC و کاهش وزن TG.

۴- نتیجه گیری

سنتز سیلیکا آبروژل از پوسته برنج به روش خشک کردن محیطی با استفاده از ایزوپروپیل الکل و هگزان یک روش مقرون به صرفه هست. با بررسی های چگالی ظاهری و چگالی سیلیکا مشخص شد که دارای تخلخل بیش از حد ۹۰

$$V_{liq} = P_a V_{ads} V_m / RT \quad (4)$$

V_{ads} : حجم گاز جذب شده وقتی p/p_0 برابر $0/99$ می باشد.
 P_a : فشار محیط، T : دمای محیط، V_m : حجم مولار مایع نیتروژن جذب شده، V_{liq} : حجم مایع نیتروژن در حفره ها برای اندازه گیری قطر متوسط حفره ها فرض می شود که حفره ها به صورت سیلندر باشد بنابراین شعاع متوسط حفره ها بر اساس فرمول ۵ بدست می آید.

$$R_p = 2V_{liq}/S \quad (5)$$

در این دستگاه از سنسور K_{s1} استفاده می شود که دارای قطر $1/3\text{ mm}$ و طول 6 cm می باشد این سنسور برای مواد عایقی که هدایت گرمایی کمتر از $0/1\text{ W/m.K}$ می باشد مفید می باشد و از مقاومت بین سنسور و ماده عایق صرف نظر می شود. مقداری گرما وارد پودر سیلیکا آبروژل می شود و مقاومت گرمایی و ولتاژ ایجاد شده و هدایت گرمایی اندازه گیری می شود. میزان گرمای وارد شده $25/92\text{ mW}$ برای حدود 3 s می باشد و میزان میرایی این گرما بستگی به هدایت گرمایی ماده دارد. هدایت گرمایی اندازه گیری شده حدود $0/03\text{ W/m.K}$ می باشد.

در سیلیکا آبروژل به عنوان ماده متخلخل، هدایت گرمایی به عنوان مجموع رسانش جامد (K_s) و رسانش گاز (گازهای گیر کرده در خلل و فرج (K_g) و انتقال حرارت از طریق جابجایی (K_c) و تشعشع گاز (K_r) بدون هیچ مفروضات می باشد. در دماهای پایین انتقال گرما از طریق تشعشع قابل چشم پوشی است. اندازه حفره ها از فاصله آزاد مولکول های هوا کوچکتر هست بنابراین انتقال گرما از طریق جابجایی قابل چشم پوشی هست و رسانش مکانیزم غالب در انتقال گرما می باشد و فرمول انتقال کلی گرما به صورت فرمول ۶ می باشد.

$$K_t = K_s + K_g \quad (6)$$

- [4] S. Song, H.B. Cho, H.T. Kim, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **61**, 2018, 281.
- [5] M. Dowson, M. Grogan, T. Birks, D. Harrison, S. Craig, *Applied Energy*, **97**, 2012, 396.
- [6] A.S. Dorcheh, M. Abbasi, *Journal of Materials Processing Technology*, **1**, 2008, 10.
- [7] D. Du, Y. Jiang, J. Feng, L. Li, J. Feng, *Vacuum*, **173**, 2020, 109117.
- [8] N. Abbas, H. Khalid, G. Ban, *Construction and Building Materials*, **195**, 2019, 312.
- [9] H. Jia, T. Du, X. Fang, H. Gong, Z. Qiu, Y. Li, Y. Wang, *ACS Omega*, 2021, **6**, 3961.
- [10] J. Chun, J. Lee, *Sustainability*, **12**, 2020, 10683.
- [11] T. Ali, A. Saand, D. Bangwar, A. Buller, Z. Ahmed, *Crystals*, **11**, 2021, 604.
- [12] C. Shenga, Y. Shu-wena, L. Ben-lan, S. Xiao-donga, G. Danming, *Royal Society of Chemistry*, **5**, 2015, 65818.
- [13] Q. Tang, T. Wang, *Journal of Supercritical Fluids*, **35**, 2005, 9.
- [14] J.P. Nayaka, J. Bera, *Transactions of the Indian Ceramic Society*, **68**, 2009, 91.
- [15] U. Bangi, A. Rao, A. Rao, *Science and Technology of Advanced Materials*, **9**, 2008, 035006.
- [16] R. Bakar, R. Yahyaa, S. Gana, *Procedia Chemistry*, **19**, 2016, 189.

درصد است. همچنین با روش BET مشخص شد که سیلیکا آبروژل سنتز شده دارای سطح ویژه $325/98 \text{ m}^2/\text{g}$ و دارای متوسط قطر حفره 37 nm است. با استفاده از K_2pro مشخص شد که ضریب هدایت حرارتی سیلیکا آبروژل حدود $0/03 \text{ W/m}^2\text{K}$ است و بنابراین می توان از آن ها به عنوان عایق حرارتی استفاده کرد.

مراجع

- [1] X. Liu, X. Chen, L. Yang, *Research on Chemical Intermediates*, **42**, 2016, 893.
- [2] J.A.S. Costa, C.M. Paranhos, *Journal of Cleaner Production*, **192**, 2018, 688.
- [3] S.K. Hossain, L. Mathur, Aman Bhardwaj, Pradip Kumar Roy, *Applied Ceramic Technology*, **16**, 2019, 1069.