

مروری بر انواع لاستیک سیلیکون و روش‌های پخت در دمای بالا

احسان عالی‌خانی*

قم، دانشگاه صنعتی قم، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

لاستیک‌های سیلیکون دسته‌ای ویژه از پلیمرهای الاستومری هستند که به دلیل خواص فوق‌العاده، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع برق و الکترونیک، بهداشتی و پزشکی، خودروسازی، نظامی و هوافضا پیدا کرده‌اند. انعطاف‌پذیری بالا در دماهای بسیار پایین، زیست‌سازگاری، مقاومت عالی به اوزون و پیرشدگی، پایداری گرمایی بالا و آب‌گریزی، تنها بخشی از خواص منحصر به فرد لاستیک‌های سیلیکون به شمار می‌آیند. لاستیک‌های سیلیکون از نظر سامانه پخت به دو دسته‌ی پخت‌شونده در دمای بالا و پخت‌شونده در دمای پایین تقسیم می‌شوند. نوع سامانه‌ی پخت و عامل پخت‌کننده، می‌توانند تأثیر چشمگیری بر خواص نهایی این پلیمر داشته باشند. از این رو مقاله‌ی مروری حاضر، ابتدا لاستیک‌های سیلیکون و انواع دسته‌بندی آن‌ها را مرور می‌کند. سپس سامانه‌های پخت مرسوم و نیز، عوامل نوین پخت لاستیک‌های سیلیکون در دمای بالا را مورد بررسی قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی:

لاستیک سیلیکون،
پلی‌سیلوکسان،
انواع لاستیک‌های سیلیکون،
پخت پراکسیدی،
پخت افزایشی

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

Ehsanalikhani120@gmail.com

۱ مقدمه

سیلیکون‌ها دسته‌ای از مواد سنتزی با ماهیت معدنی-آلی هستند، که در زنجیر اصلی خود به صورت یک در میان اتم‌های اکسیژن و سیلیسیم (Silicium) دارند. طول این زنجیر از ده‌ها واحد تکرارشونده شروع شده، در لاستیک‌های سیلیکون به هزاران واحد تکرارشونده می‌رسد. انواع سیلیکون‌ها گستره‌ی بزرگی از مواد، مانند روغن‌های مقاوم به گرما، گریس‌ها، عوامل اصلاح‌کننده‌ی سطح و لاستیک‌های منعطف و دارای ویژگی‌های منحصر به فرد را شامل می‌شوند [۱،۲]. لاستیک‌های سیلیکون که پلی‌سیلوکسان نیز نامیده می‌شوند، پیوندهای بین مولکولی ضعیفی دارند. ضعف بودن پیوندهای بین مولکولی، باعث شده است که لاستیک‌های سیلیکون حتی در دماهای پایین نیز، کشسانی و تراکم‌پذیری بالایی داشته باشند [۴]. خواص فوق‌العاده‌ی سیلیکون‌ها از ساختار مولکولی منحصر به فردشان سرچشمه می‌گیرد. بیشتر بودن انرژی پیوند Si-O نسبت به انرژی پیوند C-C، تأثیر بسیار زیادی بر خواص لاستیک‌های سیلیکون نسبت به لاستیک‌های آلی که زنجیر اصلی‌شان متشکل از پیوندهای C-C است، داشته است.

برخی از خواص لاستیک‌های سیلیکون از لاستیک‌های آلی، برتر است. خواصی مانند پایداری گرمایی، پایداری شیمیایی، مقاومت سایشی، پایداری آب‌وهوایی، مقاومت به اوزون و حفظ خواص کشسانی در دماهای بسیار پایین [۵-۱۱] از این دسته‌اند. به خاطر همین خواص منحصر به فرد، لاستیک‌های سیلیکون به صورت گسترده‌ای به جای پلیمرهای پتروشیمیایی در صنایع مختلفی همچون، هوافضا و خودروسازی [۴،۱۴]، برق [۱۲،۱۳]، ساختمان‌سازی [۱۵-۱۷] و نیز ساخت صفحات منعطف رسانای گرما [۱۸،۱۹]، عایق‌های فداشونده [۲۰،۲۱] و تجهیزات پزشکی [۱،۱۴] استفاده می‌شوند. شکل ۱ یکی از کاربردهای لاستیک سیلیکون در صنعت الکترونیک را نشان می‌دهد.

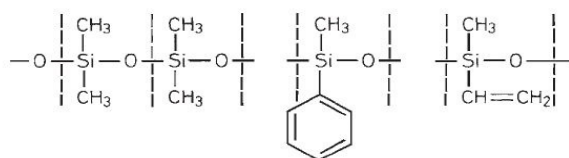
۲ دسته‌بندی لاستیک‌های سیلیکون

۲-۱ بر اساس استخلاف روی زنجیر و عملکرد نهایی

در زنجیر لاستیک‌های سیلیکون، هر اتم سیلیسیم از دو جهت به اتم اکسیژن متصل است. دو استخلاف دیگر سیلیسیم در هنگام سنتز، با گروه‌های آلی مانند متیل، وینیل، فنیل و غیره، پُر می‌شوند [۱،۳،۴]. بسته به نوع این استخلاف‌ها، خواص و نام لاستیک سیلیکون تغییر می‌کند. برای مثال اگر هر دو استخلاف از گروه متیل (Methyl) تشکیل شده باشند، این لاستیک، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS یا MQ) نامیده می‌شود. معمولاً به منظور بهتر و سریع‌تر انجام شدن واکنش پخت، مقادیر معینی از گروه‌های متیل را با گروه‌های وینیل (Vinyl) جایگزین می‌کنند و لاستیک حاصل را متیل‌وینیل‌سیلوکسان (MVQ) می‌نامند. همچنین برای افزایش کارایی لاستیک‌های سیلیکون در دماهای خیلی بالا یا خیلی پایین، چند درصد از گروه‌های متیل را با گروه‌های فنیل (Phenyl) جایگزین می‌کنند [۱].

این لاستیک با نام فنیل‌متیل‌سیلوکسان (PMQ) شناخته می‌شود. PMQها دارای مقاومت تابشی (مقاومت به تابش‌های رادیواکتیو) بالاتری نسبت به سایر اعضای خانواده‌ی خود هستند [۲۲].

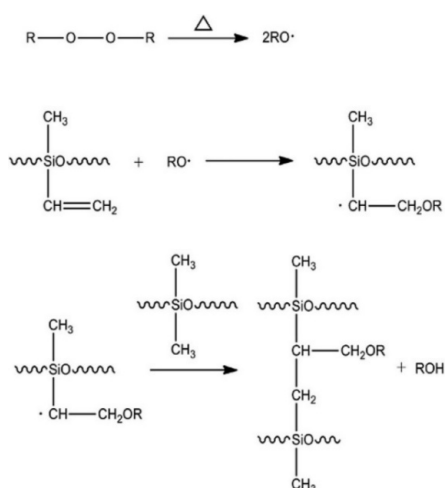
شکل ۲، ساختار این سه گونه لاستیک سیلیکون را نشان می‌دهد. البته برای داشتن پختی بهتر به PMQها نیز مقادیر کمی گروه‌های وینیلی اضافه می‌کنند که در این صورت آن‌ها را فنیل‌وینیل‌متیل‌سیلوکسان (PVMQ) می‌نامند [۲]. اصلاحات دیگری نیز روی گروه‌های جانبی لاستیک سیلیکون انجام شده است. برای مثال در دهه‌ی ۱۹۵۰، لاستیک‌های سیلیکونی عرضه شدند که در آن‌ها برخی از گروه‌های متیل با گروه‌های شامل فلئوئور و نیتریل جایگزین شده بودند. هرچند که لاستیک‌های سیلیکون شامل گروه نیتریل به لحاظ تجاری مورد توجه قرار نگرفتند. ولی لاستیک‌های دارای گروه‌های فلئوئور (FMQ) با



شکل ۲ ساختار مولکولی سه گونه‌ی پرکاربرد لاستیک سیلیکون. از راست به چپ به ترتیب عبارت‌اند از MVQ، PMQ و MQ [۳].



شکل ۱ کاربرد لاستیک سیلیکون در صنعت الکترونیک. صفحات انعطاف‌پذیر رسانای گرما [۱۹].



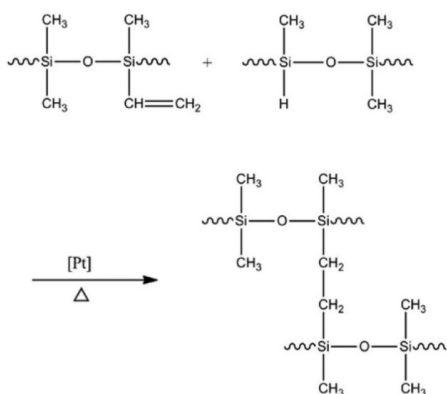
شکل ۵- سازوکار پخت MVQ با سامانه ی پخت پراکسیدی [۲۵].

دمای اتاق (RTV) تقسیم می شوند. لاستیک های سیلیکون HTV نسبت به لاستیک های سیلیکون RTV در دما و فشار بالاتری پخت می شوند. افزون بر این، انواع HTV نسبت به RTV، خواص مکانیکی و مقاومت به پیرشدگی بهتری دارند و دارای توانایی کافی برای کاربری طولانی مدت در فضای باز هستند [۳]. شکل ۴ به صورت طرح وار، دسته بندی لاستیک های سیلیکون بر اساس دمای پخت را نشان می دهد.

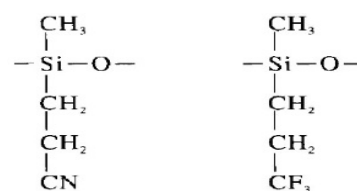
۳ شبکه ای کردن لاستیک های سیلیکون HTV

به طور کلی پخت پراکسیدی و پخت افزایشی (Addition Cure) به دو روش متداول برای پخت لاستیک های سیلیکون HTV به شمار می آیند.

شکل های ۵ و ۶، سازوکار پخت MVQ را به ترتیب با پخت پراکسیدی و پخت افزایشی، نمایش می دهند.



شکل ۶ سازوکار پخت MVQ با سامانه ی پخت افزایشی [۲۵].



شکل ۳ ساختار مولکولی لاستیک های سیلیکون شامل فلئور و نیتریل، به ترتیب از راست به چپ [۴].

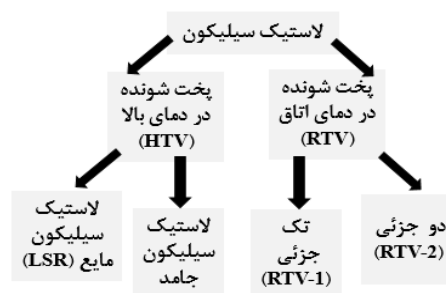
وجود قیمت بسیار بالایی که دارند؛ به دلیل پایداری فوق العاده در برابر حلال ها، روغن ها و مواد سوختی، کاربردهای گسترده ای یافتند [۴]. همچنین برای پخت بهتر FMQها نیز مقداری گروه وینیلی به زنجیر پلیمر اضافه می شود که در این صورت، به آن FVMQ می گویند.

شکل ۳ ساختار شیمیایی لاستیک های سیلیکون دارای گروه های نیتریل و فلئور را نشان می دهد. نوع استخلاف های موجود بر سیلیسیم، خواص و عملکرد لاستیک سیلیکون را تعیین می کنند. بر همین اساس، لاستیک های سیلیکون تجاری به چهار دسته ی اصلی تقسیم می شوند.

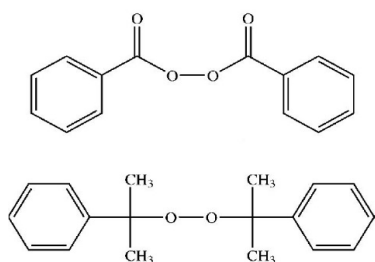
لاستیک های سیلیکون معمولی (General Purpose) شامل MQها و MVQها، لاستیک های سیلیکون با عملکرد بالا (High Performance) شامل MVQها، لاستیک های سیلیکون مقاوم در برابر حلال ها (Solvent Resistant Rubbers) شامل FVMQها و در نهایت لاستیک های سیلیکون با دمای کاری بسیار پایین (Extreme Low Temperature Service) که شامل PMQها و PVMQها می شوند، این چهار دسته را تشکیل می دهند [۱].

۲-۲ بر اساس دمای پخت

به طور کلی لاستیک های سیلیکون بر اساس دمای پخت به دو دسته ی پخت شونده در دمای بالا (HTV) و پخت شونده در



شکل ۴ دسته بندی لاستیک های سیلیکون بر اساس دمای پخت [۱].



شکل ۷ به ترتیب از بالا به پایین، ساختار شیمیایی دی بنزوئیل پراکسید و دی کومیل پراکسید [۲۴].

۳-۱ پخت پراکسیدی

در پخت پراکسیدی، عامل پخت، ترکیبی پراکسیدی است که در دماهای بالا تخریب می‌شود. حاصل این تخریب، تشکیل رادیکال‌های فعال است که به راحتی می‌توانند به گروه‌های متیل یا وینیل موجود روی زنجیر لاستیک سیلیکون حمله کرده و با جدا کردن هیدروژن از آن‌ها تشکیل بزرگ‌رادیکال دهند. در ادامه بزرگ‌رادیکال‌ها با زنجیرهای لاستیک سیلیکون برخورد کرده و باعث اتصال زنجیرها به یکدیگر می‌شوند. با گذشت زمانی کوتاه از فعال شدن پراکسید و تولید رادیکال توسط آن، واکنش‌ها به قدری تکرار می‌شوند که در نهایت پلیمری با شبکه‌ای از اتصالات عرضی ایجاد شود. برای رادیکال‌های آزاد شده از تخریب پراکسید، حمله به گروه وینیلی راحت‌تر و سریع‌تر از حمله به گروه‌های متیل روی زنجیر است. به همین خاطر تولیدکنندگان، برای بهتر انجام شدن فرایند پخت، درصدی از گروه‌های متیل را با گروه‌های وینیل جایگزین می‌کنند. پراکسیدها عوامل پخت بسیار مناسبی هستند زیرا در دمای اتاق یا دماهای متوسط، درون فرمول لاستیک سیلیکون، پایدار و غیرفعال باقی می‌مانند و تنها در دماهای بیشتر از دمای تخریب است که فعال می‌شوند [۲۵، ۲۶].

بنزوئیل پراکسید (Benzoyl Peroxide)، 40% دی کلروبنزوئیل پراکسید (2,4-Dichlorobenzoyl Peroxide) و ترشیو بوتیل پربنزوآت (t-butyl Per Benzoate)، به میزان $0/5$ تا 3 درصد وزنی برای پخت MQ مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد در دمای اتاق برای چندین ماه درون ترکیب لاستیک سیلیکون پایدار هستند. اما در حدود 70°C به تدریج فرایند پخت را شروع خواهند کرد. لاستیک‌های سیلیکون دارای گروه‌های جانبی وینیلی می‌توانند با پراکسیدهای دارای فعالیت کمتر مانند دی کومیل پراکسید (Dicumyl Peroxide) و ترشیو بوتیل پر استات (t-butyl Peracetate) نیز پخت شوند. جالب است که اگر درصد گروه‌های وینیلی زیاد باشد (۴ تا ۵ درصد)، حتی می‌توان لاستیک سیلیکون را با سامانه‌ی پخت گوگردی نیز شبکه‌ای کرد [۴]. شکل ۷، ساختار شیمیایی دو عامل پخت پراکسیدی پر کاربرد در پخت لاستیک سیلیکون را نشان می‌دهد.

۳-۲ پخت افزایشی

پخت پراکسیدی، در کنار مزایا و محاسن خاص خود، کاستی‌هایی نیز دارد. این کاستی‌ها عبارتند از:

- بوی بد محصول

- زرد شدن سطح محصول بعد از پس پخت (Post Cure)

- ضریب اصطکاک بالای سطح

- باقی ماندن بخشی از پراکسید درون محصول

- تغییر مزه و بوی محصول

- پخش شدن در محیط کار و آسیب زدن به سلامت کارگران بنا به دلایل گفته شده، به طور صنعتی و در مقیاس بزرگ، روش پخت دیگری نیز برای لاستیک‌های سیلیکون HTV مورد استفاده قرار می‌گیرد. نام این روش، پخت افزایشی است. بر خلاف روش پراکسیدی که سامانه‌ای تک جزئی است، پخت افزایشی، سامانه‌ای دو جزئی به شمار می‌رود. در این روش، جزء اول که معمولاً مقدار بیشتری از ترکیب را به خود اختصاص می‌دهد، از نوع MVQ است. جزء دوم همان MQ است، با این تفاوت که برخی از گروه‌های متیل آن با هیدروژن جایگزین شده‌اند. به کمک کاتالیزورهایی از جنس پلاتین یا پالادیم و همچنین دمای بالا، گروه وینیلی با گروه هیدروژن وارد واکنش شده و اتصال عرضی را تشکیل می‌دهد. تعداد زیادی از این واکنش‌ها رخ می‌دهند تا پلیمری با ساختار شبکه‌ای ایجاد شود. از جمله مزایای این روش نسبت به روش پراکسیدی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۳]:

- تولید محصولی عاری از پراکسید و بی بو

- شفافیت بالاتر محصول

- استحکام پارگی بیشتر

- ضروری نبودن مرحله پس پخت

- عدم زردشدگی محصول، حتی بعد از پس پخت

به خاطر مزایایی که روش پخت افزایشی نسبت به پخت پراکسیدی دارد، معمولاً در کاربردهای پزشکی و بهداشتی محصولات پخت شده با روش افزایشی ترجیح داده می‌شوند. چرا که آلودگی کمتری نسبت به محصولات پخت شده با روش پراکسیدی دارند [۲۳].

با وجود تمام مزایای گفته شده برای روش پخت افزایشی، گران بودن کاتالیزور مورد استفاده در این سامانه و دشواری جدا کردن کاتالیزور عمل نکرده یا مشتقات آن از لاستیک سیلیکون و

زمان ماندگاری (Shelf Life) لاستیک سیلیکون پس از افزودن عامل پخت (برای سامانه‌های پخت پراکسیدی) و افزودن کاتالیزور (برای سامانه‌های پخت افزایشی یا به عبارتی پخت دو جزئی) است.

بسته به شرایط نگه‌داری در انبار و اجزای مختلف موجود در آمیزه‌های لاستیک سیلیکون، همچون تقویت‌کننده‌ها و پرکننده‌ها، آمیزه‌های حاوی پراکسید دارای زمان ماندگاری ۳ تا ۶ ماه هستند. این در حالی است که آمیزه‌های لاستیک سیلیکون حاوی سامانه پخت دو جزئی (سامانه‌ی افزایشی)، دارای زمان ماندگاری ۱ تا ۷ روز هستند [۲۳].

باید توجه داشت که لاستیک‌های سیلیکون HTV، برای پخت، افزون بر سامانه‌ی پخت، به دمای بالا نیز نیاز دارند.

۵ روش‌های نوین پخت لاستیک‌های سیلیکون HTV

کاستی‌های موجود در هر دو روش پخت پراکسیدی و افزایشی، همچنین تأثیر چشمگیری که سامانه‌ی پخت بر خواص لاستیک سیلیکون بر جای می‌گذارد، موجب شده‌اند که تحقیقاتی به منظور رفع چنین کاستی‌هایی و نیز بهبود هر چه بیشتر خواص لاستیک‌های سیلیکون با به‌کارگیری روش‌های نوین پخت، صورت پذیرد.

روش‌هایی که در مقالات تازه و به روز [۳۰-۲۵]، استفاده می‌شوند، معمولاً به این صورت هستند که محققان در آزمایشگاه یک یا چند نوع عامل پخت جدید سنتز می‌کنند و لاستیک‌های سیلیکون با گروه‌های آلی گوناگون را با آن‌ها پخت می‌کنند. اتصالات عرضی حاصل از عوامل پخت جدید، دارای طول‌های متفاوت هستند. برای مثال در پخت پراکسیدی و پخت افزایشی، اتصالات عرضی میان زنجیرها فقط از یک پیوند C-C تشکیل شده‌اند. در صورت افزایش طول این اتصال، خواص مکانیکی لاستیک پخت‌شده، بهبود می‌یابد. بنابراین یکی از برتری‌های روش‌های پخت جدید، می‌تواند بهبود خواص مکانیکی لاستیک سیلیکون به دلیل بیشتر شدن طول اتصالات عرضی میان زنجیرها باشد.

Diao و همکاران [۲۵] سامانه‌ی پخت جدیدی را برای نخستین بار با استفاده از کلروپروپیل پلی‌سیلوکسان (لاستیک سیلیکونی که درصدی از گروه‌های آلی آن را گروه‌های کلروپروپیل تشکیل داده‌اند و به اختصار CPPS نامیده می‌شود) مطالعه کردند. در این کار، روغن پلی‌دی‌متیل-کو-۳-آمینوپروپیل‌متیل‌سیلیکون (APPS) و پلی‌دی‌متیل-کو-۳ (۲-آمینو اتیل آمینو) پروپیل‌سیلیکون (AEAPPS) به عنوان عامل شبکه‌ای‌کننده به کار گرفته شدند.

بازگرداندن آن به چرخه‌ی تولید، یکی از بزرگ‌ترین کاستی‌های سامانه‌ی پخت افزایشی به شمار می‌آید [۲۶].

۴ مقایسه‌ی خواص مکانیکی و زمان ماندگاری سامانه‌های پخت پراکسیدی و افزایشی

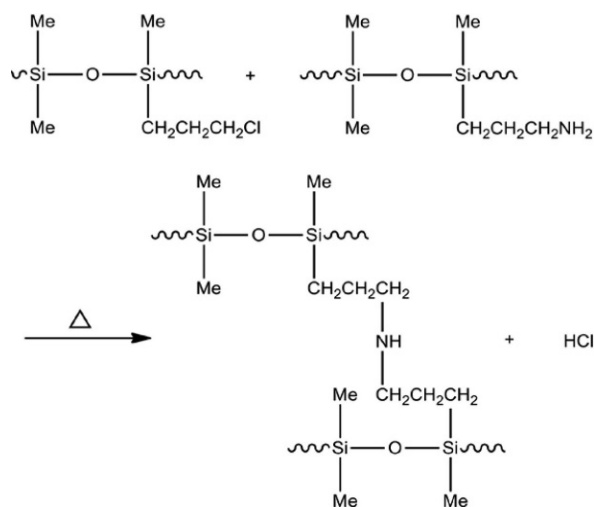
جدول ۱، خواص مکانیکی لاستیک‌های سیلیکون پخت‌شده با این دو روش را مقایسه کرده است.

R-plus 4001/60 و R-401/60، دو گونه‌ی استاندارد از لاستیک‌های سیلیکون مصارف عام شرکت واکر (Wacker) آلمان هستند که هر دو سختی یکسانی دارند. R-plus 4001/60 و R-401/60، به ترتیب با سامانه‌ی افزایشی و پراکسیدی پخت می‌شوند. همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد، لاستیک سیلیکون پخت‌شده با روش افزایشی، کشش شکست (Elongation at Break) بالاتر و استحکام کششی (Tensile Strength) پایین‌تری نسبت به هم‌تای خود که با سامانه‌ی پراکسیدی پخت شده است دارد.

بیشتر بودن استحکام کششی لاستیک پخت‌شده با سامانه‌ی پراکسیدی، با وجود کمتر بودن کشش شکست آن، می‌تواند بیان کند که احتمالاً مدول لاستیک مذکور، بالاتر از لاستیک پخت‌شده با سامانه‌ی افزایشی است. این تفاوت در مدول، امری طبیعی است. به طوری که لاستیک‌های سیلیکون پخت‌شده با سامانه‌ی افزایشی، معمولاً مدول پایین‌تری نسبت به لاستیک‌های پخت‌شده با سامانه‌ی پراکسیدی دارند. افزون بر این، مقاومت پارگی و مانایی فشاری لاستیک پخت‌شده با سامانه‌ی افزایشی بیشتر از لاستیک پخت‌شده با سامانه‌ی پراکسیدی است [۲۳]. نکته‌ی مهم دیگر در مقایسه‌ی دو سامانه‌ی مرسوم پخت،

جدول ۱ مقایسه‌ی خواص مکانیکی لاستیک‌های سیلیکون پخت‌شده با سامانه‌ی پخت افزایشی و پراکسیدی [۲۳].

| خواص | R-plus 4001/60 | R-401/60 |
|----------------------------|-------------------|----------|
| Hardness (Shore A) | ۶۰ | ۶۰ |
| Tensile strength (MPa) | ۱۰ | ۱۱ |
| Elongation at (%) break | ۸۰۰ | ۶۰۰ |
| Tear resistance (N/mm) | ۳۲ | ۲۴ |
| Compression set (%) | ۱۹ | ۱۵ |

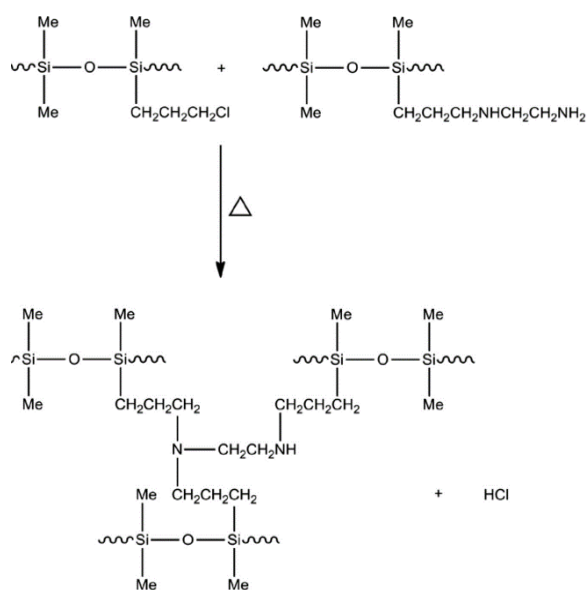


شکل ۹ سازوکار پخت کلروپروپیل سیلوکسان به کمک APPS [۲۵].

به عنوان بستر تحقیقاتی برای بررسی عملکرد عامل پخت تلچلیک (Telechelic) پلی دی متیل سیلوکسان اختتام یافته با گروه های آمینی (MATTPS) که ترکیبی سنتزی شامل زنجیر پلی سیلوکسان کوتاه با تعدادی گروه آمینی است، استفاده کردند. شایان گفتن است که، MATTPS در همین تحقیق سنتز شد. همچنین در یکی از مراحل سنتز MATTPS، ترکیب آمینی دیگری با نام پلی دی متیل سیلوکسان با گروه های انتهایی آمینوپروپیل (ATPS) به دست آمد. در ادامه، ATPS نیز به عنوان عامل پخت، مورد استفاده قرار گرفت. اثبات شده است که گروه های آمینی موجود روی این عوامل پخت، می توانند در دماهای بالا با گروه های کلروپروپیل موجود روی زنجیرهای لاستیک سیلیکون واکنش دهند. با توجه به وجود چندین گروه آمینی، روی مولکول های MATTPS و ATPS، هر مولکول از این عوامل می تواند چندین زنجیر لاستیک سیلیکون را به هم متصل کند.

Dong و همکاران [۲۶] آمیزه هایی مطابق با جدول ۲، با مقادیر مختلف عامل پخت تهیه کردند و خواص این آمیزه ها را مورد مقایسه قرار دادند. TS530 در جدول ۲، نوعی خاص از ذرات معدنی سیلیکا است. در جدول های ۳ و ۴، حرف r نشان دهنده ی نسبت گروه های آمینی موجود در عامل پخت، به گروه های کلروپروپیل موجود در زنجیر لاستیک سیلیکون است. تغییر این نسبت به معنی زیاد یا کم کردن مقدار عامل پخت است.

از جدول های ۳ و ۴، این موضوع برداشت می شود که با افزایش درصد MATTPS، چگالی اتصالات عرضی (CLD) آمیزه ها هم افزایش می یابد. همچنین این عامل پخت می تواند بیش از دو زنجیر را به هم متصل کند. TS و EB در جدول های



شکل ۸- سازوکار پخت کلروپروپیل سیلوکسان به کمک AEAPPS [۲۵].

در ادامه تأثیر عوامل متفاوت مانند نوع عامل پخت، مقدار عامل پخت و درصد کلروپروپیل موجود در لاستیک سیلیکون، بر خواص محصول نهایی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که هر دو عامل پخت می توانند نقش خود را به صورت موفقیت آمیز ایفا کنند. باید توجه داشت که عوامل پخت و نیز کلروپروپیل پلی سیلوکسان مورد استفاده در این کار، در آزمایشگاه سنتز شدند.

شکل های ۸ و ۹، واکنش پخت کلروپروپیل پلی سیلوکسان را به ترتیب با APPS و AEAPPS نشان می دهند. شلوغ تر بودن گروه های آمینی موجود در AEAPPS و ممانعت فضایی بیشتر آن ها نسبت به گروه های آمینی موجود در APPS، فعالیت شیمیایی گروه های آمینی را کم می کند. در نتیجه خواص مکانیکی لاستیک سیلیکون پخت شده به کمک APPS بهتر از لاستیک سیلیکون پخت شده با AEAPPS است. زیرا گروه های آمینی APPS به دلیل فعالیت بیشتر خود، راحت تر با گروه های کلروپروپیل موجود بر لاستیک سیلیکون، درگیر می شوند. با این حال طبق ادعای Diao و همکاران [۲۵]، به طور کلی، خواص مکانیکی لاستیک های سیلیکون پخت شده به کمک هر دو عامل پخت AEAPPS و APPS، از لاستیک های سیلیکون تهیه شده از پخت پراکسیدی و افزایشی، بهتر بوده، می توانند در آینده کاربردهایی در ابعاد صنعتی داشته باشند. ضمن این که، این روش پخت به هیچ کاتالیزوری احتیاج ندارد.

Dong و همکاران [۲۶] نیز، از کلروپروپیل پلی سیلوکسان

جدول ۲ ترکیب درصد نمونه های ساخته شده توسط دانگ و همکاران [۲۶].

| مواد | ترکیب درصد اجزای نمونه ها (Phr) | |
|--------|---------------------------------|-------------------|
| | پخت شده با ATPS | پخت شده با MATTPS |
| CPPS | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| TS530 | ۵۰ | ۵۰ |
| ATPS | ۰ | ۱/۴۳-۱۱/۴۷ |
| MATTPS | ۰/۵۳-۴/۲۲ | ۰ |

جدول ۴ خواص نمونه های پخت شده با مقادیر مختلف ATPS [۲۶].

| نمونه | r | Hardness (Shore A) | TS (MPa) | EB (%) | CLD (g/Mol) |
|--------|-----|--------------------|----------|--------|-------------|
| ATPS-1 | ۰/۵ | ۵۴ | ۶/۷۴ | ۱۰۸۴ | ۷۹۸۷ |
| ATPS-2 | ۱ | ۵۷ | ۸/۶۲ | ۱۰۰۰ | ۷۰۷۳ |
| ATPS-3 | ۲ | ۶۰ | ۷/۴۲ | ۳۷۱ | ۶۰۶۹ |
| ATPS-4 | ۳ | ۵۹ | ۵/۶۶ | ۳۶۷ | ۶۶۲۹ |
| ATPS-5 | ۴ | ۵۷ | ۴/۱۹ | ۳۳۸ | ۶۹۷۷ |

نتیجه گیری

لاستیک های سیلیکون از نظر نوع سامانه ی پخت به دو دسته ی پخت شونده در دمای بالا و پخت شونده در دمای اتاق تقسیم می شوند. لاستیک های سیلیکون پخت شونده در دمای بالا، دارای دو روش مرسوم پخت، شامل پخت تک جزئی با سامانه ی پراکسیدی و پخت دوجزئی با سامانه ی افزایشی هستند. هر یک از این روش ها محاسن و معایب خاص خود را دارند. انتخاب نوع سامانه ی پخت می تواند بر خواص و عملکرد نهایی لاستیک های سیلیکون اثرگذار باشد. از این رو، تحقیق و بررسی روش های نوین پخت، توجه بخش علمی و صنعتی را به خود جلب کرده است. استفاده از عوامل پخت آمینی برای پخت کلروپروپیل پلی سیلوکسان، نمونه ای از این تحقیقات است. اما تعداد این تحقیقات چشمگیر نیست. لاستیک های سیلیکون پخت شده با چنین سامانه هایی نشان داده اند که افزون بر دارا بودن خواص مکانیکی برتر نسبت به لاستیک های پخت شده با سامانه های پخت مرسوم، برخی از معایب آن ها را نیز، ندارند. با این حال مشکلاتی بر سر راه صنعتی شدن این روش ها وجود دارد. برای مثال عوامل پخت مورد استفاده در این مقالات، توسط محققین، آن هم در ابعاد آزمایشگاهی تولید شده اند و مانند عوامل پخت پراکسیدی که در انواع مختلف و با درصدهای خلوص متفاوت در بازارها موجودند، در دسترس نیستند. افزون بر این، چنین عواملی تنها می توانند لاستیک های سیلیکون دارای گروه های عاملی خاص را پخت کنند. به هر حال، بهبود خواص مکانیکی از طریق به کارگیری سامانه ی پخت مناسب، به قدری جالب و جذاب است که می توان انتظار داشت، در آینده تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام پذیرد. به طوری که حتی شاهد به کارگیری این سامانه ها در ابعاد صنعتی باشیم.

۳ و ۴، به ترتیب بیان کننده ی استحکام کششی و کشش شکست نمونه ها است.

در مقابل، نمونه های پخته شده با ATPS، روند یکنواختی ندارد. ابتدا با افزایش مقدار ATPS، چگالی اتصالات عرضی، افزایش یافته، سپس با افزایش بیشتر ATPS، چگالی اتصالات عرضی دچار کاهش می شود.

با این حال برای هر دو نوع عامل پخت می توان گفت، هنگامی که درصد گروه آمینی نسبت به گروه های کلروپروپیل موجود در لاستیک سیلیکون خیلی کم باشد (در نسبت ۰/۵ درصد)، شبکه ی مستحکمی تشکیل نمی شود و خواص مکانیکی زیاد خوبی به دست نمی آید. هنگامی که مقدار گروه آمینی بیش از اندازه باشد، خواص مکانیکی از حالت بهینه دور شده و دچار افت می شوند. در نهایت Dong و همکاران [۲۶] این نتیجه را بیان می کنند که بهترین نسبت برای رسیدن به خواص مکانیکی بهینه، نسبت یک به یک میان گروه های عاملی موجود در عوامل پخت و لاستیک سیلیکون است.

جدول ۳ خواص نمونه های پخت شده به کمک مقادیر

مختلف MATTPS [۲۶].

| نمونه | r | Hardness (Shore A) | TS (MPa) | EB (%) | CLD (g/Mol) |
|----------|-----|--------------------|----------|--------|-------------|
| MATTPS-1 | ۰/۵ | ۴۹ | ۸/۴۴ | ۱۱۲۱ | ۱۴۰۴۳ |
| MATTPS-2 | ۱ | ۵۱ | ۹/۵۲ | ۱۱۳۵ | ۱۱۵۵۵ |
| MATTPS-3 | ۱/۵ | ۵۲ | ۹/۲۷ | ۱۰۹۷ | ۱۰۲۷۵ |
| MATTPS-4 | ۲ | ۵۳ | ۹/۰۱ | ۱۱۳۲ | ۹۵۳۵ |
| MATTPS-5 | ۳ | ۵۵ | ۷/۰۶ | ۱۰۵۸ | ۸۱۲۴ |
| MATTPS-6 | ۴ | ۵۶ | ۶/۱۵ | ۱۰۰۳ | ۶۷۴۱ |

مراجع

- Hanna Dodiuk., Sydney H Goodman., Handbook of Thermoset Plastics, William Andrew Publishing, Third Edition, USA, 555-557, **2014**.
- Manas Chanda Salil Roy K., Industrial Polymers Specialty Polymers and Their Applications, CRC Press, Fourth Edition, UK, 139, **2008**.
- J.R., White De S.K., Rubber Technologist's Handbook, Rapra Technology Limited, UK, 76, **2001**.
- Brydson J. A., Plastics Materials, Seventh Edition, UK, 832 – 839, **1999**.
- Liu D., Song L., Song H., Chen J., Tian Q., Chen L., & Sun G., Correlation Between Mechanical Properties and Microscopic Structures of an Optimized Silica Fraction in Silicone Rubber. *Composites Science and Technology*, 165, 373-379, **2018**.
- Pradhan B., Roy S., Srivastava S. K., & Saxena A., Synergistic Effect of Carbon Nanotubes and Clay Platelets in Reinforcing Properties of Silicone Rubber Nano Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 132, 1-11, **2015**.
- Zhang C., Wang J., & Song S, Preparation of a Novel Type of Flame Retardant Diatomite and Its Application in Silicone Rubber Composites. *Advanced Powder Technology*, 30, 1567-1575, **2019**.
- Zhang J., Zhang H., Wang H., Chen F., & Zhao Y., Extruded Conductive Silicone Rubber with High Compression Recovery and Good Aging-Resistance for Electromagnetic Shielding Applications. *Polymer Composites*, 40, 1078-1086, **2019**.
- Li H., Chen W., Xu J., Li J., Gan L., Chu X., & Du H., Enhanced Thermal Conductivity by Combined Fillers in Polymer Composites. *Thermochimica Acta*, 676, 198-204, **2019**.
- Qi J., Wen Q., Zhu J., & He T., Synthesis of a Novel Intumescent Flame Retardant Based on Phosphorus, Nitrogen, and Silicone, and Application in VMQ. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137, 1549-1557, **2019**.
- Mi H.Y., Jing X., Huang H.X., & Turng L.S., Novel Polydimethylsiloxane (PDMS) Composites Reinforced with Three-Dimensional Continuous Silica Fibers. *Materials Letters*, 210, 173-176, **2018**.
- Maghsoudi K., Momen G., Jafari R., & Farzaneh M., Direct Replication of Micro-Nanostructures in the Fabrication of Superhydrophobic Silicone Rubber Surfaces by Compression Molding. *Applied Surface Science*, 458, 619-628, **2018**.
- mWu T., Lai X., Li H., Chen Y., Wang Y., Liu T., & Zeng X., Synergistic Enhancement of Vinyltriethoxysilane and Layered Mg–Al Double Hydroxide on the Tracking and Erosion Resistance of Silicone Rubber. *Polymer Testing*, 84, 106373, 1-12, **2020**.
- Shit S.C., & Shah P., A Review on Silicone Rubber. *National Academy Science Letters*, 36, 355-365, **2013**.
- Anyszka R., Bieliński D. M., Pędzich Z., Parys G., Rybiński P., Zarzecka-Napierała, & Szumera, M, Effect of Mineral Filler Additives on Flammability, Processing and Use of Silicone-Based Ceramifiable Composites. *Polymer Bulletin*, 75, 1731-1751, **2018**.
- Hu S., Chen F., Li J. G., Shen Q., Huang Z. X., & Zhang L. M, The Ceramifying Process and Mechanical Properties of Silicone Rubber/Ammonium polyphosphate/Aluminium Hydroxide/mica Composites. *Polymer Degradation and Stability*, 126, 196-203, **2016**.
- Anyszka R., Bieliński D. M., Pędzich Z., & Szumera M., Influence of Surface-Modified Montmorillonites on Properties of Silicone Rubber-Based Ceramizable Composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119, 111-121, **2015**.
- Zhou W. Y., Qi S. H., Zhao H. Z., & Liu N. L., Thermally Conductive Silicone Rubber Reinforced with Boron Nitride Particle. *Polymer Composites*, 28, 23-28, **2007**.
- Chiu H.T., Sukachonmakul T., Kuo M.T., Wang Y.H., & Wattanakul, K, Surface Modification of Aluminum Nitride by Polysilazane and Its Polymer-Derived Amorphous Silicon Oxycarbide Ceramic for the Enhancement of Thermal Conductivity in Silicone Rubber Composite, *Applied Surface Science*, 292, 928-936, **2014**.
- Yang D., Zhang W., Jiang B., & Guo Y., Silicone Rubber Ablative Composites Improved with Zirconium Carbide or Zirconia. Composites Part A: *Applied Science and Manufacturing*, 44, 70-77, **2013**.
- Zhou C., Yu L., Luo W., Chen Y., Zou H., & Liang M., Ablation Properties of Aluminum Silicate Ceramic Fibers and Calcium Carbonate Filled Silicone Rubber Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 132, 1-8, **2015**.
- Diao S., Zhang S., Yang Z., Feng S., Zhang C., Wang Z., & Wang G, Effect of Tetraphenylphenyl-Modified Fumed Silica on Silicone Rubber Radiation Resistance. *Journal of Applied Polymer Science*, 120, 2440-2447, **2011**.
- Jerschow P., Silicone Elastomers, iSmithers APRA Publishing, UK, Report 137, 12, 5-20, **2001**.

24. Datta R.N., Rubber Curing Systems, iSmithers APRA Publishing, UK, Report 144, 12, 23, **2002**.
25. Diao S., Dong F., Meng J., Ma P., Zhao Y., & Feng S., Preparation and Properties of Heat-Curable Silicone Rubber through Chloropropyl/Amine Crosslinking Reactions. *Materials Chemistry and Physics*, 153, 161-167, **2015**.
26. Dong F., Wang X., Li S., Hao J., Tang X., Kuang, Applications of α , ω -Telechelic Polydimethylsiloxane as Cross-Linkers for Preparing High-Temperature Vulcanized Silicone Rubber. *Polymers for Advanced Technologies*, 30, 932-940, **2019**.
27. Dong FY., Diao S., Ma DP., Zhang SY., Feng SY., Preparation and Haracterization of 3-Chloropropyl Polysiloxane-Based Heat-Curable Silicone Rubber Using Polyamidoamine Dendrimers as Cross-Linkers. *React Funct Polym*, 96, 14-20, **2015**.
28. Dong F., Ma D., & Feng S., Aminopropyl-Modified Silica as Cross-Linkers of Polysiloxane Containing γ -Chloropropyl Groups for Preparing Heat-Curable Silicone Rubber. *Polymer Testing*, 52, 124-132, **2016**.
29. Dong F., Zhao P., Dou R., & Feng S., Amine-Functionalized POSS as Cross-Linkers of Polysiloxane Containing γ -Chloropropyl Groups for Preparing Heat-Curable Silicone Rubber. *Materials Chemistry and Physics*, 208, 19-27, **2018**.
30. Dong F., Lu H., Feng S., & Tang X., Preparation and Characterization of Silicone Rubber through the Reaction Between γ -Chloropropyl and Amino Groups with Siloxane Polyamidoamine Dendrimers as Cross-linkers. *Polymers for Advanced Technologies*, 29, 934-940, **2018**.

