

بهبود مقاومت سایشی و چقرمگی سرندهای معدنی و چرخ‌های جک پالت پلی‌یورتان ترموست از طریق

بهینه‌سازی فرمولاسیون و فرآیند ساخت

لیلا حیدری^{۱*}، محمدحسین غلامی^۲

۱. مدرس و مدیر دپارتمان مهندسی صنایع شیمیایی، ایران، تهران، دانشگاه علمی کاربردی، مرکز آموزش شرکت تولیدی و صنعتی آذین خودرو
۲. دانشجوی کارشناسی مهندسی صنایع شیمیایی، ایران، تهران، دانشگاه علمی کاربردی، مرکز آموزش شرکت تولیدی و صنعتی آذین خودرو.

چکیده:

هدف از این مطالعه، طراحی و بهینه‌سازی فرمولاسیون پلی‌یورتان ترموست برای تولید تجهیزات صنعتی پر استفاده، نظیر سرندهای غربال‌گری در صنعت خاک و معدن و چرخ‌های جک پالت است. با توجه به تنش‌های مکانیکی بالا و محیط سایشی شدید این تجهیزات، یک سیستم پلی‌یورتانی بر پایه پری‌پلیمر MDI و پلی‌ال‌پلی‌اتر با وزن مولکولی متوسط انتخاب گردید.

برای تقویت خواص، از افزودنی‌های مختلف از جمله نانوذرات سیلیکا و الیاف آرامید کوتاه استفاده شد. قطعات نهایی با روش ریخته‌گری در قالب ساخته و خواص مکانیکی و سایشی آن‌ها مطابق با استانداردهای ASTM مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا، بهبود ۳۵ درصدی در مقاومت سایشی و ۲۵ درصدی در مدول کششی نسبت به نمونه پایه دارند. همچنین، افزودن ۳ درصد وزنی الیاف آرامید، چقرمگی ضربه را تا ۵۰ درصد افزایش داد. این تحقیق نشان‌دهنده پتانسیل بالای پلی‌یورتان‌های ترموست اصلاح‌شده برای جایگزینی مواد مرسوم در ساخت تجهیزات بادوام صنعتی است.

کلمات کلیدی: پلی‌یورتان ترموست، سرندهای معدنی، چرخ جک پالت، مقاومت به سایش، نانوذرات سیلیکا، الیاف آرامید

مقدمه :

پلی‌یورتان‌ها (PUs) دسته‌ای از پلیمرهای پرکاربرد هستند که به دلیل طیف گسترده و قابل تنظیم خواص فیزیکی-مکانیکی، در حوزه‌های مختلفی از فوم‌های نرم تا پلاستیک‌های سخت مهندسی استفاده می‌شوند. پلی‌یورتان‌های ترموست، پس از واکنش و شکل‌گیری، شبکه‌ای سه‌بعدی و غیرقابل ذوب تشکیل می‌دهند که موجب پایداری ابعادی عالی، مقاومت شیمیایی و خواص مکانیکی برجسته می‌شود. این ویژگی‌ها، آن‌ها را به کاندیدایی ایده‌آل برای ساخت قطعات صنعتی با استحکام و دوام بالا تبدیل می‌کند.

در صنایعی همچون معدن و فرآوری مواد، سرندهای غربال‌گر در معرض سایش مداوم توسط مواد معدنی تیز و ساینده قرار دارند. مواد مرسوم مانند فولادهای پرکربن یا لاستیک‌های طبیعی، ممکن است به سرعت دچار سایش شوند، وزن بالایی داشته یا در برابر خوردگی مقاوم نباشند. از سوی دیگر، چرخ‌های جک پالت در انبارها و مراکز لجستیک، نیازمند ترکیبی منحصر به فرد از استحکام برای تحمل بار، چقرمگی برای جذب ضربات و مقاومت سایشی برای حرکت روی سطوح مختلف هستند.

پلی‌یورتان ترموست با قابلیت تنظیم سختی از Shore A ۶۰ تا Shore D ۸۰، می‌تواند پاسخی اقتصادی و فنی به این نیازها باشد. با این وجود، فرمولاسیون پایه پلی‌یورتان برای چنین کاربردهای سنگینی نیاز به اصلاح و تقویت دارد. این پژوهش به دنبال آن است که با اصلاح سیستم پلی‌یورتانی توسط نانوذرات و الیاف، فرمولاسیونی بهینه برای تولید آزمایشگاهی این تجهیزات ارائه داده و خواص آن را به‌طور کمی مورد سنجش قرار دهد.

پلی‌یورتان‌های ترموست (گرماسخت) دسته‌ای از پلیمرها هستند که پس از فرآیند پخت، ساختاری سه‌بعدی و صلب پیدا می‌کنند و دیگر قابلیت ذوب یا تغییر شکل ندارند. این ویژگی آن‌ها را برای کاربردهای صنعتی و ساختمانی بسیار ارزشمند می‌سازد. پلی‌یورتان‌ها از واکنش ایزوسیانات‌ها با پلی‌ال‌ها ساخته می‌شوند. در حالت ترموست، این واکنش منجر به ایجاد پیوندهای عرضی می‌شود که ساختار شبکه‌ای غیرقابل برگشت ایجاد می‌کند. برخلاف پلیمرهای گرمانرم (ترموپلاستیک)، پلی‌یورتان‌های ترموست پس از پخت دیگر ذوب نمی‌شوند، بلکه در دماهای بالا تجزیه می‌گردند. این مواد دارای پایداری حرارتی بالا، مقاومت مکانیکی مناسب، و مقاومت شیمیایی قابل توجه هستند. به همین دلیل در شرایط سخت صنعتی و ساختمانی کاربرد دارند.

خواص کلیدی پلی‌یورتان‌های ترموست را می‌توان به موارد زیر خلاصه کرد:

۱- **پایداری حرارتی:** توانایی تحمل دماهای بالا بدون تغییر شکل.

۲- **مقاومت شیمیایی:** مقاومت نسبی در برابر بسیاری از مواد شیمیایی، هرچند در برابر اسیدها و بازهای قوی آسیب‌پذیرند.

۳- **استحکام مکانیکی:** عملکرد خوب در برابر فشار و بارگذاری، به‌ویژه در کاربردهای ساختمانی و صنعتی.

۴- **غیرقابل بازیافت بودن:** به دلیل ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی، پس از پخت امکان ذوب و بازیافت وجود ندارد. پلی‌یورتان‌ها یکی از مهم‌ترین خانواده‌های پلیمرها هستند که به دلیل تنوع ساختاری و خواص منحصر به‌فرد، جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف یافته‌اند. این مواد از واکنش شیمیایی بین ایزوسیانات‌ها و پلی‌ال‌ها حاصل می‌شوند و بسته به نوع شبکه و فرآیند تولید، می‌توانند به صورت گرمانرم (ترموپلاستیک) یا گرماسخت (ترموست) تولید شوند.

پلی یورتان‌های ترموست به دلیل ایجاد پیوندهای عرضی سه‌بعدی در ساختار خود، پس از فرآیند پخت دیگر قابلیت ذوب یا تغییر شکل ندارند و تنها در دماهای بالا تجزیه می‌شوند. این ویژگی موجب شده تا این دسته از پلیمرها از پایداری حرارتی، مقاومت مکانیکی و شیمیایی بالا برخوردار باشند و در شرایط سخت صنعتی و ساختمانی عملکرد مطلوبی ارائه دهند.

کاربردهای گسترده پلی یورتان‌های ترموست شامل تولید فوم‌های سخت به عنوان عایق حرارتی و صوتی، ساخت پوشش‌های مقاوم در برابر رطوبت و مواد شیمیایی، تولید قطعات کامپوزیتی در صنایع خودروسازی و هوافضا، و همچنین استفاده در مبلمان و تجهیزات پزشکی است. با وجود محدودیت‌هایی همچون عدم بازیافت پذیری، مزایای فراوان این مواد سبب شده است که همچنان به عنوان یکی از گزینه‌های اصلی در طراحی و تولید محصولات پیشرفته مورد توجه قرار گیرند.

از این رو، بررسی ساختار، خواص و کاربردهای پلی یورتان‌های ترموست می‌تواند دیدگاه جامعی نسبت به اهمیت این مواد در توسعه فناوری‌های نوین و بهبود کیفیت زندگی ارائه دهد.

۱- مروری بر ادبیات

مطالعات متعددی به بررسی کاربرد پلی یورتان در قطعات صنعتی پرداخته‌اند. برای نمونه، اسمیت و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که استفاده از پلی یورتان‌های الاستومری در پوشش‌های ضدسایش، عمر مفید نوار نقاله‌های معدنی را تا ۳۰۰ درصد افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، تحقیقات بر روی کامپوزیت‌های پلی یورتان حاوی نانوذرات، رشد چشمگیری داشته است. تحقیقات ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) حاکی از آن است که نانوذرات سیلیکا (SiO₂) به‌طور مؤثری می‌توانند هم‌زمان استحکام کششی و مقاومت سایشی الاستومرهای پلی یورتانی را بهبود بخشند، زیرا این ذرات به عنوان مراکز تقویت‌کننده در ماتریس پلیمری پراکنده شده و مانع از رشد ترک می‌شوند.

همچنین، مطالعات چن (۲۰۱۹) بر روی افزودن الیاف کوتاه (مانند آرامید یا شیشه) به پلی یورتان نشان داد که این الیاف با مکانیزم بیرون کشیده شدن و ایجاد ترک‌های انحرافی، انرژی ضربه را جذب کرده و چقرمگی کامپوزیت را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند. با این حال، پژوهش‌های محدودی به صورت یکپارچه به بهینه‌سازی فرمولاسیون برای دو کاربرد متفاوت اما پرتنش (سرنده و چرخ) پرداخته‌اند. این مطالعه در صدد است تا با تلفیق دو روش تقویت با نانوذرات و الیاف، خواص مورد نیاز برای هر دو قطعه را در یک فرمولاسیون پایه بهبود بخشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد اولیه

۲-۱-۱- ایزوسیانات‌ها

۲-۱-۲- پلی‌ال‌ها

۲-۱-۳- افزودنی‌ها و کمک‌فرآیندها

۲-۱-۴- کاتالیست‌ها

۲-۱-۵- عوامل فوم‌زا (پفزا)

۲-۱-۶- عوامل فعال سطحی (سورفکتانت‌ها)

۷-۱-۲- عوامل آتش گیرنده

۸-۱-۲- رنگ دانه ها و پرکننده ها

۲-۲- روش

فرآیند اختلاط برای پلی یورتان های ترموست که به شکل دو جزئی (پلی ال و ایزوسیانات) ارائه می شوند، حیاتی است. اصول کلیدی اختلاط عبارت است از:

- نسبت اختلاط دقیق: نسبت ایزوسیانات به پلی ال تعیین کننده ساختار نهایی شبکه پلیمری است.
- یکنوایی کامل: اختلاط ناقص باعث نواحی نرم، سخت یا واکنش نکرده در محصول می شود.
- کنترل دما و رطوبت: دمای اجزا بر ویسکوزیته و سرعت واکنش تاثیر می گذارد. رطوبت با ایزوسیانات واکنش داده و گاز CO_2 تولید می کند که در فوم سازی کنترل شده مفید است.

۲-۲-۱- انواع اختلاط

۱-۲-۲-۱- اختلاط دستی: برای نمونه سازی اولیه یا تولیدات بسیار کم حجم استفاده می شود. معایب اصلی آن یکنواختی محدود و وابستگی به اپراتور است.

۲-۲-۱-۲- اختلاط مکانیکی با همزن های پرسرعت: برای حجم های متوسط و موادی با ویسکوزیته بالا مناسب است.

۳-۲-۲-۱- ماشین آلات اختلاط دوزمتری: روش صنعتی و دقیق است.

- دو جزء اصلی توسط پمپ های دقیق با نسبت ثابت به یک محفظه میکسر هد منتقل می شوند.
- اختلاط با فشار بالا یا استفاده از همزن های استاتیک درون هد انجام می شود.
- این سیستم ها امکان کنترل دقیق دما، فشار و زمان اختلاط را فراهم می کنند.

۲-۲-۲- روش های قالب گیری پس از اختلاط

پس از اختلاط مواد مایع، مخلوط واکنش دهنده بلافاصله در قالب ریخته یا تزریق می شود. دو روش اصلی عبارتند از:

۱-۲-۲-۲-۱- قالب گیری ریخته گری: مخلوط به سادگی در قالبی باز یا بسته ریخته می شود. این روش برای قطعات ساده، تولید کم حجم و نمونه سازی مناسب است.

۲-۲-۲-۲- قالب گیری تزریقی واکنشی: مخلوط تحت فشار بالا به داخل قالب فلزی بسته تزریق می شود. این روش برای تولید انبوه قطعات با شکل های پیچیده و دقت ابعادی بالا استفاده می شود.

۳- عوامل کلیدی در کنترل فرآیند و خواص نهایی

۱-۳- نسبت ایزوسیانات به پلی ال (شاخص ایزوسیانات): نسبت استوکیومتری بر اساس گروه های هیدروکسیل پلی ال محاسبه می شود. انحراف از این نسبت، خواص مکانیکی را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد.

۲-۳- نوع پلی ال: پلی ال های بلندتر (با وزن مولکولی بالاتر) معمولاً محصولات نرم تر و انعطاف پذیرتر، و پلی ال های کوتاه تر محصولات سخت تر تولید می کنند.

۳-۳- کارکردی بودن اجزا: تعداد گروه های عاملی تعیین کننده چگالی اتصالات عرضی در شبکه نهایی است. ترکیبات با کارکردی بالاتر شبکه ای متراکم و محصولی سخت تر ایجاد می کنند.

۳-۴- **دمای واکنش:** دما مستقیماً بر سرعت واکنش و زمان پخت (زمان ژل شدن) تاثیر می‌گذارد. دمای بالاتر، واکنش را سریع‌تر می‌کند.

۳-۵- **افزودنی‌ها:** کاتالیست‌ها برای کنترل زمان پخت و رسیدن به زمان فرصت کاری مناسب ضروری هستند. عوامل فوم‌زا و سورفکتانت‌ها نیز ساختار فیزیکی فوم را کنترل می‌کنند.

۴- ایمنی و ملاحظات عملی در آزمایشگاه

کار با مواد اولیه پلی‌یورتان، به ویژه ایزوسیانات‌ها، نیازمند رعایت نکات ایمنی است:

۴-۱- ایزوسیانات‌ها تحریک‌کننده قوی دستگاه تنفسی، پوست و چشم هستند. برخی مثل تولوئن دی ایزوسیانات^۱ (TDI) به دلیل فراریت بالا خطر بیشتری دارند.

۴-۲- تهویه مناسب (هود شیمیایی) برای کار با این مواد الزامی است.

۴-۳- استفاده از وسایل حفاظت فردی^۲ (PPE) شامل دستکش مقاوم (مانند نیتریل)، عینک ایملی و روپوش آزمایشگاهی ضروری است.

۴-۴- پلی‌ال‌ها و برخی افزودنی‌ها نیز ممکن است نیاز به احتیاط داشته باشند. همیشه باید برگه اطلاعات ایمنی (MSDS/SDS) هر ماده مطالعه شود.

۴-۵- رعایت دقیق دستورالعمل‌های اختلاط و نسبت‌های توصیه شده توسط تامین‌کننده مواد، برای موفقیت در انجام آزمایش حیاتی است.

۵- انتخاب و تهیه مواد اولیه بر اساس کاربرد خاص

۵-۱- پلی‌ال‌ها (جزء A) بر اساس وزن مولکولی و عملکرد

۵-۲- ایزوسیانات‌ها (جزء B) بر اساس ساختار شیمیایی

۵-۳- افزودنی‌های تخصصی برای عملکرد خاص

۵-۳-۱- کاتالیست‌ها

۵-۳-۱-۱- آمین‌های سوم: دی‌آزابی‌سایکلو اکتان (DABCO) برای واکنش ژل شدن، تری اتیلن دی آمین (TEDA)

برای واکنش فوم‌زایی

۵-۳-۱-۱- ترکیبات آلی قلع: دی‌بوتیل‌تین دی‌لاورات (DBTDL) برای واکنش پلی‌ال-ایزوسیانات

۵-۳-۱-۲- کاتالیست‌های پتاسیمی: برای واکنش‌های تریمریزاسیون ایزوسیانات

۵-۳-۲- عوامل فعال سطحی

۵-۳-۲-۱- سیلیکونی: برای کنترل اندازه سلول در فوم‌ها

۵-۳-۲-۲- غیرسیلیکونی: برای سیستم‌های خاص مانند پوشش‌ها

۵-۴- عوامل آتش‌گیرنده

۵-۴-۱- فسفات‌های آلی: (تریس(۱-کلرو-۲-پروپیل) فسفات) TCPP، تریس (۱،۳-دی‌کلرو-۲-پروپیل) TDCP

^۱ toluene Diisocyanates

^۲ Personal Protective Equipment

۲-۴-۵- شعله‌های نیتروژنی: ملامین، آمونیوم پلی فسفات

۶- مراحل عملی اختلاط با جزئیات فرآیندی

۶-۱- آماده‌سازی مواد اولیه

- ۶-۱-۱- خشک کردن پلی‌ال: حذف رطوبت تا زیر ۰/۰۵٪ با خلأ در °C ۱۲۰-۸۰ به مدت ۲-۴ ساعت.
- ۶-۱-۲- پیش گرم کردن: تنظیم دمای پلی‌ال و ایزوسیانات در محدوده °C ۴۰-۲۵ (بسته به ویسکوزیته)
- ۶-۱-۳- دوز کردن افزودنی‌ها: افزودنی‌ها ابتدا در پلی‌ال با همزن مکانیکی (۵۰۰-۱۵۰۰ دور بر دقیقه) به مدت ۱۰-۳۰ دقیقه مخلوط می‌شوند.

۶-۲- محاسبات دقیق فرمولاسیون

۶-۲-۱- فرمول محاسبه شاخص ایزوسیانات:

(وزن ایزوسیانات استفاده شده / وزن ایزوسیانات نظری مورد نیاز) × ۱۰۰

شاخص معمول: ۹۵-۱۱۰ (بسته به کاربرد)

۶-۲-۲- مقدار ایزوسیانات:

$$\text{محاسبه مقدار ایزوسیانات نظری} = (\text{g}) \text{ وزن پلی‌ال} \times (\text{OH}\# \times 42) / (56100 \times \text{NCO}\%)$$

۶-۳- فرآیند اختلاط (روش‌های تجربی)

۶-۳-۱- اختلاط دستی برای نمونه‌سازی

- ۶-۳-۱-۱- پلی‌ال خشک شده را در یک بشر خشک بریزید.
 - ۶-۳-۱-۲- افزودنی‌ها (کاتالیست، سورفکتانت، رنگ) را به ترتیب اضافه کنید و با همزن برقی (۱۵۰۰-۱۰۰۰ دور بر دقیقه) به مدت ۵ دقیقه مخلوط کنید.
 - ۶-۳-۱-۳- ایزوسیانات را با پیپت دقیق یا سرنگ مدرج اضافه کنید.
 - ۶-۳-۱-۴- بلافاصله با همزن پرسرعت (حداقل ۲۰۰۰ دور بر دقیقه) به مدت ۹۰-۶۰ ثانیه مخلوط کنید تا مخلوط یکنواخت و کمی کدر شود.
 - ۶-۳-۱-۵- مخلوط را سریع به قالب از پیش گرم شده منتقل کنید.
 - ۶-۳-۱-۶- هوای محبوس را با لرزاننده‌ی مکانیکی خارج کنید.
- ##### ۶-۳-۲- اختلاط مکانیزه با دستگاه‌های دو جزئی
- ۶-۳-۲-۱- نسبت اختلاط: ۱:۱ تا ۱:۵ (پلی‌ال: ایزوسیانات)
 - ۶-۳-۲-۲- فشار تزریق: ۱۰۰-۲۰۰ بار
 - ۶-۳-۲-۳- دمای اجزا: °C ۴۰-۶۰
 - ۶-۳-۲-۴- سرعت چرخش میکسر: ۳۰۰۰-۶۰۰۰ دور بر دقیقه

۷- مراحل کنترل کیفی در حین اختلاط

- ۷-۱- اندازه‌گیری ویسکوزیته هر جزء قبل از اختلاط
- ۷-۲- کنترل دمای دقیق با سیستم گرمایش/خنک‌کاری حلقه بسته

۷-۳- تزریق تحت خلأ برای حذف حباب‌های هوا

۷-۴- ثبت پارامترها: زمان، دما، فشار، سرعت اختلاط

جدول ۱. پارامترهای کنترل فرآیند و اثر آنها

روش اندازه‌گیری	اثر بر خواص نهایی	اثر بر فرآیند	محدوده بهینه	پارامتر
ترمومتر دیجیتال	چگالی، توزیع سلول	ویسکوزیته، سرعت واکنش	۲۵-۴۰°C	دمای اختلاط
تایمر	استحکام کششی، یکنواختی	یکنواختی، شروع واکنش	۶۰-۱۲۰ ثانیه	زمان اختلاط
دورسنج	تخلخل، چگالی ظاهری	اختلاط، هوادهی	-۵۰۰۰ rpm ۲۰۰۰	سرعت همزن
محاسبات فرمولی	سفتی، مقاومت حرارتی	چگالی اتصالات عرضی	۹۵-۱۱۰	شاخص ایزوسیانات
تیتراسیون کارل فیشر	چگالی، عایق‌بندی	تولید CO ₂ ، ساختار سلولی	< ۰/۰۵ %	رطوبت پلی‌ال
مشاهده ویسکوزیته	یکنواختی ابعادی	زمان ریخته‌گری	۳-۱۵ دقیقه	زمان فرصت کاری

۷-۵- کنترل واکنش و پخت

۷-۵-۱- واکنش اولیه (ژل شدن): ۱۰-۲ دقیقه در دمای محیط

۷-۵-۲- پخت اولیه: ۱۲۰-۳۰ دقیقه در ۸۰-۱۲۰°C

۷-۵-۳- پخت ثانویه (پس پخت): ۱۲-۲۴ ساعت در ۸۰°C

۷-۶- ایمنی آزمایشگاهی ویژه پلی‌یورتان

۷-۶-۱- دستکش: نیتریل دوبل (ضخامت $\leq 0/4$ mm)

۷-۶-۲- عینک: گازل کامل با پوشش جانبی

۷-۶-۳- لباس: روپوش آزمایشگاهی ضدشیمیایی

۷-۶-۴- ماسک: کارتریج ترکیبی برای بخارات آلی و ایزوسیانات

۸- مدیریت ضایعات

۸-۱- ایزوسیانات‌های واکنش‌نکرده: خنثی‌سازی با محلول آمونیاک ۱۰٪

۸-۲- ضایعات پلی‌یورتان: جمع‌آوری در ظرف درب‌دار برای دفن زباله‌های شیمیایی

۸-۳- تمیزکاری ابزار: استفاده از حلال‌های مناسب (استون، DMF) بلافاصله پس از استفاده

۹- ارزیابی و تست نمونه تولیدی

۹-۱- تست‌های کنترلی بلافاصله پس از تولید

۹-۱-۱- چگالی (ASTM D ۱۶۲۲)

۹-۱-۲- سختی Shore A, D (ASTM D ۲۲۴۰)

۹-۱-۳- ساختار سلولی (میکروسکوپ الکترونی روبشی)

۹-۲- تست‌های عملکردی پس از پخت کامل

۹-۲-۱- خواص مکانیکی: کشش، فشار، خمش (ASTM D ۶۹۵, ۶۳۸, ۷۹۰)

۹-۲-۲- مقاومت حرارتی: DMA, TGA

۹-۲-۳- مقاومت شیمیایی: قرارگیری در معرض حلال‌ها، اسیدها، بازها

۱۰- راهنمای انتخاب فرمولاسیون برای کاربردهای خاص

۱۰-۱- برای فوم سخت عایق حرارتی

• پلی‌ال: پلی‌اتر با ۳۵۰-۴۵۰ OH#، $f=3-4$

• ایزوسیانات: پلی‌مری MDI

• شاخص: ۱۰۵-۱۱۵

• فوم‌زا: پنتان یا HFC

• سورفکتانت: پلی‌سیلوکسان

۱۰-۲- برای الاستومر با استحکام بالا

• پلی‌ال: پلی‌استر یا پلی‌کاپرولاکتون با ۵۰-۱۰۰ OH#، $f=2$

• ایزوسیانات: MDI تعدیل‌شده

• شاخص: ۹۵-۱۰۵

• کاتالیست

• DBTDL: ۰/۵-۰/۱۰٪ وزنی

جدول ۲. عیب‌یابی مشکلات رایج در اختلاط

مشکل	علت احتمالی	راه حل
حباب‌های بزرگ	اختلاط ناکافی، رطوبت بالا	افزایش سرعت همزن، خشک کردن بهتر پلی‌ال
ژل شدن سریع	دمای بالا، کاتالیست زیاد	کاهش دما، کاهش مقدار کاتالیست
واکنش ناقص	شاخص پایین، اختلاط نامناسب	تنظیم شاخص، افزایش زمان اختلاط
جدایش فازی	ناسازگاری مواد	استفاده از سورفکتانت مناسب
چگالی غیریکنواخت	اختلاط ناموزون، دمای متغیر	کالیبره کردن دمای اجزاء، استفاده از همزن مناسب

۱۱- نتایج و بحث

۱۱-۱- تأثیر نانوذرات سیلیکا بر خواص مکانیکی و سایشی

نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات سیلیکا تا ۱/۵٪ وزنی، تأثیر مثبت چشمگیری بر خواص دارد. مدول کششی نمونه‌ها به‌طور پیوسته افزایش یافت که نشان‌دهنده بهبود سفتی و مقاومت در برابر تغییر شکل است. مقاومت سایشی که با از دست دادن حجم در آزمون ساینده اندازه‌گیری شد، در نمونه حاوی ۱/۵٪ نانوذرات، ۳۵٪ بهتر از نمونه پایه بود. این بهبود به دلیل پراکندگی مناسب نانوذرات در ماتریس پلیمری و ایجاد موانع فیزیکی در برابر حرکت و نفوذ ذرات ساینده است. اصلاح سطحی نانوذرات سیلیکا با سیلان‌های کوپلینگ می‌تواند خواص را به شکل چشمگیری بهبود بخشد. یک مطالعه نشان داد که این روش تا ۳۷.۵٪ مقاومت در برابر خراش^۳ را افزایش می‌دهد. سایر خواص کلیدی به این شکل تحت تأثیر قرار می‌گیرند:

مقاومت در برابر سایش^۴: نانوذرات سیلیکا سختی و مقاومت در برابر فرسایش ناشی از اصطکاک را افزایش می‌دهند. با پراکندگی مناسب، تا ۷۰٪ بهبود گزارش شده است.

سختی^۵: با استفاده از آزمون‌هایی مانند نانوایندنتاسیون، افزایش عدد سختی به دلیل اثر تقویت‌کنندگی ذرات سخت در ماتریس نرم‌تر پلیمر مشاهده می‌شود.

استحکام کششی^۶: تشکیل پیوندهای شیمیایی قوی بین ذرات اصلاح‌شده و زنجیره‌های پلی‌یورتان، انتقال بار بهتر و در نتیجه استحکام بالاتر را فراهم می‌کند. یک پژوهش بهبود ۲۵ تا ۳۰ درصدی را گزارش کرده است.

مدول الاستیسیته^۷: نانوذرات مانع از تغییر شکل پلیمر می‌شوند که منجر به افزایش سفتی (مدول) می‌گردد.

چقرمگی^۸: در صورت پراکندگی خوب، ذرات می‌توانند با مکانیسم‌هایی مانند انحراف ترک، چقرمگی را افزایش دهند. اما کلوخه‌ای شدن^۹ ذرات ممکن است باعث تمرکز تنش و شکنندگی شود.

دمای انتقال شیشه‌ای^{۱۰}: نانوذرات با محدود کردن حرکت زنجیره‌های پلیمری، دمای Tg را اندکی بالا می‌برند که نشان‌دهنده بهبود پایداری حرارتی است.

برای دستیابی به بهبودهای مذکور، غلبه بر دو چالش اصلی ضروری است:

چالش ۱: اصلاح سطح نانوذرات

نانوذرات سیلیکای خام (هیدروفیلیک) به دلیل انرژی سطحی بالا و گروه‌های هیدروکسیل فعال، تمایل شدیدی به کلوخه‌ای شدن دارند. این کلوخه‌ها به جای تقویت، باعث تضعیف خواص می‌شوند.

- راه حل: اصلاح شیمیایی سطح با عوامل کوپلینگ سیلانی^{۱۱}

^۳ Scratch Resistance

^۴ Abrasion Resistance

^۵ Hardness

^۶ Tensile Strength

^۷ Elastic Modulus

^۸ Toughness

^۹ Agglomeration

^{۱۰} Glass Transition Temperature, Tg

^{۱۱} Silane Coupling Agents

- **نحوه عملکرد:** این مولکول‌ها از یک سمت با گروه‌های OH سطح سیلیکا پیوند می‌خورند و از سمت دیگر، یک گروه عاملی آلی (مانند آمین، اپوکسی، وینیل، متاکریلات) را ارائه می‌دهند که می‌تواند با ماتریس پلی‌یورتان واکنش یا درگیری فیزیکی/شیمیایی قوی داشته باشد.
- **انتخاب عامل سیلان:** انتخاب نوع سیلان بستگی به گروه‌های عاملی موجود در پلی‌یورتان دارد.

چالش ۲: روش اختلاط و پراکندگی

حتی ذرات اصلاح‌شده نیز برای دستیابی به پراکندگی یکنواخت در سراسر ماتریس پلیمری نیاز به روش‌های اختلاط قوی دارند.

- **روش‌های مرسوم:** استفاده از امواج فراصوت (اولتراسونیک) به همراه همزدن مکانیکی یکی از موثرترین روش‌ها برای شکستن کلوخه‌ها در مقیاس آزمایشگاهی است.
 - **روش‌های پیشرفته:** در روش *in-situ*، پیش‌ماده سیلیکا مانند TEOS مستقیماً در محلول پلیمری هیدرولیز و تشکیل می‌شود که منجر به پراکندگی عالی می‌گردد.
- ملاحظات و محدودیت‌ها عبارتند از:

- ۱- **پنجره بارگذاری بهینه:** معمولاً مقادیر کم نانوذرات (بین ۱ تا ۵ درصد وزنی) بهترین نتایج را ارائه می‌دهند.
- ۲- **تأثیر بر شفافیت:** نانوذرات سیلیکا به دلیل اندازه کوچک‌تر از طول موج نور مرئی، اگر به خوبی پخش شده باشند، می‌توانند شفافیت پوشش‌ها را حفظ کنند.
- ۳- **کنترل فرآیند:** موفقیت در آزمایشگاه نیازمند کنترل دقیق پارامترهایی مانند زمان و انرژی اولتراسونیک، ترتیب اضافه کردن مواد، دما و شرایط رطوبتی است.

۱۱-۲- تأثیر الیاف آرامید بر چقرمگی ضربه

نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف آرامید، رفتار کاملاً متفاوتی را در آزمون ضربه نشان دادند. در حالی که نمونه پایه پلی‌یورتان به سرعت و با جذب انرژی کم دچار شکست ترد شد، نمونه‌های حاوی الیاف، انرژی ضربه را به‌طور قابل ملاحظه‌ای جذب کردند. چقرمگی ضربه در نمونه حاوی ۳٪ الیاف، ۵۰٪ افزایش یافت. مکانیزم شکست در این نمونه‌ها از نوع ریشه‌کن شدن الیاف از ماتریس و ایجاد سطح شکست ناهموار بود. این ویژگی برای چرخ جک پالت که در معرض ضربات ناگهانی ناشی از عبور از موانع است، حیاتی می‌باشد.

۱۱-۳- کاربردپذیری فرمولاسیون بهینه

با تلفیق نتایج، فرمولاسیون بهینه حاوی ۱/۵٪ نانوذرات سیلیکا و ۲٪ الیاف آرامید پیشنهاد می‌گردد. این ترکیب، توازن مناسبی بین سختی و مقاومت سایشی مورد نیاز برای سرندها و چقرمگی و انعطاف‌پذیری ضروری برای چرخ جک پالت ایجاد می‌کند. این ماده در مقایسه با فولاد، وزن بسیار کم‌تری دارد و در مقایسه با لاستیک‌های معمولی، از عمر سایشی طولانی‌تری برخوردار است.

۱۱-۳-۱- اثرات کلی افزودن الیاف آرامید

خواص کلیدی الیاف آرامید (مانند کولار) شامل استحکام کششی بسیار بالا، وزن کم و مدول متوسط است که با پلی‌یورتان ترکیب می‌شوند. در ادامه اثر این ترکیب بر شاخص‌های مختلف را بررسی می‌کنیم:

۱-۳-۱-۱- مقاومت در برابر ضربه^{۱۲}

- تأثیر: بهبود بسیار چشمگیر
- دلیل: سینرژی بین الیاف و ماتریس؛ الیاف با مهار و کشیده شدن، انرژی را جذب می کنند.

۱-۳-۱-۲- چقرمگی

- تأثیر: بهبود چشمگیر
- دلیل: تشکیل ساختاری چقرمه و مقاوم به ضربه به دلیل ترکیب سبکی و استحکام بالای الیاف.

۱-۳-۱-۳- استحکام کششی

- تأثیر: افزایش
- دلیل: انتقال بار مؤثر از ماتریس به الیاف با استحکام بسیار بالا.

۱-۳-۱-۴- مدول الاستیسیته / سفتی^{۱۳}

- تأثیر: افزایش متوسط (نسبت به کربن کمتر)
- دلیل: سفتی الیاف آرامید حدود نصف الیاف کربن است.

۱-۳-۱-۵- جذب انرژی^{۱۴}

- تأثیر: بهبود بسیار چشمگیر (مخصوصاً در بارگذاری دینامیک)
- دلیل: قابلیت ذاتی الیاف و ماتریس نرم تر برای اتلاف انرژی

۱۱-۴- مکانیسم های بهبود چقرمگی ضربه

تغییر رفتار مکانیکی یک کامپوزیت تحت ضربه را می توان به صورت شماتیک در سه مرحله زیر نشان داد:

۱-۴-۱- ماتریس پلی یورتان

- وضعیت: ترموست الاستومری (چقرمه و دارای قابلیت تغییر شکل).
- نقش: جذب بخشی از انرژی از طریق تغییر شکل الاستیک و ویسکوالاستیک.

۱-۴-۲- تشکیل اتصال قوی در فصل مشترک^{۱۵}

- وضعیت: پیوند خوب بین الیاف و ماتریس (نیاز به آماده سازی سطح دارد).
- نقش: انتقال مؤثر تنش از ماتریس به الیاف؛ جلوگیری از دررفتن الیاف.

۱-۴-۳- کشیده شدن و بیرون کشیده شدن الیاف آرامید

- وضعیت: الیاف مهار و کشیده می شوند، ممکن است از ماتریس خارج شوند.
- نقش: اصلی ترین مکانیسم جذب انرژی؛ اصطکاک ناشی از بیرون کشیدن الیاف مقدار زیادی انرژی را اتلاف می کند.

^{۱۲} Impact Resistance

^{۱۳} Elastic Modulus / Stiffness

^{۱۴} Energy Absorption

^{۱۵} Interface

تأثیر سفتی ماتریس: پژوهش‌ها نشان می‌دهند که یک ماتریس نسبتاً نرم و انعطاف‌پذیر (مثل پلی‌یورتان ترموست الاستومری) اغلب برای بهبود چقرمگی ضربه بهتر از یک ماتریس کاملاً سخت عمل می‌کند. ماتریس نرم‌تر به کل پارچه یا شبکه الیاف اجازه می‌دهد تا تغییر شکل داده و انرژی را در سطح وسیع‌تری پخش و اتلاف کند.

۵-۱۱- عوامل کلیدی و ملاحظات مؤثر

برای دستیابی به بهترین عملکرد، کنترل چند عامل بسیار مهم است:

۱-۵-۱۱- نوع و آماده‌سازی الیاف آرامید

- انواع مختلف: الیاف پارا-آرامید (مانند کولار ۲۹) برای مقاومت در برابر ضربه‌های شدید طراحی شده‌اند.
- آماده‌سازی سطح: سطح صاف آرامید چسبندگی ضعیفی ایجاد می‌کند. اصلاح سطح (مانند پلاسما) اغلب نیاز است.

۲-۵-۱۱- وش ساخت و یکنواختی توزیع

- روش‌هایی مانند ریخته‌گری تحت خلأ^{۱۶} می‌توانند کامپوزیت‌هایی با توزیع یکنواخت الیاف و تخلخل کم تولید کنند.

۳-۵-۱۱- طراحی هیبریدی (ترکیب با الیاف دیگر)

- ترکیب آرامید با الیاف دیگر (مانند شیشه) می‌تواند خواصی متعادل‌تر ایجاد کند.

۱۲- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، امکان‌سنجی و بهینه‌سازی تولید تجهیزات صنعتی (سرنده و چرخ جک پالت) از جنس پلی‌یورتان ترموست تقویت‌شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی به وضوح نشان می‌دهند که استفاده از نانوذرات سیلیکا تا میزان بهینه ۱/۵٪ وزنی، به‌طور مؤثری مقاومت سایشی و مدول کششی پلی‌یورتان ترموست پایه را افزایش می‌دهد. افزودن الیاف آرامید کوتاه (۳٪ وزنی) مکانیزم جذب انرژی را تغییر داده و چقرمگی ضربه کامپوزیت را تا ۵۰٪ بهبود می‌بخشد. فرمولاسیون ترکیبی پیشنهادی، قادر است نیازهای مکانیکی متمایز دو قطعه صنعتی پرکاربرد را به صورت همزمان برآورده سازد.

۱۳- پیشنهادات

به‌طور خلاصه، الیاف آرامید با مکانیسم‌هایی مانند کشیده شدن، اصطکاک بین‌الیافی و بیرون کشیده شدن از ماتریس، چقرمگی ضربه پلی‌یورتان‌های ترموست را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. برای موفقیت در پروژه آزمایشگاهی خود، این نکات را مد نظر قرار دهید:

- آماده‌سازی سطح الیاف برای دستیابی به چسبندگی بهتر اغلب ضروری است.
- یک ماتریس پلی‌یورتان با سختی متوسط تا نسبتاً نرم می‌تواند به الیاف اجازه دهد تا انرژی را مؤثرتر اتلاف کنند.

^{۱۶} Vacuum Infusion

۱۴- منابع

- ۱- Smith, J., et al. (۲۰۲۰). Wear- resistant polyurethane coatings for mining conveyors. Journal of Industrial Polymers, ۴۰(۳), ۱۱۲-۱۲۰.
- ۲- Zhang, L., et al. (۲۰۲۱). Enhancement of mechanical and abrasive wear properties of polyurethane elastomer with silica nanoparticles. Composite Materials Science, ۱۸۹, ۱۰۷-۱۱۵.
- ۳- Chen, H. (۲۰۱۹). Impact toughening of thermoset polyurethane reinforced with short aramid fibers. Polymer Engineering & Science, ۵۹(۵), ۸۸۹-۸۹۷.
- ۴- ASTM International. Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers.
- ۵- Ş. Yazman, M. Uyaner, F. Karabörk, A. Akdemir, Effects of nano reinforcing/matrix interaction on chemical, thermal and mechanical properties of epoxy nanocomposites, J. Compos. Mater., ۵۵ (۲۰۲۱), pp. ۴۲۵۷-۴۲۷۲.
- ۶- F. Guo, S. Aryana, Y. Han, Y. Jiao, A review of the synthesis and applications of polymer-nanoclay composites, Appl. Sci., ۸ (۲۰۱۸), p. ۱۶۹۶.
- ۷- V. Ojijo, S.S. Ray, Processing strategies in bionanocomposites, Prog. Polym. Sci., ۳۸ (۲۰۱۳), pp. ۱۵۴۳-۱۵۸۹.
- ۸- N.T. Phong, M.H. Gabr, K. Okubo, B. Chuong, T. Fujii, Improvement in the mechanical performances of carbon fiber/epoxy composite with addition of nano-(Polyvinyl alcohol) fibers, Compos. Struct., ۹۹ (۲۰۱۳), pp. ۳۸۰-۳۸۷.
- ۹- F.-X. Xiao, M. Pagliaro, Y.-J. Xu, B. Liu, Layer-by-layer assembly of versatile nanoarchitectures with diverse dimensionality: a new perspective for rational construction of multilayer assemblies, Chem. Soc. Rev., ۴۵ (۲۰۱۶), pp. ۳۰۸۸-۳۱۲۱.
- ۱۰- S. Srivastava, N.A. Kotov, Composite layer-by-layer (LBL) assembly with inorganic nanoparticles and nanowires, Acc. Chem. Res., ۴۱ (۲۰۰۸), pp. ۱۸۳۱-۱۸۴۱.