نانو صنعت

مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو • گزارش شماره ۲۵۲

نانومواد

کاربردهای صنعتی نانوفیومدسیلیکا

INDnano.ir

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو • www.nano.ir

شناسنامه

ستاد ویژه توسعه فناوری‌نانو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا: توسعه فناوری مهرویژن

نظارت: داود قرایلو

تهیه‌کننده: شرکت نوآوران صنعت و نانوفناوری معین

صندوق پستی: ۳۴۴-۱۴۵۶۵

پست الکترونیک: IND@nano.ir

سال انتشار: ۱۴۰۱

تلفن: ۰۲۱-۶۳۱۰۰

نمابر: ۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰

پایگاه اینترنتی: www.nano.ir

www.INDnano.ir

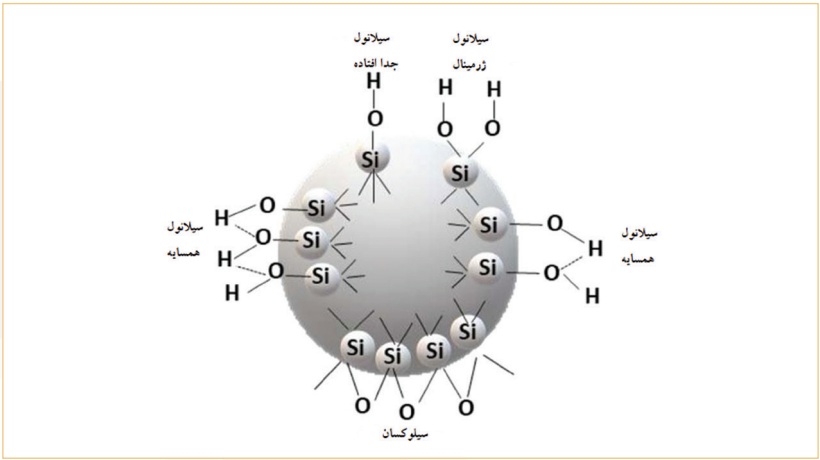
اینستاگرام نانو و صنعت: @INDnano.ir

فهرست مطالب

فیومد سیلیکا ۳
تولید ۳
ویژگی ۴
ساختار ذره ۵
شیمی سطح ۶
کاربردها ۷
جریان آزاد تونرها ۸
تغلیظ مایعات ۹
تقویت الاستومرها ۱۰
بسته‌بندی آنتی‌باکتریال مواد غذایی ۱۱
تولیدکنندگان داخلی ۱۲
شرکت نانوجاذب‌های پیشرفته نوین ۱۲
تولیدکنندگان خارجی ۱۳
بازار جهانی فیومد سیلیکا ۱۳
پی‌نوشت‌ها ۱۶
مراجع ۱۶

فیومد سیلیکا

فیومد سیلیکا[1] از زمان تولید اولیه در اوایل دهه چهل قرن بیستم، کاربرد گسترده‌ای در صنعت پیدا کرده است. فیومد سیلیکا به‌دلیل فرآیند تولید گرم زا[2] با احتراق سیلیکن تراکلرید[3] در شعله اکسیژن هیدروژن، خواص شگفت‌انگیز مختلفی را ارائه می‌دهد. فیومد سیلیکا از دی‌اکسید سیلیکون آمورف پراکنده[4] تشکیل و سطح آن توسط گروه‌های سیلانول[5] بسیار واکنش‌پذیر پوشیده شده است (شکل ۱) که برای واکنش‌های شیمیایی در دسترس هستند. علاوه‌بر این، فیومد سیلیکا ساختار ذرات پرکننده فضا[6] (ساختارهای پرکننده فضا ساختارهایی هستند که نشان می‌دهند چگونه ذرات در ساختار جامدات قرار می‌گیرند.) را نشان می‌دهد که مربوط به مساحت سطح بالا و فاقد ریزمنافذ[7] بودن آن است. این ویژگی‌ها فیومد سیلیکا را قادر می‌سازد تا به‌عنوان یک افزودنی جریان آزاد[8] در جامدات پودرمانند، یک غلیظ کننده[9] در مایعات مختلف و یک پرکننده تقویت‌کننده[10] قوی در الاستومرها عمل کند[1].

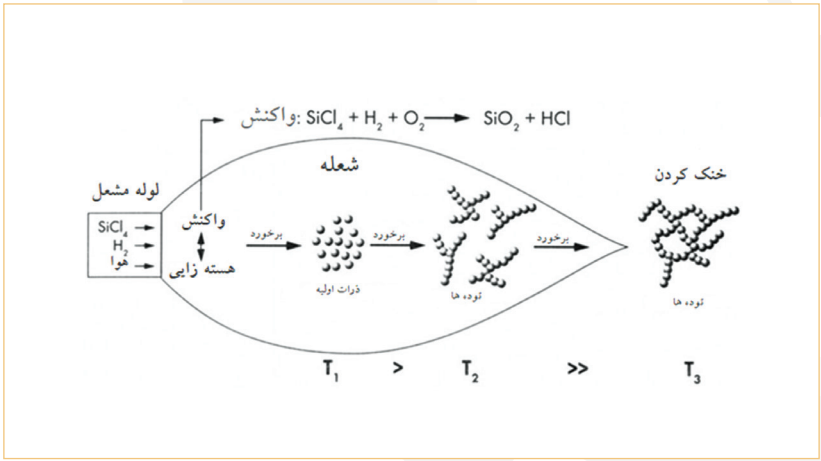


شکل ۱- ساختار شماتیک سیلیکا (کره مرکزی) و گروه‌های سیلانول متصل به آن

تولید

فیومد سیلیکا از سوزاندن سیلان‌های فرار مانند تتراکلرید سیلیکون در شعله اکسیژن هیدروژن تولید می‌شود. در دمای بالای شعله، برخورد[11] و انعقاد[12] پیش‌ذرات[13] منجر به تشکیل ذرات اولیه می‌شود. سرعت انعقاد بستگی به ویسکوزیته اکسید مذاب دارد که برای دی‌اکسید سیلیکون در دمای شعله حدود ۱۵۰۰ کلوین، بسیار زیاد است؛ بنابراین اندازه ذرات اولیه فیومد سیلیکا، به‌شدت با دمای شعله مرتبط است. در دمای پایین‌تر، برخورد و چسبیدن ذرات اولیه تنها منجر به همجوشی[14] و تشکیل توده‌های[15] پایدار ذرات می‌شود. توده‌های سیلیس شعله را ترک می‌کنند و خنک می‌شوند اما همچنان با هم برخورد می‌کنند. از آنجایی که سطوح آن‌ها اکنون جامد است،

آگلومرهایی [۱۶] از توده‌ها تشکیل می‌شود که توسط فعل‌وانفعالات سطحی فیزیکی و شیمیایی کنار هم نگه داشته می‌شوند (شکل ۲)[۱].



شکل ۲- تولید فیومد سیلیکا در فرآیند شعله

ویژگی

در جدول ۱ برخی خواص نظری فیومد سیلیکا قابل مشاهده است[۲].

جدول ۱ - خواص نظری فیومد سیلیکا

خواص (نظری) فیومد سیلیکا

وزن مولکولی	۶۰/۰۸
ظاهر	پودر سفید
نقطه ذوب	C ۱۶۰۰°
نقطه جوش	۲۲۳۰°C
چگالی	۲/۳ ۴/۵ g/cm۳
مساحت سطح ویژه	۲۰۰ ۳۰۰ m^2/g
مورفولوژی	کروی

در ادامه به بررسی ویژگی‌های فیومد سیلیکا می‌پردازیم.

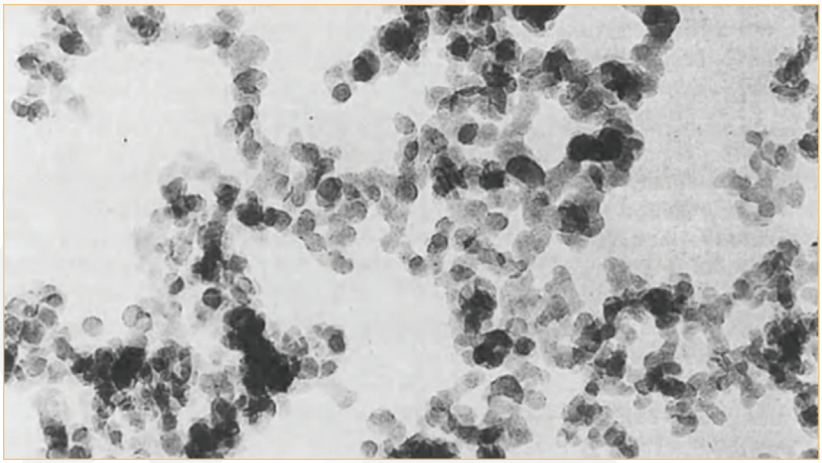
ساختار ذره

فیومد سیلیکا به‌صورت پودر سفید کرکی (شکل ۳) ظاهر می‌شود که با چگالی ظاهری بسیار کم تا محدوده حدود ۲۰ تا ۵۰ گرم بر لیتر مشخص می‌شود. در مقابل، ذره فیومد سیلیکا زیر میکرون[۱۷] متشکل از دی اکسید سیلیکون آمورف دارای چگالی واقعی حدود ۲۲۰۰ گرم بر لیتر است. هر بحثی در مورد ساختار ذرات فیومد سیلیکا باید این تفاوت عظیم را درنظر بگیرد.

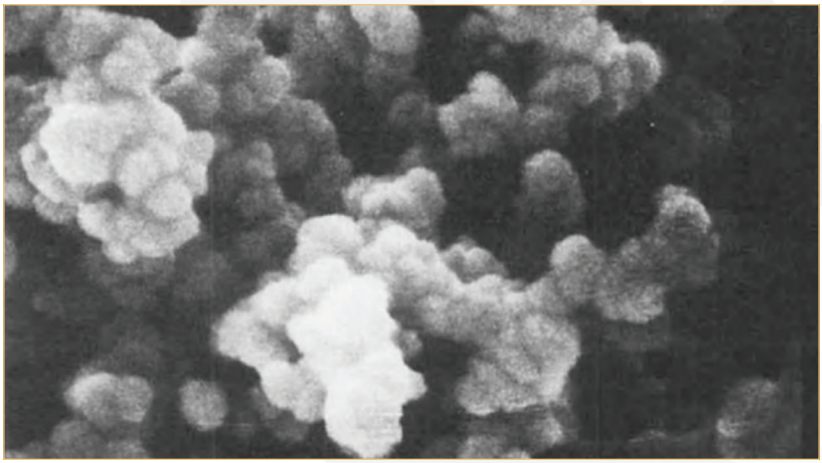
شکل ۳- شکل ظاهری فیومد سیلیکا

با میکروسکوپ الکترونی اندازه ذرات اولیه در توده‌ها حدود ۱۰ نانومتر تخمین زده می‌شود. اندازه‌گیری اندازه ذرات با استفاده از نانوسایزر[۱۸] نشان می‌دهد که اندازه توده‌های پراکنده در یک حلال مرطوب مناسب[۱۹] در محدوده ۱۰۰ نانومتر است. پراش لیزری[۲۰] فیومد سیلیکا پراکنده در هوا، اندازه آگلومرهای بزرگ‌تر از ۵ میکرومتر را فراهم می‌کند.

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM[۲۱]) (شکل ۴) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM[۲۲]) (شکل ۵) ساختار غالب ذرات فیومد سیلیکا توده‌هایی هستند که از ذرات اولیه محکم و تا حدی ذوب شده تشکیل شده‌اند.



شکل ۴- فیومد سیلیکا (مساحت سطح $m^2 g^{-1}$ ۲۰۰-) - TEM



شکل ۵- فیومد سیلیکا (مساحت سطح $125\ m^2g^{-1}$) - SEM

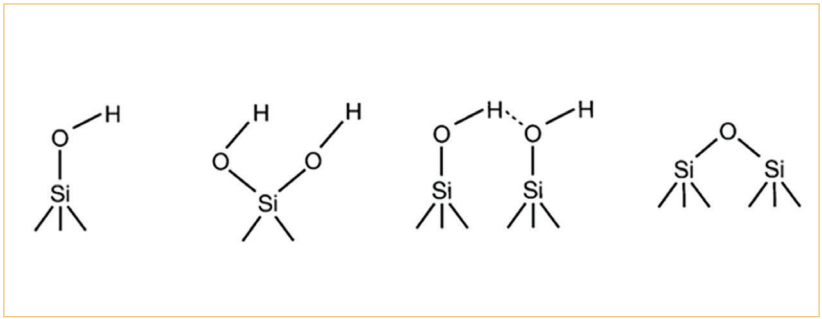
توده‌های فیومد سیلیکا ساختارهای ذره‌ای خطی و منشعب با اندازه متوسط حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر هستند. با استفاده از TEM اندازه ذرات اولیه تقریباً ذوب شده حدود ۱۰ نانومتر به دست آمده است. روش‌های جذب[۲۳] و میکروسکوپ الکترونی مقادیر بسیار نزدیکی از مساحت سطح را ارائه می‌دهند. این روش‌ها نشان می‌دهند که فیومد سیلیکا دارای سطح ذرات صاف در محدوده نانومتر است و ظاهراً سطح آن عاری از ریزمنافذ است. سطح صافِ غیرمتخلخل ذرات فیومد سیلیکا مهم‌ترین ویژگی آن‌ها است، زیرا تفسیر واکنش‌های شیمیایی سطح را ساده می‌کند. علاوه بر این، ریز تخلخل سطح به طور قابل توجهی کارایی برهمکنش سطح سیلیس را کاهش می‌دهد[۱].

شیمی سطح

شیمی یک جامد ریز تقسیم شده[۲۴] با مساحت سطح بالا در مرز بین شیمی مولکولی و فیزیک سطح جامد است. شیمی سطح فیومد سیلیکا توسط واحدهای Si-O-Si و به‌ویژه، پیوندهای Si-O آویزان که گروه‌های سیلانول را تحت تأثیر رطوبت در دمای محیط ایجاد می‌کند، تحت سلطه قرار می‌گیرد.

چگالی گروه‌های سیلانول سطح سیلیس به‌شدت به فرآیند تولید دی‌اکسید سیلیکون بستگی دارد. هیچ مدرکی مبنی بر اینکه فیومد سیلیکا حاوی سیلانول‌های داخلی باشد وجود ندارد. برخلاف محصولات سیلیسی حاصل از فرآیندهای مرطوب، فیومد سیلیکا تنها چگالی سطحی کمی از سیلانول‌های سطحی را نشان می‌دهد. تقریباً هر دوم اتم سیلیکون روی سطح خود دارای یک گروه سیلانول است. بخش بزرگی از این سیلانول‌ها پیوند هیدروژنی ندارند، اما جدا شده‌اند[۲۵] (شکل ۶) و یک نوار[۲۶] IR در $3750\ cm^{-1}$ ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، سیلانول‌های سطحی فیومد سیلیکا با توزیع آماری روی سطح قرار می‌گیرند. به این دلایل، سطح فیومد سیلیکا نسبت به واکنش‌های شیمیایی بسیار واکنش‌پذیر است. فیومد سیلیکا به‌دلیل سیلانول‌های سطحی و همچنین به‌دلیل

ماهیت اکسیدی، دارای انرژی سطحی بالایی است و قابلیت تَر شدن با آب را دارد.



شکل ۶- گروه‌های مختلف سیلانول در سطح فیومد سیلیکا به ترتیب از چپ به راست: سیلانول جدا افتاده، سیلانول ژرمینال[۲۷]، سیلانول همسایه[۲۸] و سیلوکسان[۲۹]

بسیاری از کاربردهای صنعتی فیومد سیلیکا اساساً به انرژی سطحی بالای آن و وجود گروه‌های سیلانول سطحی بستگی دارد؛ اما سیستم‌های مختلفی نیز وجود دارد که در آن‌ها گروه‌های سیلانول فعال و آبِ جذب شده روی سطح آب‌دوست، مضرات جدی را وارد می‌کنند. در نتیجه، یکی از مهم‌ترین واکنش‌ها بر روی فیومد سیلیکا، سیلیله شدن گروه‌های سیلانول سطحی است. غیرفعال‌سازی گروه‌های سیلانول سطحی همچنین انرژی سطحی اکسید را کاهش می‌دهد.

سیلیسه کردن سبب آب‌گریز شدن فیومد سیلیکا می‌شود. رایج‌ترین عوامل سیلیله کننده آلکیل کلروسیلان‌ها[۳۰] به‌عنوان دی‌کلرو دی‌متیل سیلان[۳۱] یا آلکیل سیلازان‌ها[۳۲] به‌عنوان هگزامتیل دی‌سیلازان[۳۳] هستند[۱].

کاربردها

فیومد سیلیکا در بخش‌های مختلف صنعت کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است (شکل ۷). مهم‌ترین آن‌ها تقویت الاستومرها به‌عنوان یک پرکننده فعال و تغلیظ مایعات به‌عنوان یک افزودنی رئولوژیکی[۳۴] است، این دو کاربرد بیش از دو سوم حجم بازار فیومد سیلیکا را پوشش می‌دهند. حجم‌های کوچک‌تری از فیومد سیلیکا به‌عنوان افزودنی جریان آزاد[۳۵] در مواد جامد پودر مانند، به‌عنوان مثال در تونر دستگاه‌های کپی و چاپگر، در خاموش‌کننده‌های آتش‌نشانی یا حتی مواد غذایی استفاده می‌شود. همچنین در عوامل ضدفوم[۳۶] به عنوان ضدانسداد[۳۷]، در عایق کابل، کاتالیزور، لوازم‌آرایشی، جاذب، پوشش کاغذ[۳۸]، داروسازی و غیره استفاده می‌شود. همه این کاربردها از دو خاصیت فیومد سیلیکا که از منشأ گرمازایی آن ناشی می‌شود سود می‌برند: ساختاری از ذرات ریز پراکنده و انباشته شده و سطحی وسیع با فعالیت بالا[۱].

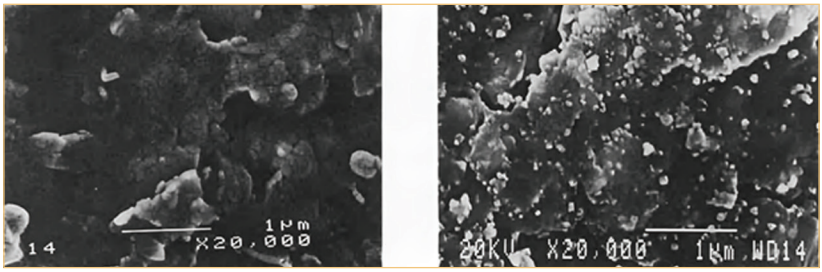
در ادامه به بررسی برخی کاربردهای فیومد سیلیکا می‌پردازیم.

شکل ۷- کاربرد فیومد سیلیکا در صنایع مختلف

جریان آزاد تونرها

توانایی فیومد سیلیکا برای پشتیبانی و حفظ جریان آزاد جامدهای پودر مانند مستقیماً با اندازه ذرات کوچک توده‌های آن مرتبط است. توده‌های سیلیس سطح ذرات پودری را می‌پوشانند و در نتیجه از تجمیع ذرات پودری جلوگیری می‌کنند و علاوه بر این به‌عنوان یک بلبرینگ عمل می‌کنند تا پودر جریان یابد (شکل ۸)[۱].

جریان آزاد تونر در دستگاه کپی برای جریان دقیق تونر و کیفیت تصویر ضروری است. بدون سیلیس، جریان



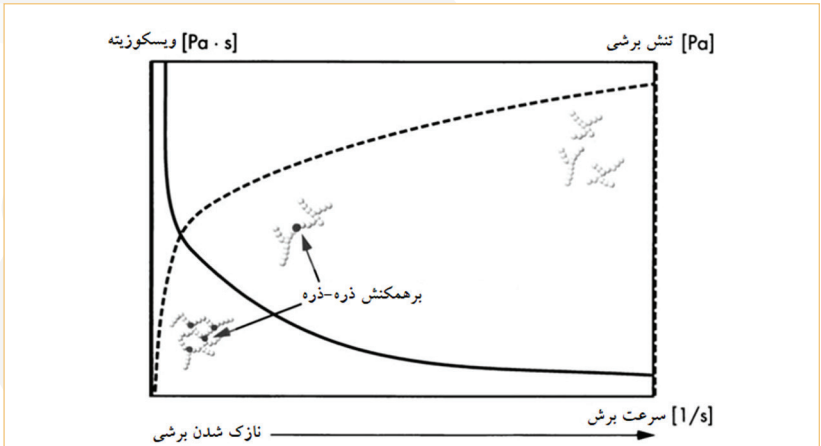
شکل ۸- SEM از ذرات تونر بدون فیومد سیلیکا (چپ) و با غلظت ۰٫۴٪ از فیومد سیلیکا (راست)

آزاد تونر پس از کپی‌های متعدد کاهش می‌یابد و سبب کاهش کیفیت تصویر می‌شود. سیلیس بسیار آب‌گریز به عنوان یک افزودنی جریان آزاد، جریان‌پذیری تونر را حفظ می‌کند. علاوه بر این، هر افزودنی باید با قابلیت شارژ سیستم تونر سازگار باشد. مشخص شده است که تونر نیاز به افزودن یک نوع سیلیس با قطبیت و شارژپذیری یکسان دارد. شارژپذیری سیلیس توسط شیمی سطحی کنترل می‌شود - سیلیسه و آب‌گریز شدن قطبیت منفی دی‌اکسید سیلیکون را حفظ می‌کند و اصلاح سطح توسط ترکیبات سیلیکون آلی آمینه یا آمونیوم منجر به شارژ پذیری مثبت می‌شود[۳].

تغلیظ مایعات

بسیاری از فرآیندهای صنعتی و تولیدی نیاز به اعمال محلول مایع، رزین یا پلیمر (مانند پوشش‌ها، رنگ‌ها، لاک‌ها و غیره) بر روی لایه‌های عمودی دارند. در حین استفاده، مایع باید نازک و فرآیند رنگ‌آمیزی و پاشش آسان باشد اما هم‌زمان فیلم مایع اعمال شده باید در مدت زمان لازم برای سخت شدن روی بستر باقی بماند. فیومد سیلیکا دارای خواص یک غلیظ کننده مؤثر است که متورم نمی‌شود و از نظر شیمیایی بی‌اثر است. علاوه بر این غلیظ شدن توسط فیومد سیلیکا منجر به یک سیستم غیر نیوتنی می‌شود که معمولاً با نقطه تسلیم[۳۹] (حد روان شدن)، نازک شدن برشی[۴۰] و تیکسوتروپی[۴۱] (کاهش ویسکوزیته ظاهری مایعات، تحت عملیات و تنشی ثابت با گذشت زمان.) همراه است؛ بنابراین فیومد سیلیکا به روشی عالی، الزامات نازک شدن برشی برگشت‌پذیر را تحت تنش برشی بالا اما یک نقطه تسلیم مشخص یا ویسکوزیته بالا در تنش‌های برشی پایین‌تر حل می‌کند.

این اثرات رئولوژیکی که فیومد سیلیکا بر یک سیستم مایع تحمیل می‌کند، ممکن است با فعل‌وانفعال شگفت‌انگیز ساختار ذرات و برهمکنش‌های سطحی، همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، درک شود. این شبکه پرکننده فضا[۴۲] از ذرات فیومد سیلیکا در حال نفوذ[۴۳] و تعامل ممکن است منجر به ویسکوزیته بسیار



شکل ۹- تغلیظ مایعات با فیومد سیلیکا

زیاد یا حتی یک نقطه تسلیم شود. مایع غلیظ شده قوام ژل مانندی پیدا می‌کند و در مقابل تنش برشی مقاومت می‌کند تا زمانی که تنش برشی بر استحکام فعل‌وانفعالات ذره-ذره غلبه کند و شروع به شکستن شبکه ذرات و آگلومرهای بزرگ به خوشه‌های کوچک‌تر از توده‌ها کند. با افزایش سرعت برش، پیوندهای ذرات بیشتر و بیشتری شکسته می‌شوند. با این کار شبکه ذرات از بین می‌رود، اندازه آگلومرها کاهش می‌یابد و مایع تحت تنش برشی رقیق می‌شود. در لحظه‌ای که تنش برشی کاهش می‌یابد یا متوقف می‌شود، توده‌ها و آگلومرهای کوچک مجدداً مرتب می‌شوند و دوباره شروع به برهمکنش می‌کنند و به توده‌های بزرگ‌تر رشد می‌کنند. مایع دوباره توسط سیلیس غلیظ می‌شود، اما از آنجایی که بازآرایی ذرات به زمان نیاز دارد سیستم تیکسوتروپیک رفتار می‌کند.

منشأ پیوند توده‌های سیلیس به آگلومرها و شبکه‌های ذرات برهمکنش‌های سطح ذرات است. پیوندهای هیدروژنی بین ذره‌ای به عنوان نیروی اصلی برای اتصال ذرات فیومد سیلیکا به یکدیگر مورد بحث قرار گرفته است. مطالعه اثر تغلیظ فیومد سیلیکا آب‌گریز، آب‌دوست و سیلیله در مایعات با قطبیت‌های مختلف تصویر کلی‌تری از برهمکنش ذرات و توانایی تغلیظ را نشان می‌دهد. مشخص شده که سیستم مشابهی از سطح سیلیس و محیط مایع، تغلیظ مشخصی را نشان نمی‌دهد، در حالی که اگر سطح سیلیس به‌طور قابل توجهی با مایع متفاوت باشد، اثر تغلیظ بالا رخ خواهد داد (جدول ۲)[۱].

جدول ۲- قواعد برهمکنش‌های ذره-ذره

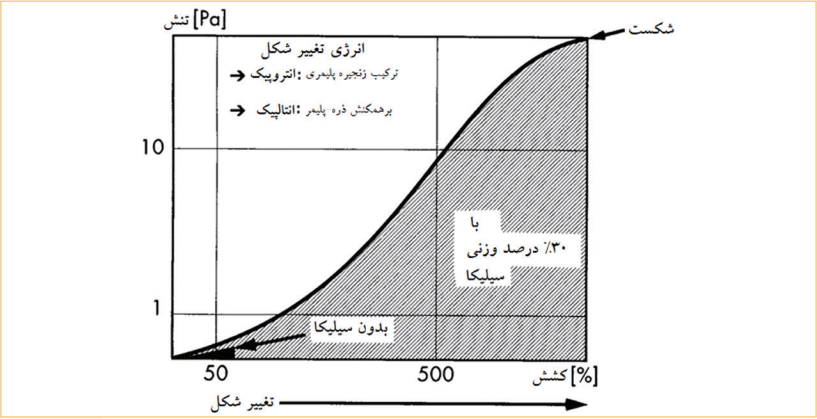
مایع / سیلیکا	قطبی-آب‌دوست	ناقطبی-آب‌گریز
قطبی	■ بدون برهمکنش ■ بدون تغلیظ	■ برهمکنش آب‌دوست ■ تغلیظ بالا
ناقطبی	■ پیوند هیدروژنی ■ تغلیظ بالا	■ بدون برهمکنش ■ بدون تغلیظ

تقویت الاستومرها

اساساً یک لاستیک باید بتواند تحت تنش کشیده شود تا در برابر استرس بدون شکستگی مقاومت کند و پس از پایان تنش به شکلی برگشت‌پذیر به شکل اولیه خود بازگردد. یک پلیمر پر نشده[۴۴] و عمل آمده[۴۵] به‌ندرت این الزامات را برآورده می‌کند. این یک واقعیت است که برای اکثر سیستم‌های لاستیکی صادق است؛ بنابراین توسعه صنعتی الاستومرها به‌شدت با تولید پرکننده‌های تقویت‌کننده فعال مرتبط است.

استحکام مکانیکی بالای لاستیک‌های طبیعی و آلی که در تایرها استفاده می‌شود، به‌دلیل ترکیب کربن سیاه گرمازا[۴۶] به‌عنوان پرکننده‌های فعال است. الاستومرهای ستون فقرات پلیمرهای قطبی‌تر مانند پلی آکریلات‌ها، پلی‌یورتان‌ها یا پلی‌سولفیدها، به پرکننده‌هایی با قطبیت بالاتر نیاز دارند. به‌ویژه عملکرد الاستومرهای پلی دی

متیل سیلوکسان (لاستیک سیلیکونی) اساساً با افزودن فیومد سیلیکا مرتبط است.
پلیمر سیلیکونی ولکانیزه لُخت (یک شبکه پلی دی‌متیل سیلوکسان)، استحکام مکانیکی پایینی را نشان می‌دهد. اضافه کردن ۳۰ درصد وزنی فیومد سیلیکا از طریق اختلاط و پراکندگی باعث افزایش طول[۴۷] و تنش در هنگام شکست به میزان بیش از ۱۰ می‌شود (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- تقویت الاستومرها با فیومد سیلیکا

برای درک خواص مکانیکی الاستیک، بحث ذخیره انرژی تغییر شکل یک رویکرد قدرتمند را ارائه می‌دهد. اندازه‌گیری‌های مکانیکی دینامیکی در کشش بالا روی الاستومرهای سیلیکونی پرشده نشان می‌دهد که انرژی تغییر شکل ممکن است به بخش انتروپیک و انتالپیک مرتبط باشد. بخش انتروپیک عمدتاً به‌دلیل محدودیت فضای ساختاری زنجیره پلیمری در حضور ذرات جامد سیلیس است. در حالی که بخش انتالپیک انرژی تغییر شکل مربوط به فعل‌وانفعالات ذره-پلیمر در سطح سیلیس است. بخش انتالپیک ذخیره‌سازی انرژی تغییر شکل ممکن است هنگامی که تعداد بهینه برهمکنش‌های سطح پلیمر روی ذره در حالی که تنش به الاستومر اعمال می‌شود کاهش یابد توضیح داده شود. زنجیر پلیمری ممکن است از سطح ذره دور شود یا موقعیت بهینه خود را نسبت به سطح ذره از دست بدهد. هنگامی که کشش آرام می‌شود، بهینه‌سازی و جهت‌دهی مجددِ زنجیره سیلیکونی به مکان‌های جذب فعال سطح ذرات، انرژی برهمکنش را آزاد می‌کند[۱].

بسته‌بندی آنتی‌باکتریال مواد غذایی

امروزه از دست دادن و هدر رفت مواد غذایی یک موضوع بسیار مشکل‌ساز است. FAO[۴۸]، در گزارشی در سال ۲۰۱۹، ارائه کرد که نزدیک به یک سوم مواد غذایی در نظر گرفته شده برای استفاده انسان (تقریباً ۱٫۳ میلیارد تن در سال) از بین یا هدر می‌رود. این یک تقریب در سال ۲۰۱۱ بود و هنوز به‌عنوان تنها تخمین جهانی در نظر گرفته می‌شود که تمام بخش‌های عرضه و تولید مواد غذایی را پوشش می‌دهد. بسته‌بندی مواد غذایی یکی از راه‌حل‌ها است و همان‌طور که توسط AMERIPEN[۴۹] (موسسه آمریکایی بسته‌بندی و محیط زیست) گزارش شده است،

تقریباً از ۲۵-۲۰٪ ضایعات مواد غذایی می‌توان با استفاده از فناوری‌های بسته‌بندی مواد غذایی جلوگیری کرد. این نقش فعال به بهبود ماندگاری مواد غذایی (مربوط به کیفیت) و عمر ایمن (مربوط به ایمنی) مربوط می‌شود که اغلب از طریق (اما نه تنها) کاهش رشد میکروبی است. بر این اساس، نیاز به بهبود گزینه‌های بسته‌بندی مواد غذایی موجود با عملکردهای مناسب برای کاهش رشد میکروبی وجود دارد. برای این کار، پراکندگی نانو/میکرو پرکننده‌های مبتنی بر فلز در یک ماتریس پلیمری یک مسیر شناخته شده برای توسعه بسته‌بندی ضدمیکروبی است.

علی‌رغم اثربخشی بالای پرکننده‌های مبتنی بر فلز در کاهش اثرات میکروبی، مقررات مربوط به تأیید آن‌ها پیچیده است که بیشتر به‌دلیل نگرانی‌های مربوط به سمیت آن‌ها برای انسان است. این امر به‌طور مستقیم با رفتار مهاجرت چنین پرکننده‌هایی مرتبط است که می‌تواند از طریق ۱) انتشار ذرات از داخل فیلم، ۲) دفع ذرات واقع در سطح فیلم و ۳) انحلال یون فلزی که در آن فیلم به‌عنوان یک پلیمر تبادل یونی[۵۰] عمل می‌کند، رخ دهد. در نتیجه، توسعه راهبردهایی برای تضعیف و به نوعی کنترل رفتار مهاجرت چنین پرکننده‌هایی یک زمینه جالب برای کاهش اثرات منفی مربوط به استفاده از آن‌ها است. یک رویکرد برای رسیدن به این هدف، به دام انداختن سایت فعال (به عنوان مثال، AgNPs[۵۱]، CuNPs، یا CuONPs) به صورت فیزیکی و/یا شیمیایی به یک پرکننده معدنی دیگر و ایجاد پرکننده‌های دو یا سه طرفه[۵۲] است. این امر با اجتناب از مهاجرت ذرات و سطوح بالای مهاجرت یون‌های فلزی باعث محدودیت مهاجرت سایت فعال می‌شود. از سوی دیگر، این نوع پرکننده‌ها می‌توانند طیف وسیعی از خواص بهبود یافته را (مانند سد گاز، حرارتی، مکانیکی و غیره) به‌دلیل اثر هم‌افزایی ترکیبی که از هر دو ساختار موجود در پرکننده حاصل می‌شود، ارائه دهند.

با در نظر گرفتن این راهبرد، اخیراً پرکننده‌های ضدباکتری دوطرفه متشکل از نقره (Ag/FS[۵۳])، مس (Cu/FS) و هیدروکسی نیترات مس ($Cu_2(OH)_3$; CuHS/FS) در اندازه ذرات میکرو بر روی یک نانو فیومد سیلیکا گرمازا (SiO_2/FS) برای استفاده به‌عنوان پرکننده پلیمری توسعه داده شد.

علی‌رغم عدم‌تأیید تماس مواد غذایی با سایت‌های فعال، استفاده از فیومد سیلیکا با گرید غذایی به‌عنوان ماتریس دوپینگ رویکرد مناسبی برای تأیید آسان‌تر آن‌ها تحت عنوان محصول نهایی است چرا که به‌عنوان افزودنی مجاز غذایی طبقه‌بندی شده است.

چسبندگی قوی ذرات فلزی به سطح فیومد سیلیکا سبب کاهش سطوح مهاجرت و بهبود خواص ضدمیکروبی پرکننده‌های فلزی در بسته‌بندی‌های پلیمری سخت مواد غذایی می‌شود[۴].

تولیدکنندگان داخلی

در ایران شرکت نانوجاذب‌های پیشرفته نوین برای اولین بار به فناوری تولید فیومد سیلیکا دست یافته است.

شرکت نانوجاذب‌های پیشرفته نوین

شرکت نانوجاذب‌های پیشرفته نوین، یک شرکت نوپا در شهرک صنعتی شکوهیه استان قم است که در حال حاضر مشغول تکمیل ظرفیت خط تولید و ساخت دستگاه‌های موردنیاز جهت تولید در مقیاس تناژ در ماه است و تاکنون فروشی از این محصول نداشته است. درعین‌حال پیش‌بینی می‌شود که تولید سالیانه فیومد سیلیکا در شرکت نانوجاذب‌های پیشرفته نوین به‌زودی حدود ۹۰ تن در سال و در آینده‌ای نه‌چندان دور ۵ هزار تن در سال باشد[۵].

تولیدکنندگان خارجی

در خارج از کشور شرکت‌های مختلفی در سراسر جهان اقدام به تولید فیومد سیلیکا کرده‌اند که در ادامه به بررسی برخی از آن‌ها می‌پردازیم.

■ Dongyue Group

گروه Dongyue در سال ۱۹۸۷ در چین تأسیس شده است. این شرکت عمدتاً در بحث تحقیق و توسعه و تولید مبردهای جدید سازگار با محیط زیست، مواد پلیمری حاوی فلوئور، مواد آلی سیلیسی، غشاهای یونی کلر-قلیایی و غشاهای تبادل پروتون سوخت هیدروژن و غیره مشغول است.
(http://www.dongyuechem.com/en/default.aspx)

■ Kemitura Group

گروه Kemitura یک شرکت شیمیایی / فنی است که در سال ۱۹۴۱ در دانمارک تأسیس شده است. این شرکت یکی از بازیگران پیشرو در حوزه تولید فیومد سیلیکا در جهان است. (http://www.kemitura.com/)

■ Cabot

Cabot Corporation یک شرکت پیشرو در زمینه مواد شیمیایی و مواد عملکردی است که دفتر مرکزی آن در بوستون، ماساچوست آمریکا قرار دارد. این شرکت یکی از بازیگران در حوزه تولید فیومد سیلیکا در جهان است.
(https://www.cabotcorp.com/)

■ OCI

شرکت OCI (صنایع شیمیایی شرقی سابق) یک شرکت شیمیایی در کره جنوبی است که در سال ۱۹۵۹ تأسیس شد. OCI مواد شیمیایی پایه مانند کلرید کلسیم، کربنات سدیم، سدیم پرکربنات، سیلیکون پلی کریستالی، فیومد سیلیکا، تری فلوراید نیتروژن و پراکسید هیدروژن، مواد شیمیایی کربنی مانند کربن سیاه و فنل‌ها را برای صنایع شیمیایی و تخصصی تولید می‌کند. (https://www.oci.co.kr/eng/)

بازار جهانی فیومد سیلیکا

اندازه بازار فیومد سیلیکا در سال ۲۰۲۰ برابر با ۱۵۹۹ میلیون دلار بود و از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۷ شاهد ۵٫۴ درصد رشد مرکب سالانه خواهد بود. فیومد سیلیکا بسیار متنوع است و می‌تواند در محصولاتی با استفاده روزانه تا محصولات صنعتی مورد استفاده قرار بگیرد.

چشم‌انداز مثبت صنعت رنگ و پوشش به‌دلیل افزایش تقاضا از طرف بخش‌های ساختمانی و خودرو، از بازار فیومد سیلیکا حمایت می‌کند زیرا برای بهبود خواص رئولوژیکی، تیکسوتروپیک و ضد شُر شدن رنگ‌ها و پوشش‌ها استفاده می‌شود[۶].

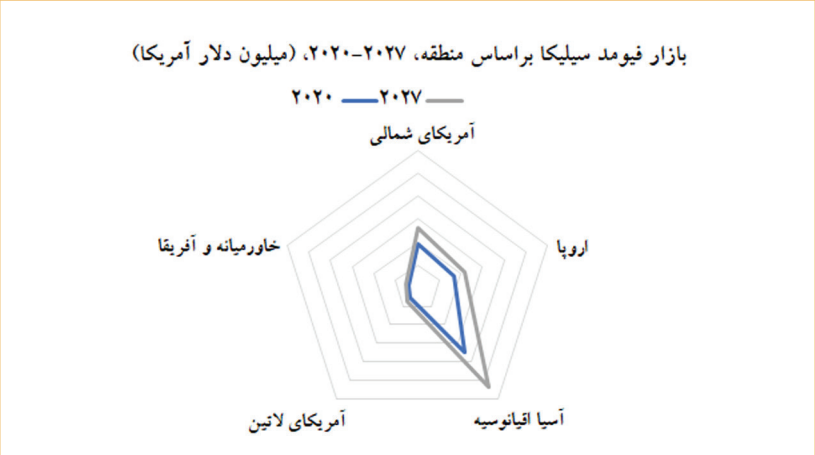
■ **فیومد سیلیکا آب‌دوست بر بازار تسلط دارد.**

در سال ۲۰۲۰، فیومد سیلیکا آب‌دوست به‌دلیل طیف وسیعی از کاربردها، حدود ۶۰ درصد سهم داشت. این سیلیس دارای خواص عایق خوب در دماهای بالا است. فیومد سیلیکا آب‌دوست برای استفاده در سیستم‌های رزین غیرقطبی مناسب است. این ماده در تقویت و تغلیظ سیلیکون، به‌عنوان لغزنده برای پودرهای غذایی و صنعتی و در تغلیظ حلال‌های غیرقطبی مانند زایلن، الکل‌های معدنی و استایرن استفاده می‌شود[۶].

■ **داروسازی، مراقبت‌های زیبایی و شخصی جلودار رشد صنعت**

بخش دارویی، مراقبت‌های زیبایی و شخصی تا سال ۲۰۲۷ شاهد حدود ۵٫۵٪ رشد مرکب سالانه خواهد بود. این محصول در فرمولاسیون‌های مختلف دارو، کپسول و قرص و در محصولات مراقبت از مو، پوست و دهان برای ایجاد خواص لازم استفاده می‌شود. افزایش جمعیت در ترکیب با افزایش هزینه‌ها برای محصولات مراقبت بهداشتی و زیبایی منجر به رشد قوی بازار فیومد سیلیکا در سال‌های آینده خواهد شد[۶].

آسیا و اقیانوسیه از نظر مصرف و تولید در خط مقدم است. آسیا و اقیانوسیه در سال ۲۰۲۰ بیش از ۴۰ درصد از سهم را در اختیار داشت و پیش‌بینی می‌شود در دوره پیش‌بینی با نرخ قابل توجهی رشد کند. رشد به افزایش تقاضا برای محصول از سوی اقتصادهای نوظهور مختلف مانند چین، هند و ژاپن نسبت داده می‌شود[۶].



شکل ۱۱- بازار فیومد سیلیکا بر اساس منطقه

■ **افزایش سرمایه‌گذاری تحقیق و توسعه یک روند عمده مشاهده شده در بازار است.**

تولیدکنندگان سرمایه‌گذاری‌های تحقیق و توسعه را افزایش می‌دهند تا توسعه روش‌های جدید تولید را با هزینه کم به دست آورند[۶].

چالش: اثر نامطلوب فیومد سیلیکا بر سلامت انسان

فیومد سیلیکا می‌تواند خطرات بهداشتی مختلفی را برای کارگران صنایع مختلف مصرف نهایی و همچنین برای افرادی که از محصولی که در آن فیومد سیلیکا استفاده می‌شود، ایجاد کند. فیومد سیلیکا می‌تواند باعث مشکلاتی مانند سوزش چشم در تماس شدید و آسیب چشم در مواجهه مکرر شود. می‌تواند باعث بیماری‌های شبه آنفولانزا مانند سردرد، تب، لرز، درد، سرفه و گرفتگی قفسه سینه شود. فیبروز یکی از اثرات طولانی‌مدت فیومد سیلیکا است که می‌تواند باعث آسیب ریه شود. تحقیقات بیولوژیکی برای یافتن اثرات فیومد سیلیکا بر موجودات زنده در حال انجام است[۷].

پی‌نوشت‌ها

۱ Fumed silica
۲ Pyrogenic
۳ Silicon tetrachloride
۴ Dispersed amorphous silicon dioxide
۵ Silanol
۶ Space-filling particle structure
۷ Micro porous
۸ Free-flow additive
۹ Thickener
۱۰ Reinforcing filler
۱۱ Collision
۱۲ Coalescence
۱۳ Protoparticles
۱۴ Fusion
۱۵ Protoparticles
۱۶ Aggregates
۱۷ Submicron fumed silica
۱۸ Nanosizer
۱۹ Well wetting solvent
۲۰ Laser diffraction
۲۱ Transmission electron microscopy
۲۲ Scanning electron microscopy
۲۳ Adsorbtion
۲۴ Divide solid
۲۵ Isolated
۲۶ Infrared
۲۷ Germinal silanol
۲۸ Vicinal silanol
۲۹ Siloxane
۳۰ Alkylchlorosilanes
۳۱ Dichlorodimethylsilan
۳۲ Alkylsilazane
۳۳ Hexamethyldisilazane
۳۴ Rheological additive
۳۵ Free flow additive
۳۶ Anti-foam agent
۳۷ Anti-blocking
۳۸ Paper coating
۳۹ Yield point
۴۰ Shear thinning
۴۱ Thixotropy
۴۲ Space-filling network
۴۳ Percolating
۴۴ Unfilled
۴۵ Cured
۴۶ Pyrogenic carbon blacks
۴۷ Elongation
۴۸ Food and Agriculture Organization of the United Nations
۴۹ American institute for packaging and environment

۵۰ Ionic-exchange polymer

۵۱ Nanoparticles

۵۲ Dual or triple-side fillers

۵۳ Fumed silica

مراجع

۱ Barthel, H., L. Rösch, and J. Weis, Fumed silica-production, properties, and applications. Organosilicon Chemistry Set: From Molecules to Materials, 2005: p. 761-778.

۲ Fumed silica theroretical properties. Available from: https://www.americanelements.com/fumed-silica-112945-52-5#related-app-industries.

۳ Barthel, H. and M. Heinemann. The Surface Modification of Silicas on the Free Flow and Charging Properties of Monocomponent Magnetic Toners. in INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL PRINTING TECHNOLOGIES. 1996. IS & T SOCIETY FOR IMAGING SCIENCE AND TECHNOLOGY.

۴ Videira-Quintela, D., et al., Antibacterial LDPE films for food packaging application filled with metal-fumed silica dual-side fillers. Food Packaging and Shelf Life, 2022. 31: p. 100772.

۵ Iranina manufacturer Available from: https://nanoproduct.ir/news/69106

۶ fumed silica market gminsights. Available from: https://www.gminsights.com/industry-analysis/fumed-silica-market.

۷ fumed silica markettandmarkets.