

سازگاری ترکیبات زیست تخریب پذیر پلی (لاکتید اسید) (PLA) و پلی (بوتیلن سوکسینات) (PBS) برای کاربرد بسته بندی

دانیال سکوند*

چکیده

انتظار می‌رود به دلیل دوستدار محیط زیست بودن و خواص مکانیکی و دمایی سازگار با محیط، ترکیبات پلیمری زیست تخریب پذیر، استفاده‌ی گسترده‌ای در صنعت داشته باشند. پلی (لاکتید اسید) (PLA) و پلی (بوتیلن سوکسینات) (PBS) پلیمرهایی با این خواص هستند که هدف این است در کاربردهای آینده جایگزین پلیمرهای تجاری شوند. از آنجایی که PLA قیمت و شکنندگی بسیار بالایی دارد از نظر اقتصادی امکان پذیر نیست که از آن به تنهایی و بدون ترکیب برای استفاده‌های روزمره مثل بسته‌بندی استفاده شود.

در این مقاله، با استفاده از روزن رانی دو- پیچ مقیاس آزمایشگاهی در ۱۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ترکیبات PLA و PBS با نسبت‌های متفاوتی به دست آمدند. خواص مکانیکی، جریانی، دمایی و ریخت‌شناختی روی نمونه‌های به وسیله‌ی قالبگیری پرسی مورد بررسی قرار گرفتند تا مناسب بودن این ترکیبات برای کاربردهای بسته‌بندی محک زده شود. ریخت‌شناسی مواد توسط میکروسکوپ پویش الکترونی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. ریخت‌شناسی یک تفاوت فاز واضح وابسته به نسبت اجزای ترکیب را نشان داد. دمانگاشت‌های (MDSC) ترکیبات نشان داد که با اضافه کردن PBS، دمای تبدیل شیشه‌ای (T_g) پلی لاکتید اسید به طور چشمگیری تغییر نمی‌کند، اما آنالیز نشان داد که در مورد PBS/PLA مخلوط با ترکیب ۲۰/۸۰، سازگاری بین دو پلیمر وجود دارد. قدرت انبساط و مدول به وسیله‌ی دستگاه تست جهانی اینسترال اندازه‌گیری شدند. قدرت کشسانی، مدول و درصد (%) تطویل در تفکیک ترکیبات با کاهش محتوی PBS همراه بود. اگرچه، قدرت کشسانی و ارزش‌های مدول مخلوط PBS/PLA برای ترکیب ۲۰/۸۰ تقریباً قاعده‌ی ماتریس را دنبال می‌کند. نتایج جریان‌شناسی هم سازگاری بین دو پلیمر برای ترکیب PBS کمتر از ۲۰٪ وزن را نشان داد. PBS شکنندگی PLA را کاهش داد بنابراین، آن را مدعی جایگزینی پلاستیک‌ها برای کاربردهای بسته‌بندی می‌کند. این کار (مقاله)، با بررسی خواص دمایی، مکانیکی و ریخت‌شناسی، سازگاری نسبی بین PLA و PBS را یافت.

مقدمه

در سال اخیر، به دلیل تاثیر زیاد هدر رفت روزانه‌ی پلاستیک، آلودگی محیطی تبدیل به یک نگرانی بزرگ شده است. یکی از راه‌حل‌های ممکن برای این مشکل جایگزین کردن پلیمرهای ترکیبی با پلیمرهای زیست تخریب پذیر که به آسانی وارد فعالیت میکروبی می‌شوند، است. PLA و PBS چنین پلیمرهای زیست تخریب‌پذیری هستند که هدف این است جایگزین پلیمرهای مصنوعی تجاری شوند. شکنندگی و هزینه‌ی بالای PLA مسئله‌ی بزرگ برای تجاری‌سازی و بسیاری از کاربردهای آنها مثل بسته‌بندی است. بنابراین برای بهبود خواص مختلف و پایین آوردن هزینه‌ی تولید، تحقیقات مختلفی روی PLA با سایر پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر صورت گرفته است.

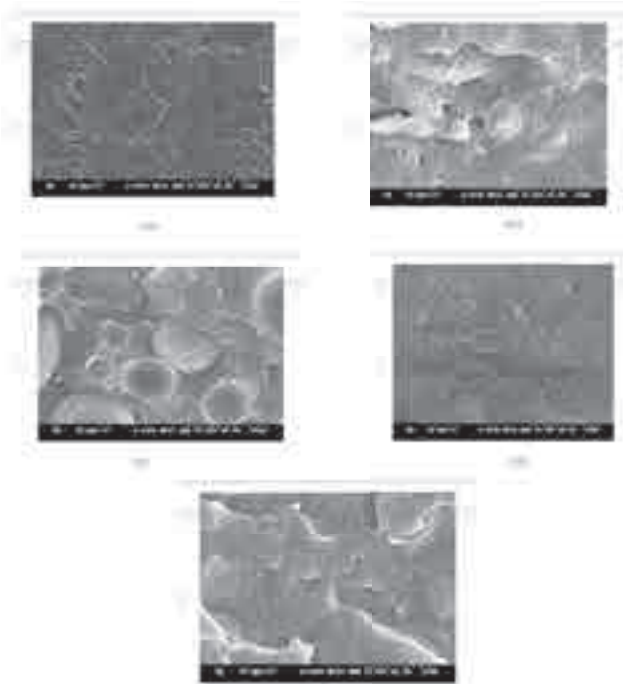
در مورد سیستم دوتایی PLA و PEO، نیجینه‌ویس و همکاران (۱۹۹۶) گزارش کرده‌اند که تا میزان ۵۰ درصد وزن همه‌ی ترکیبات (T_g) یکسانی را نشان دادند. در مطالعه‌ی آنها، با افزایش PEO (wt %) نقاط ذوب تعادل PLA در ترکیبات کاهش یافت، که نشان این است که PLA و PEO در فازهای ریخت‌شناسی سازگار هستند. یک دمای تبدیل شیشه‌ای یکسان برای همه‌ی ترکیبات مخلوط برای سیستم PLA/PVA هم توسط گجریا و همکاران (۱۹۹۶) مشاهده شد، که مخلوط‌ها را به عنوان امتزاج‌پذیر مشخص می‌کند. شت و همکاران، (۱۹۹۷) از نتایج آنالیز اسکن دامسنجی نتیجه گرفتند که امتزاج‌پذیری مخلوط‌های PLA/PVA به غلظت PEG بستگی دارد. برای امتزاج‌پذیری بیشتر PEG، T_g در امتزاج‌پذیری پایین‌تر PEG (۳۰ wt %) نمی‌تواند توسط DSC مشاهده شود، یک کاهش در T_g از ۵۷ درجه تا ۳۷ درجه اتفاق افتاد، ژانگ و همکاران، (۱۹۹۵) ترکیبات مختلف مثل PLA و پلی (ای کاپرولاکتون) (PCL) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج DSC آنها ترکیب PLA/PCL را غیرامتزاج‌پذیر نشان دادند چرا

که ترکیب یک تغییر بسیار کوچک در اندوترم را نشان داد. SEM برای PLA/PCL هم

یک سیستم جدایی فاز دوگانه‌ی موافق با نتایج را نشان داد.

به گفته‌ی هوانگ و همکاران، (۱۹۹۰)، اولین نسل مواد زیست‌تخریب‌پذیر از ترکیب پلیمر با منابع غذایی طبیعی مثل نشاسته به وجود آمده بودند. نسل دوم روی تعبیه‌ی گروه‌های کاربردی مثل پیوند استر روی زنجیره‌ی پلیمر تمرکز داشت. مرحله‌ی سوم گسترش موادی مثل پلی (لاکتید اسید) (PLA) که به طور طبیعی توسط باکتری‌های رشدیافته توسط تخمیر تولید شده‌اند، است که می‌توان بعد از کمپست آنها را به عنوان مواد زیست‌تخریب‌پذیر و دوستدار محیط زیست در نظر گرفت (هوانگ و همکاران، ۱۹۹۰).

در این مقاله پلیمرهای استفاده شده برای ترکیب (مخلوط) به دلیل خواص زیر، دارای خواص نسبتاً خوبی برای به دست آوردن مواد زیست تخریب‌پذیر PLA و PBS هستند. PLA، یک پلی‌استر چربی‌دار خطی، تولید شده از منابع تجدیدپذیر است که به دلیل زیست‌تخریب‌پذیریش توجه زیادی را به خود جلب کرده است و می‌تواند یک راه‌حل ممکن (احتمالی) برای هدر رفت مواد جامد باشد (ری و بوسمینا). PLA خواص زیست تخریب‌پذیر، درمایی و مکانیکی خوبی دارد و بنابراین یک پلیمر خوب برای کاربردهای است (کوی و هانا، ۱۹۹۹). اگرچه سایر خواص مثل خواص موجی (نرم بودن)، دمای تغییر شکل گرما (HDT)، تراوایی گاز، استحکام ضربه‌ای، گرانروی ذوب برای فرآورش و غیره برای کاربردهایی مثل بسته‌بندی به اندازه کافی خوب نیستند (اوگاتا و همکاران، ۱۹۹۷). همچنین قیمت و شکنندگی بالای PLA امکان تجاری‌سازی آن را کم می‌کند. بنابراین، ترکیب (مخلوط) PLA با سایر پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر مناسب که خواص انعطاف‌پذیری، استحکام ضربه‌ای بالا، قابلیت فرآورش ذوب نسبتاً بهتری دارند، خواص مختلف آن را ارتقا می‌بخشد و همچنین باعث کم شدن قیمت آن می‌شود. اثبات شده



شکل ۱: تصاویر SEM از ترکیبات مختلف مخلوط PLA/PBS: (a) ۹۰/۱۰، (b) ۸۰/۲۰، (c) ۵۰/۵۰، (d) ۲۰/۸۰، (e) ۱۰/۹۰

مختلف توسط ترکیب ذوب در دمای 180°C روزن رانی شدند. ترکیبات نسبت‌های مختلف همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند به دست آمدند. قبل از مخلوط کردن در روزن ران دو پیچ، مقادیر اندازه گرفته شده از هر پلیمر اول در یک ظرف ترکیب شدند. روزن ران در دمای 180°C و سرعت چرخش 60 rpm برای ترکیب (مخلوط) کردن تمام ترکیبات شروع به کار کرد. برای ترکیب شدن خوب پلیمرها، روزن ران سه دور کار کرد. به همهی ترکیبات دمای فرآورش یکسانی داده شد تا هم‌نواختی یکسان/کلی داشته باشند. قبل از فشار، ترکیبات تولید شده دوباره در دمای 50°C و در اون خلا به مدت ۱۲ ساعت خشک شدند. دمای قالبگیری برای PLA خالص، PBS خالص و ترکیب آنها به ترتیب 200°C ، 130°C و 190°C بود. نمونه‌های قالبگیری شده، قبل از جدا شدن از قالب تا دمای 50°C سرد شدند. برای آزمایش مکانیکی، نمونه‌های به شکل استخوان سگ درآمده (ASTM D368) به مدت ۸ دقیقه تحت فشار، متراکم شدند. مشخص کردن ویژگی دمایی با به دست آوردن نمونه‌های دارای ضخامت 2 mm ، انجام شدند.

نتایج و بحث

۱. میکروسکوپ پویش الکترونی (SEM)

ریخت شناسی با میکروسکوپ پویش الکترونی تفکیک بالا (SEM) مورد بررسی قرار گرفت، که با ولتاژ سرعت 15 kV انجام شد. ترکیبات به نیتروژن مایع شکسته (تجزیه) شدند. تصاویر ترکیبات در شکل ۱ زیر نشان داده شده‌اند. تصاویر SEM (شکل ۱) از سطوح شکسته شده، ریخت‌شناسی ترکیبات مختلف PLA/PBS را نشان می‌دهد. از شکل ۱ (a و b)، واضح است که فاز پراکنده شده‌ی PBS در مقایسه با سایر ترکیبات (شکل ۱ (c و d)) قطر میانگین نسبتاً کوچکی دارد. زمانی که PBS wt% افزایش پیدا می‌کند، جدایی فاز در این ترکیبات کاملاً مشهود است. به علاوه، به دلیل افزایش در محتوای PBS، اندازه‌ی ذره (یعنی قطر) افزایش پیدا می‌کند (شکل ۱ (c)). ترکیب PLA/PBS بالای $50/50\text{ wt}$ ریخت

است که PLA با سایر ایزمرهای استری مثل پلی (دی ال - لاکتیک اسید) (تسوجی و ایکادا، ۱۹۹۶ و پرگو و همکاران ۱۹۹۶) و بعضی پلیمرهای دیگر مثل پلی (اتیلن اکساید) (PEO) (نیجیهوسی و همکاران، ۱۹۹۶) و پلی (اتیلن گلیکول) (شت م. و همکاران، ۱۹۹۷) امتزاج‌پذیر است. امتزاج (مخلوط بر اساس میزان ترکیب آنها) خواص پلیمرهای ترکیب شده را تغییر داده است. PBS با نام تجاری «BIONOLLE» پلی‌استر چربی زیست‌تخریب‌پذیر است که به وسیله‌ی واکنش بسپارش تراکمی از ۱،۴-بوتانیدیول با سوکسینیک اسد تولید می‌شود (بهارای و همکاران، ۱۹۹۸، دوی و همکاران و تکاجی و همکاران، ۱۹۹۶). پلی‌استر انعطاف‌پذیری بالا، استحکام ضربه‌ای عالی و مقاومت شیمیایی بالایی دارد (دوی و فوکودا، ۱۹۹۴). می‌تواند به آسانی فرآوری شود و بهترین گزینه برای ترکیب شدن با PLA است. بسیاری از مطالعه و بررسی‌های در تشکیل فیلم (پوسته) و اشیاء قالبگیری شده، در طی چند ماه تخریب‌پذیری چشمگیری در خاک، آب با لجن فعال شده و آب دریا را نشان داده‌اند (نیشیوکا و همکاران، ۱۹۹۴).

هدف این تحقیق تولید یک شکل ترکیب شده از PLA و PBS و بررسی خواص جریان‌ی و مکانیکی ترکیب است. سازگاری دو پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر هم به وسیله‌ی آزمایشات MDSC و تصاویر SEM از ترکیبات مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق، مخلوط PLA و PBS از نسبت‌های مختلف به وسیله‌ی روزن رانی دوپیچ تولید شدند. خواص مختلف توسط تکنیک‌های مختلف مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفتند. سازگاری پلیمرها در ترکیب به وسیله‌ی تصاویر SEM و دمانگاریهای MDSC مورد بررسی قرار گرفتند در حالی که برای ارزیابی خواص مکانیکی، از آنالیزهای فشار-کشیدگی استاندارد استفاده شد. بعلاوه، خواص جریان‌ی هم به وسیله‌ی دستگاه افزایش جریان‌ی پیشرفته (ARES) بررسی شد. همهی خواص ترکیبات با پلیمرهای خالص و دست نخورده مقایسه شدند. هدف بعدی این بررسی به دست آوردن یک درک وسیع از مسائل پرخطر محیطی ایجاد شده توسط زباله‌های جامد پلاستیک‌های تجاری با در نظر گرفتن جایگزینی با ترکیب پلیمری PLA و PBS است.

روش‌های آزمایش

۱. مواد

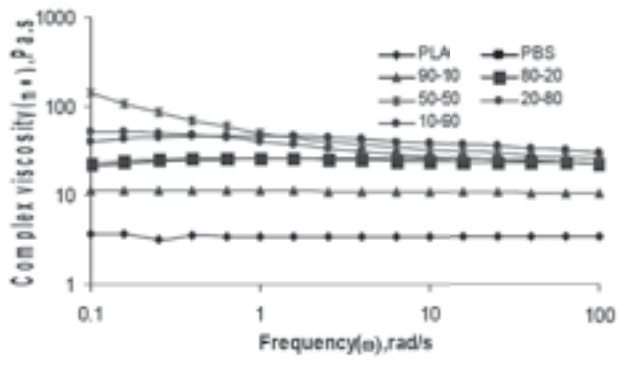
پلیمر PLA (4032D-درجه، فیلم‌های دو محوری) که توسط کارجیل داو LLC تولید شد در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. PLA انحلال‌پذیری ناچیزی در آب و یک نقطه‌ی ذوب 170 درجه‌ی سانتی‌گراد دارد. پلی‌استر زیست‌تخریب‌پذیر، پلیمر PBS (G4460-درجه، $MI=1.8\text{ g}/10\text{min}$) با نام تجاری برای ترکیب شدن با PLA توسط ایرکم. کو کریا مورد استفاده قرار گرفت. PBS یک نقطه‌ی ذوب 95°C دارد.

۲. تهیه‌ی ترکیب

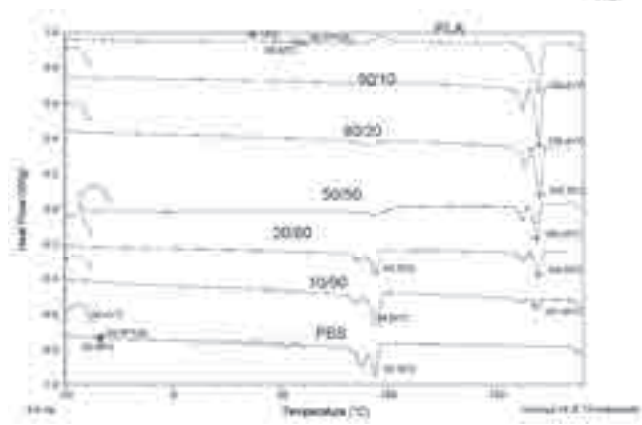
در ابتدا گلوله‌های و در یک اون خلا در یک دمای 50°C و فشار 80 KPag برای مدت دو روز خشک شدند تا قبل از فرآیند فرآورش آب آنها از طریق روزن ران از بین برود. خشک کردن برای به حداقل رساندن تخریب آبکافتی (تجزیه به وسیله‌ی آب) پلیمر در طول فرآیند ذوب در روزن ران به حداقل برسد. ترکیبات PLA و PBS با نسبت‌های

جدول ۱- نسبت‌های ترکیبات PLA/PBS

| PLA % by wt | ۰ | ۱۰ | ۲۰ | ۵۰ | ۸۰ | ۹۰ | ۱۰۰ |
|-------------|-----|----|----|----|----|----|-----|
| PBS % by wt | ۱۰۰ | ۹۰ | ۸۰ | ۵۰ | ۲۰ | ۱۰ | ۰ |



شکل ۳: گرانروی پیچیده (η^*) در مقابل فرکانس ترکیبات PLA/PBS در 200°C

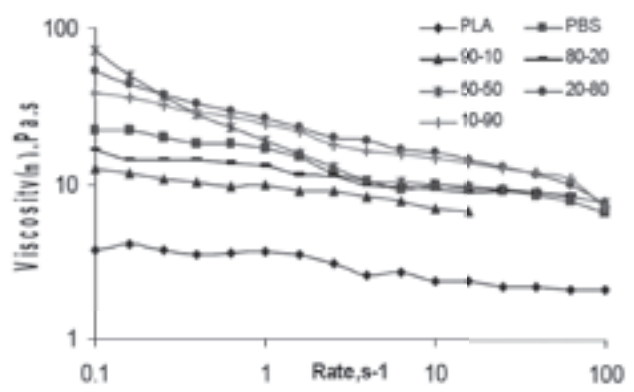


شکل ۲: دمانگاشت‌های MDSC ترکیبات PLA/PBS (میزان گرما: $2^\circ\text{C}/\text{min}$)

مخلوط و هم پیک‌های حرارت گیر دوگانه‌ای را در دما نگار گرماسنجی پویش دیفرانسیل (افتراقی) (DSC) نشان می‌دهند. آنها گزارش کرده‌اند که این پیک‌ها به ذوب دوباره‌ی کریستال‌های تازه تشکیل شده، نسبت داده می‌شوند. این محققان نتیجه‌گیری کرده‌اند که ترکیبات PLA/PBS غیرامتزاج‌پذیرند. لی و لی (۲۰۰۵) برای ظاهر پیک‌های گرماگیر در اسکن گرمادهی دوم دلیلی را ارائه کرده است. آنها نتیجه گرفته‌اند که ظاهر شدن پیک‌های گرماگیر دوگانه به دلیل سریع خنک کردن بعد از چرخه‌ی گرمادهی اول است. این کار اجازه نمی‌دهد بلورینگی ذوب بالا شکل بگیرد. بنابراین، کریستال‌های پایین بیشتری تولید می‌شوند.

۳. خواص جریان‌شناسی

خواص جریان‌شناسی برش هریک از پلیمرهای ترکیبی و خالص با استفاده از یک سیستم گسترش جریان (ARES) که از هندسه‌ی صفحه‌ی موازی 50 میلی‌متر استفاده می‌کند، استفاده شد. برای جلوگیری از هرگونه تخریب‌پذیری، آزمایشات در دمای 200°C و تحت یک اتمسفر نیتروژن انجام شدند. قبل از آزمایش همه‌ی نمونه‌ها در یک اون خلا خشک شدند. سنجش‌های جریان‌شناسی زیر، انجام شدند. (ا) آزمون‌های روبش فشار دینامیکی برای تایید خطی بودن منطقه‌ی ویسکوالاستیک تا فشار 100 درصد و فرکانس 10 rad/s (ب) آزمون‌های روبش فرکانس دینامیکی روی فرکانس از 100 تا 1 (ج) آزمون‌های روبش میزان برش ثابت برای محدوده‌ی میزان برش 100 تا 1 پاسخ ویسکوالاستیک خطی ترکیبات توسط اندازه‌گیری مدول ذخیره (G') و مدول از دست داده‌ی آنها (G'') در دمای 200°C مشخص شد تا تایید کند که خواص دینامیک



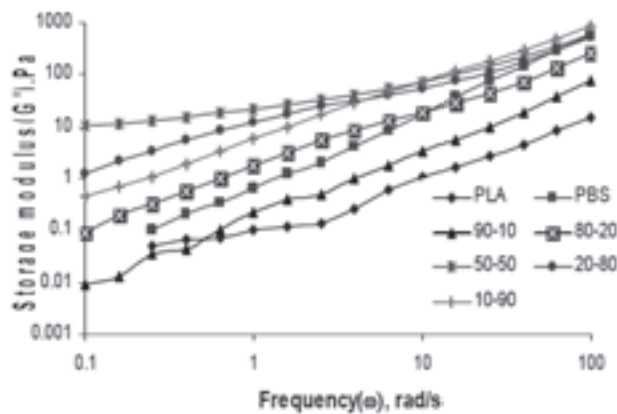
شکل ۴: گرانروی (η) در برابر میزان برش ترکیبات PLA/PBS در 200°C

شناسی رزرو است یعنی هنگامی که غلظت PLA کمتر از $50 \text{ wt}\%$ است؛ PLA تبدیل به فاز پراکنده شده در PBS می‌شود. ترکیبات بیشتر از $20/80$ (PLA/PBS) یعنی برای محتوای PLA بالا، می‌توان ریخت‌شناسی سنتی ترکیبات امتزاج‌ناپذیر را دید. روند ریخت‌شناسی امتزاج‌ناپذیر مشابهی هم برای ترکیبات با کوپلی استر (بوتیلن سوکسینات ادیپیت) توسط لی و لی (۲۰۰۵) گزارش شد.

۳. گرماسنجی پویش دیفرانسیل مدوله شده

تعیین ویژگی خواص گرمایی ترکیبات با مدوله شده DSC انجام شد (مدل دستگاه تا 2920). قاب‌های آلومینیوم مهر و موم شده‌ی حاوی 5 تا 10 میلی‌گرم از نمونه‌های ترکیب در همه‌ی آزمایشات انجام شد. برای از بین بردن تاریخچه‌ی دمایی، همه‌ی نمونه‌ها تا دمای 200°C گرم شدند و برای مدت 5 دقیقه در همان حالت حفظ شدند و سپس به سرعت تا دمای 50°C سرد شدند. اندازه‌گیری واقعی که در هنگام چرخه‌ی گرمادهی دوم از 50°C تا 200°C در میزان گرمای $2^\circ\text{C}/\text{min}$ انجام شده‌اند در اینجا گزارش شده‌اند. شکل ۲ دمانگاشت‌های MDSC، PLA خالص، PBS خالص و ترکیبات آن‌ها را نشان می‌دهد. در مورد PLA خالص، یک پیک بلورینگی گسترده بین 95 تا 105°C مشاهده شده است. که با یک پیک ذوب تیز در حدود 170°C همراه شده است. در مورد PBS خالص، دمانگاشته یک پیک ذوب 93°C را نشان می‌دهد. همچنین نشان داده شده است که دمای تبدیل شیشه‌ای (T_g) PLA خالص و PBS خالص به ترتیب در حدود 58 و 34°C است. یک مدرک مستقیم از غیرامتزاج‌پذیری پلیمر را می‌توان به وسیله‌ی مشاهده‌ی تغییر در (T_g) و (T_m) دو پلیمر در ترکیب احراز کرد.

تا میزان $10 \text{ wt}\%$ PBS در PLA، (T_g) و (T_m) تغییر نکرده است، در حالی که هنگامی که نسبت PBS افزایش پیدا می‌کند ($10 \text{ wt}\%$) دمانگاشت شروع به نشان دادن یک تغییر پیک حرارت‌زای کوچک به سمت دمای پایین‌تر می‌کند و برای سایر ترکیبات ادامه پیدا می‌کند. افزایش در PLA میزان در ترکیبات PLA/PBS هم تغییر پیک حرارت‌زا از PBS به سمت دمای بالاتر را نشان می‌دهد. اما تغییرات در ترکیبات بسیار قابل توجه نیستند، که نشان‌دهنده‌ی غیرامتزاج‌پذیری است. در بررسی میزان نسبت کامل هم دو پیک ذوب متمایز مشاهده شدند، که نشان‌دهنده‌ی این است که هر یک از ترکیبات/اجزا به طور جداگانه بلورینه می‌شوند. این نشان می‌دهد که برای میزان $20 \text{ wt}\%$ از PBS در PLA، سازگاری امکان‌پذیر است و بیشتر از آن، آنها ناسازگار می‌شوند. همچنین، ظاهر T_m و T_g در دمانگاشت‌های MDSC به پلیمر خالص نزدیک می‌شود که نشان‌دهنده‌ی این است که یگانگی ساختاری، در طول ترکیب ذوب، آسیبی ندیده است. توسط سویت و بل (۱۹۷۲) و رابرتس (۱۹۷۰) گزارش شده است که در مورد گرمادهی دوم، ترکیب/

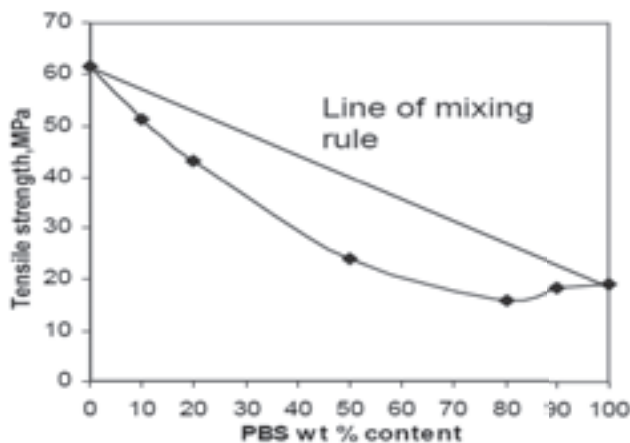


شکل ۶: مدول ذخیره (G') در مقابل فرکانس ترکیبات PLA/PBS در ۲۰۰°C

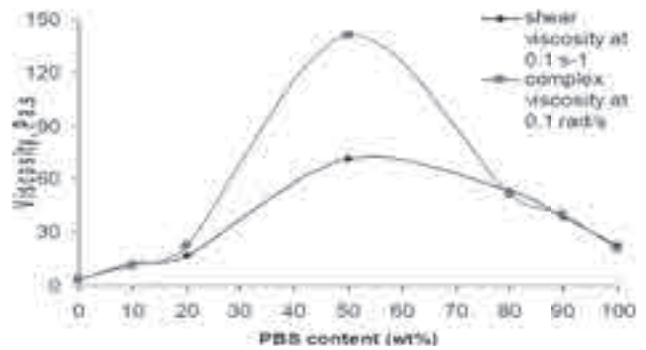
PBS تقریباً قاعده‌ی جمع‌پذیری لگاریتم را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی یک‌مترازی پذیری محدود تنها در یک محدوده از غلظت‌های پایین است. ترکیبات PLA/PBS سازگار هستند چرا که آنها انحراف مثبتی را نشان می‌دهند (شکل ۵). شکی ۶ و ۷ نشان می‌دهند که مدول ترکیبات (PLA) و (PBS) در مقایسه با PLA و PBS و در رنج فرکانس (۰/۱-۱۰۰ rad/s) بررسی شده، به صورت یکنواخت افزایش پیدا می‌کند. در فرکانس‌های بالا (>20 rad/s) رفتار ویسکوالاستیک کیفی یعنی (G') (مدول ذخیره) و مدول اتلاف (G'') تمام ترکیبات به ویژه میزان بالا، یکسان است. ترکیبی با غلظت wt% ۹۰/۱۰ و ۸۰/۲۰ wt% PLA/PBS است، بین پلیمرهای خالص قرار می‌گیرد. همانطور که توسط تصاویر SEM و دمانگار MDSC نشان داده شده است، مدول ترکیبی که محتوی کمتر از wt% ۲۰ PBS است، تناسب مشابهی را نشان می‌دهد.

۴. خواص انبساط پذیری

آزمایش قابلیت انبساط برای بررسی قدرت کشتسانی، مدول‌های کشتسانی و درصد تطویل در تجزیه، با استفاده از دستگاه آزمایش جهانی ۴۴۶۷ اینسترون در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد (دمای اتاق) انجام شد. همه‌ی تست‌ها بر اساس استاندارد ASTM 638 انجام شدند. تست‌های PLA خالص و ترکیبات آن با یک سرعت ۵ mm/min و برای PBS با سرعت ۵۰ mm/min انجام شدند. ارزش‌های خواص گزارش شده در اینجا، یک میانگین نتایج برای تست‌های انجام شده روی ۵ نمونه را گزارش داده‌اند.



شکل ۷: مدول اتلاف (G'') در مقابل فرکانس ترکیبات PLA/PBS در ۲۰۰°C



شکل ۸: گرانروی در مقابل میزان wt% PBS در دمای ۲۰۰°C در ۰/۱ rad/s

در قسمت ویسکوالاستیک انجام شده است. مشخص شد که PLA، PBS و ترکیبات آنها در محدوده‌ی ویسکوالاستیک تا میزان فشار ۱۰ wt% هستند.

گرانروی پیچیده‌ی دینامیکی پلیمرهای خالص و ترکیباتشان به عنوان یک کاربرد فرکانس در دمای در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. هر دو پلیمر، PLA و PBS در محدوده‌ی فرکانسی بررسی شده، عمدتاً رفتار نیوتنی را از خود نشان دادند. ترکیبات PBS/PLA از ۵۰/۵۰ wt%، در فرکانس‌های پایین یک رفتار رقیق‌سازی برش قوی را نشان داد، در حالی که همه‌ی ترکیبات دیگر رفتار تقریباً مشابهی مثل پلیمرهای خالص را نشان دادند یعنی رقیق‌سازی برش مشاهده نشد. گرانروی PLA خیلی کمتر از گرانروی PBS و همچنین ترکیبات تمام فرکانس‌ها بود.

وابستگی گرانروی برش فشار به میزان برش در دمای ۲۰۰°C برای پلیمرهای خالص و ترکیبات آنها در شکل ۴ نشان داده شده است. گرانروی برش سیستم ترکیب با افزایش میزان برش، کاهش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده‌ی رفتار رقیق‌سازی برش است. برای پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مثل (رامکومار و بهاتاچاریا، ۱۹۹۸) و پلی‌استر چربی‌دار زیست‌تخریب‌پذیر (BAP) (شین و همکاران، ۲۰۰۰) رفتار مشابهی مشاهده شد. هر دو پلیمر خالص، یک شرایط پایا در میزان برش پایین نشان دادند که نشان.

دهنده‌ی گرانروی برش-صفر است. با افزایش میزان PBS به بالای ۵۰ wt%، گرانروی‌های ترکیبات افزایش پیدا کرد در حالی که ترکیب PBS ۱۰ و ۲۰ wt%، گرانروی‌هایی بین گرانروی‌های پلیمرهای خالص را نشان دادند که نشان می‌دهد wt% ۲۰، از PBS، ترکیب امتزاج‌پذیری را نشان می‌دهد و بیشتر از آن امتزاج‌ناپذیر می‌شود. مشاهدات مشابهی در مورد امتزاج‌پذیری ترکیبات (PLA/PBS) wt% ۲۰/۸۰ و ۱۰/۹۰ wt% برای گرانروی پیچیده از شکل ۳ نشان داده شده است.

از نقطه نظر جریان‌شناسی، انحراف مثبت در ترکیبات PBS نشان‌دهنده‌ی سازگاری بین ماتریس دو پلیمر یا بیشتر، است. اگر واکنش‌های بین‌فازی بین پلیمرها به دلیل سازگارسازی باشند پس سیستم ترکیب، انحراف مثبت از قاعده‌ی جمع‌پذیری لگاریتم را برای گرانروی و فشار نرمال نشان می‌دهند (اتراکی، ۱۹۸۳). در این مورد ترکیب ۵۰/۵۰ wt% PLA/PBS نسبت به آنچه توسط قاعده‌ی جمع‌پذیری پیش‌بینی شده بود، یک ارزش بالاتر از گرانروی پیچیده در یک فرکانس ثابت از ۰/۱ rad/s را نشان داد (شکل ۵).

گرانروی برش هم ارزش بالاتری را در میزان برش ثابت ۰/۱ s⁻¹ برای ترکیب ۵۰/۵۰ wt% نشان داد.

پرست و پروتر (۱۹۷۲) نتیجه‌گیری کردند که ترکیبات پلی (فنیلن اکساید) (PPO)/پلی‌استیرین (PS) به نوع PDB متعلق هستند. اطلاعات مربوط به سیستم‌های امتزاج‌پذیر در مورد پروپیلن (pp)/پلی بوتیل (PB-I) توسط جنیل و می (۱۹۷۸) و پلی‌اتیلن چگالی بالا (HDPE)/کوپلیمر اتیلن وینیل اکستیت (EVA) توسط فوجیمورا و ایوکورا (۱۹۷۰ و ۱۹۷۴) هم ترکیبات انحراف مثبتی را می‌دهند. گرانروی‌های ترکیبات PLA/PBS wt% ۲۰

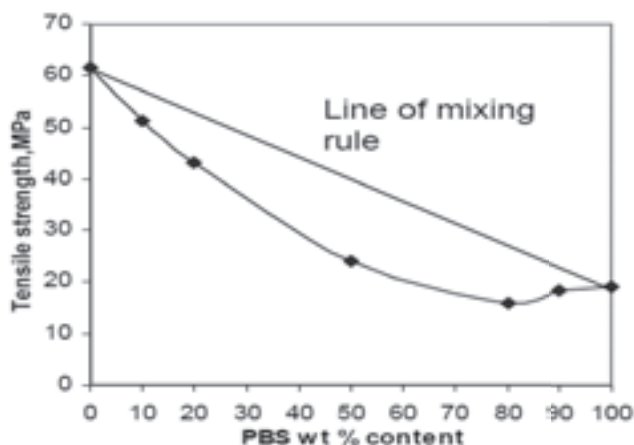


اگرچه می‌توان در شکل ۵ و ۶ متوجه شد که در ترکیبات با میزان (PLA/PBS) ۸۰/۲۰، قدرت کشسانی و مدول‌ها نزدیک خط قاعده‌ی مخلوط/ترکیب است. این یعنی در خلال زمانی که غلظت پایین‌تر است سازگاری (هم‌نواختی) بین PLA و PBS امکان‌پذیر است. یک کاهش آرام قدرت کشسانی و مدول‌های یانگ در ترکیبات ۵۰/۵۰ wt% ارائه شد که هر پلیمر خواص خود را نشان داد. نتایج برای درصد تطویل در تجزیه در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. درصد تطویل در تجزیه‌ی ترکیبات کاملاً شبیه PLA خالص برای ترکیبات دارای ۸۰ wt% PBS است و سپس برای ترکیبات ۹۰/۱۰ PLA/PBS و ۱۰۰ wt% PBS خالص افزایش یافت. ممکن است این به ویژگی الاستیک بیشتر ماتریس PBS خالص نسبت داده شود. تطویل در تجزیه‌ی PBS بالاتر از تطویل در تجزیه‌ی PLA است. رفتار مشابهی هم توسط ولی (۲۰۰۵) کشف شد که کو-پلی استر پلی (بوتیلن سوکسینات ادیپیت) (PBSA) و ترکیبات PLA الیاف را مشخص کردند. آنها فهمیدند که هرچه مقادیر قدرت کشسانی زیر خط قاعده‌ی ترکیب بودند، PLA و PBSA کاملاً امتزاج‌پذیر هستند درحالی‌که در مورد PBS ۲۰ wt% در PLA، مقادیر به طور نسبی به خط قاعده‌ی ترکیب نزدیک‌تر هستند. بعد از افزایش فشار نمونه‌های PBS خالص، شکسته/تجزیه شدند. اگرچه در مورد همه‌ی ترکیبات و خالص هیچ پدیده‌ی فشاری وجود نداشت و نمونه‌ها بعد از فشار (شکستن از تدری) به سرعت تجزیه شدند. بنابر این، این ترکیبات در تجزیه‌ی تمام ترکیبات، تقریباً درصد ثابتی از تطویل را نشان می‌دهند. می‌توان از نتایج بالا، نتیجه‌گیری کرد که تا میزان PBS ۲۰ wt% در PLA، سازگاری امکان‌پذیر است و بر اساس نتایج دمانگاشد MDS و تصاویر SEM بیشتر از این میزان، آنها ناسازگار می‌شوند.

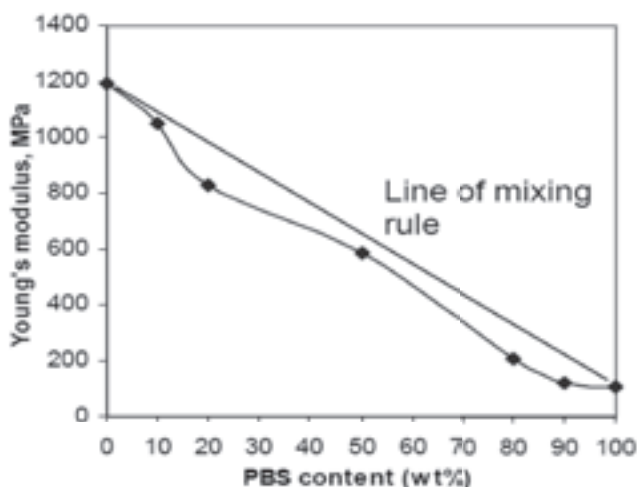
۴. نتیجه‌گیری

ترکیب PLA و PBS مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی ریخت‌شناسی توسط SEM، ثابت کرد که هر دو پلیمر در بیشتر از PBS ۲۰ wt% در PLA ناسازگار هستند. قدرت کشسانی و مدول‌های ترکیبات با اضافه شدن PBS کاهش یافتند اما برای ترکیبات ۹۰/۱۰ و ۸۰/۲۰ (PLA/PBS) تقریباً از قاعده‌ی ترکیب پیروی می‌کردند. به این صورت نتیجه‌گیری شد که درصد تطویل در تجزیه برای تمام ترکیبات، تقریباً ثابت باقی می‌ماند. DSC مدوله شده نشان داد که ترکیبات بیشتر از ۲۰ wt% PBS دو پیک ذوب جداگانه دارند که نشان دهنده‌ی ناسازگاری دو پلیمر است. اگرچه، ترکیبات ۹۰/۱۰ و ۸۰/۲۰ (PLA/PBS) سازگار به نظر می‌رسند. بررسی جریان‌شناسی به این نتیجه رسید که پلیمرهای PBS و PLA خالص، رفتار نیوتنی از خود نشان دادند. در فرکانس‌های پایین، ترکیب ۵۰/۵۰ (PLA/PBS) یک رفتار رقیق‌سازی شدید را نشان دادند، در حالی که سایر ترکیبات رفتاری مشابه رفتار پلیمرهای خالص را نشان دادند. گرانروی برش سیستم ترکیب، یک رفتار رقیق‌سازی برش مشابه پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر را نشان دادند. هر چه میزان PBS از ۵۰ wt% بیشتر می‌شود، گرانروی ترکیب افزایش می‌یافت در حالی که میزان ۱۰ wt% و ۲۰ wt%، از PBS گرانروی‌هایی بین پلیمرهای خالص دارد که نشان می‌دهد میزان PBS کمتر از ۲۰ wt%، ترکیبات امتزاج‌پذیر نیستند و بالاتر از آن میزان ترکیبات امتزاج‌پذیر می‌شوند. همچنین ترکیبات با PBS کمتر از ۲۰ wt%، انحراف مثیتی از قاعده‌ی جمع‌پذیری لگاریتم گرانروی را نشان می‌دهند، بنابر این می‌توان آنها را امتزاج‌پذیر در نظر گرفت. انتظار می‌رود، ترکیبات دارای PBS ۲۰ wt% در PLA، به ضعف‌های پلی لاکتید اسید، مثل شکنندگی، خواص نرمی (موجی)، دمای اعوجاج گرم، و تاثیر استحکام روی کاربردهای بسته‌بندی غذا، و سایر کیسه‌های یکبار مصرف زیست‌تخریب‌پذیر غلبه کند.

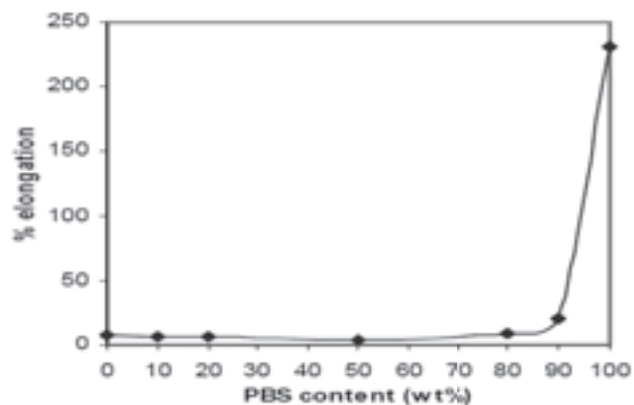
منابع در دفتر مجله موجود است.



شکل ۸: قدرت کشسانی ترکیبات PLA/PBS



شکل ۹: مدول‌های ترکیبات PLA/PBS



شکل ۱۰: درصد تطویل در تجزیه‌ی ترکیبات PLA/PBS

شکل ۸ قدرت کشسانی ترکیبات مختلف را نشان می‌دهد. از این شکل واضح است که قدرت کشسانی تا میزان ۸۰ wt% PBS، کاهش می‌یابد و بعد با PBS بیشتر از ۸۰ wt% به آرامی کاهش می‌یابد. روند مدل‌های کاهشی (نزولی) و قدرت کشسانی به طور بسیار خوبی با یافته‌های مک کارتی و همکارانش (۱۹۹۹)، هماهنگ است. آنها یک کاهش در مدول‌های یانگ و قدرت کشسانی با افزایش میزان PBS در ترکیب را گزارش کرده‌اند که یک مثال از ترکیبات سخت‌گردانی فشار است.