



Research Paper

Employing PLA in combination with bioplasticizer and a compatibilizer represents an effective strategy to produce PVC samples exhibiting improved mechanical properties and biodegradability

Mohammad Jawad Mahdavi¹, Alireza Azizi^{1,*}, Mohsen Mohammadi¹, Reza Aghazadeh¹¹ Department of Polymer Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

ARTICLE INFO

Received 2025-12-07
Accepted 2026-02-07
Available online 2026-05-31
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

PVC/PLA blend

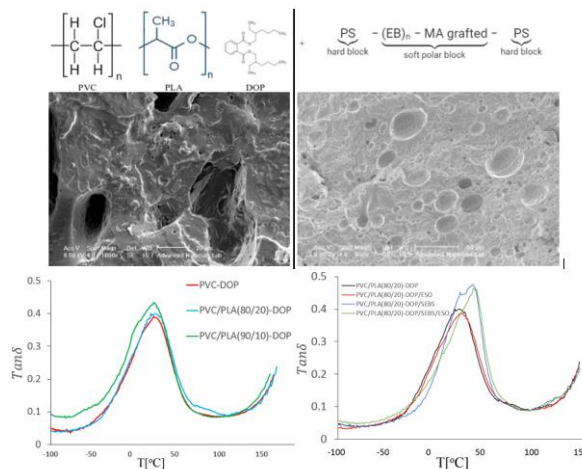
Bioplasticizer

Compatibilizer

Mechanical Properties

Biodegradability

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: Poly (vinyl chloride) (PVC) is non-biodegradable, and the widespread use of conventional plasticizers, particularly phthalates, in its formulation poses significant risks to human health and the environment. In this research, various blends of PVC and poly (lactic acid) (PLA) with different ratios were prepared in an internal mixer. The effect of PLA content, as well as the influence of various plasticizers including dioctyl phthalate (DOP), dioctyl adipate (DOA), epoxidized soybean oil (ESO), and chlorinated paraffin wax, on the mechanical and biodegradability properties was investigated. Furthermore, the role of a compatibilizer in improving the distribution of the PLA phase and increasing the compatibility between the polymers was evaluated.

Research approach: Tensile testing and dynamic mechanical analysis (DMTA) were performed to study the mechanical behavior. Scanning electron microscopy (SEM) imaging was used to examine the morphology and the distribution of the PLA phase. In addition, a biodegradability test was carried out to analyze the degradation behavior of samples in the environment.

Main results: The results indicated that the PVC/PLA(90/10)-DOP blend exhibited a suitable distribution of the PLA phase within the PVC matrix, whereas a poor distribution of PLA in PVC was observed in the PVC/PLA(80/20)-DOP blend. The addition of a compatibilizer to the PVC/PLA(80/20)-DOP sample led to increased uniformity in the PLA phase distribution and improved tensile strength. Samples with higher PLA content showed greater biodegradability behavior, suggesting the role of PLA as a degradability-enhancing agent. The comparison of different plasticizers indicated that several of the ones used in this research exhibit properties comparable to DOP and may be considered as effective substitutes for it. The findings suggest that the simultaneous use of PLA and appropriate plasticizers such as ESO, along with the application of a compatibilizer, is an effective method for producing PVC samples with enhanced mechanical and biodegradability properties.

* Corresponding author: azizi@qut.ac.ir



نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی- پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

استفاده هم‌زمان از پلی (لاکتیک‌اسید)، نرم‌کننده‌های زیستی و سازگارکننده، روشی مؤثر برای تهیه نمونه‌های پلی (وینیل کلرید) با خواص مکانیکی و زیست‌تخریب‌پذیری بهبودیافته

محمد جواد مهدوی^۱، علیرضا عزیزی^{۱*}، محسن محمدی^۱، رضا آقازاده^۱
^۱ دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: پلی (وینیل کلرید) (PVC, poly (vinyl chloride))، غیرزیست‌تخریب‌پذیر است و استفاده از نرم‌کننده‌های متداول در فرمول‌بندی آن به‌ویژه فتالات‌ها نگرانی‌های قابل توجهی از نظر سلامت انسان و آلودگی محیطی ایجاد کرده است. در این پژوهش، ترکیب‌های مختلف PVC و پلی (لاکتیک‌اسید) (PLA, poly (lactic acid)) با نسبت‌های متفاوت در مخلوط‌کن داخلی تهیه شد و اثر میزان پلی (لاکتیک‌اسید) و همچنین تأثیر انواع نرم‌کننده‌ها شامل دی‌اکتیل‌فتالات (DOP, dioctyl phthalate)، دی‌اکتیل‌آدیپات (DOA, dioctyl adipate)، روغن سویای اپوکسید شده (ESO, epoxidized soybean oil) و واکس کلره (Chlorinated paraffin wax) بر خواص مکانیکی و زیست‌تخریب‌پذیری PVC بررسی شد. علاوه بر این، نقش سازگارکننده در بهبود توزیع فاز PLA و افزایش سازگاری بین پلیمرها ارزیابی شد.

روش تحقیق: برای مطالعه رفتار مکانیکی، آزمون کشش (Tensile) و آزمون تحلیل دینامیکی (DMTA, dynamic mechanical thermal analysis) و تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, scanning electron microscopy) برای بررسی مورفولوژی و توزیع PLA انجام شد. همچنین، آزمون زیست‌تخریب‌پذیری برای تحلیل رفتار تخریب نمونه‌ها در محیط انجام شد.

نتایج اصلی: نتایج نشان داد که ترکیب PVC/PLA(90/10)-DOP دارای توزیع مناسب فاز PLA در ماتریس PVC است، درحالی‌که در ترکیب PVC/PLA(80/20)-DOP توزیع نامناسب PLA در PVC مشاهده شد. افزودن سازگارکننده در نمونه PVC/PLA(80/20)-DOP موجب افزایش یکنواختی توزیع فاز PLA و بهبود استحکام کششی شد. نمونه‌های دارای PLA بیشتر، رفتار زیست‌تخریب‌پذیری بهتری نشان دادند که بیانگر نقش PLA به‌عنوان عامل افزایش‌دهنده تجزیه‌پذیری است. مقایسه انواع نرم‌کننده‌ها نشان داد که برخی از نرم‌کننده‌هایی که در این پژوهش استفاده شده است، خواصی مشابه نرم‌کننده DOP دارند و می‌توانند جایگزین مناسبی برای آن باشند. نتایج حاکی از آن است که استفاده هم‌زمان از PLA و نرم‌کننده‌های مناسب مانند ESO و نیز به‌کارگیری سازگارکننده، روشی مؤثر برای تولید نمونه‌های PVC با خواص مکانیکی و زیست‌تخریب‌پذیری بهبودیافته است.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

کلیدواژه‌ها

آلیاژ PVC/PLA

نرم‌کننده زیستی

سازگارکننده

خواص مکانیکی

زیست‌تخریب‌پذیری

* نویسنده مسئول: azizi@qut.ac.ir

۱ مقدمه

افزایش روزافزون مصرف پلاستیک‌های غیرزیست‌تخریب‌پذیر و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تجمع این مواد، ضرورت توسعه پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و آلیاژهای پلیمری سازگار با محیط‌زیست را برجسته کرده است [۱-۳]. یکی از راهکارهای مهم در این زمینه، ترکیب پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر با پلیمرهای پرکاربرد و مقاوم است. تا ضمن کاهش آلودگی، خواص مکانیکی مطلوب نیز حفظ شود [۵-۶].

پلی(وینیل کلرید) (PVC) به دلیل هزینه پایین، خواص مکانیکی و شیمیایی مناسب و کاربردهای گسترده در صنایع مختلف، یکی از پر مصرف‌ترین پلیمرهای سنتزی محسوب می‌شود [۵-۷]. با این حال، این پلیمر غیرزیست‌تخریب‌پذیر بوده و استفاده از نرم‌کننده‌های متداول در فرمول‌بندی آن به‌ویژه فتالات‌ها نگرانی‌های قابل توجهی از نظر سلامت انسان و آلودگی محیطی ایجاد کرده است [۱۵، ۱۶]. پلی (لاکتیک‌اسید) (PLA) پلیمری زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه منابع تجدیدپذیر است که دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوبی بوده، می‌تواند جایگزین مناسبی برای برخی پلیمرهای نفتی باشد [۱، ۸، ۱۱]. با این وجود، شکنندگی بالا و پایداری حرارتی محدود، کاربرد آن را به‌صورت خالص با چالش مواجه ساخته است [۹، ۱۳]. ترکیب PLA با PVC می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی و افزایش زیست‌تخریب‌پذیری باشد [۵، ۱۰، ۱۱].

از سوی دیگر، استفاده از نرم‌کننده‌های زیست‌سازگار و سازگارکننده‌ها می‌تواند نقش کلیدی در بهبود فرایندپذیری، افزایش انعطاف‌پذیری و کنترل مورفولوژی ترکیب‌های (PVC/PLA) ایفا کند [۱۲، ۱۴، ۱۹-۲۱]. فتالات‌ها (Phthalates) پرکاربردترین گروه نرم‌کننده‌ها در PVC محسوب می‌شوند و بیش از ۸۰ درصد کل نرم‌کننده‌های مورد استفاده در صنعت پلاستیک را تشکیل می‌دهند [۴، ۱۵، ۱۶]. این مواد به دلیل قیمت پایین، سازگاری مناسب با PVC، افزایش چشمگیر انعطاف‌پذیری، فرایندپذیری و پایداری حرارتی مطلوب، در طیف گسترده‌ای از کاربردها از جمله بسته‌بندی، کف‌پوش‌ها، شیلنگ‌ها، سیم و کابل، اسباب‌بازی‌ها و تجهیزات پزشکی استفاده می‌شوند [۴، ۱۵]. با این حال، ماهیت غیرکوآلانسی پیوند آن‌ها با زنجیره‌های PVC سبب مهاجرت تدریجی فتالات‌ها به محیط اطراف می‌شود [۴، ۱۶]. این مهاجرت می‌تواند منجر به آلودگی خاک، آب‌وهوا شده و از طریق تماس مستقیم یا غیرمستقیم، وارد بدن انسان شود [۱۷]. مطالعات متعدد ارتباط بین مواجهه با فتالات‌ها و اختلالات هورمونی، مشکلات باروری، تأثیرات منفی بر رشد کودکان و بروز برخی سرطان‌ها را گزارش کرده‌اند [۱۶، ۱۷]. به همین دلیل، استفاده از فتالات‌ها در صنایع حساس مانند بسته‌بندی مواد غذایی، محصولات کودکان و تجهیزات پزشکی در بسیاری از کشورها محدود یا ممنوع شده است [۴، ۱۶]. این محدودیت‌ها، توسعه نرم‌کننده‌های زیست‌سازگار و غیرسمی مانند روغن سویای اپوکسیدشده (ESO) یا نرم‌کننده‌های بر پایه منابع طبیعی را به یک ضرورت تبدیل کرده است [۱۳، ۱۸، ۱۹]. با توجه به این نتایج محققان در تلاش هستند تا نمونه‌هایی تهیه شود که ضمن حفظ خواص مکانیکی، مشکلات زیست‌محیطی مانند آلودگی خاک و آب را به حداقل برسانند.

در این پژوهش، اثر میزان PLA، نوع نرم‌کننده و حضور سازگارکننده بر

خواص مختلف آلیاژ PVC/PLA بررسی شده است. استفاده هم‌زمان از نرم‌کننده‌های مختلف، PLA و سازگارکننده (SEBS-g-MAH, maleic anhydride grafted styrene-ethylene-butylene-styrene) می‌تواند به توسعه‌ی کاربرد PVC کمک کند. به‌دست آوردن فرمول‌بندی کاربردی که ضمن بهبود خواص مکانیکی PVC، بتواند به‌طور چشمگیری زیست‌تخریب‌پذیری آن را افزایش دهد و آلودگی زیست‌محیطی PVC را کاهش دهد، از نوآوری‌های این پژوهش است.

۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد

پلی (وینیل کلرید) (PVC)، پلی(لاکتیک‌اسید) (PLA) و نرم‌کننده‌های دی‌اکتیل فتالات (DOP)، دی‌اکتیل آدیپات (DOA)، روغن سویای اپوکسیدشده (ESO) و واکس کلره (Chlorinated paraffin wax) به‌عنوان افزودنی مورد استفاده قرار گرفتند. برای بهبود سازگاری بین فازهای PVC و PLA، از سازگارکننده (SEBS-g-MAH) با مشخصات Kraton FG1901x Supplied by Shell Chemicals Co. (USA) (29% styrene; nominal weight percent of grafted maleic anhydride: $1.8 \pm 0.4\%$) استفاده شد. مشخصات موادی که در این پژوهش استفاده شده است در جدول ۱ آمده است. فرمول‌بندی پایه با استفاده از اطلاعاتی که از صنایع مرتبط با تولید PVC نرم به‌دست آمده، طراحی شده است.

۲-۲ آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق نمونه‌هایی از آلیاژهای (PVC/PLA) با نسبت‌های (۹۰/۱۰) و (۸۰/۲۰)، در حضور نرم‌کننده و سازگارکننده‌های مختلفی مانند دی‌اکتیل فتالات، دی‌اکتیل آدیپات، روغن سویای اپوکسیدشده، واکس کلره، (SEBS-g-MA) و نمونه‌های خالص از PVC و PLA مطابق جدول ۲، در مخلوط‌کن داخلی با دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۵۰ دور در دقیقه به مدت ۷ دقیقه تهیه شدند. سپس نمونه‌ها ابتدا به مدت ۴ دقیقه در دستگاه پرس گرم تحت دمای ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد و در ادامه به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه پرس سرد قرار داده شدند. در پایان نمونه‌ها برای برش به شکل دمبل آماده شدند.

۲-۳ آزمون‌های انجام شده

۲-۳-۱ آزمون کشش (Tensile Test): آزمون کشش نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D638، با استفاده از دستگاه کشش مدل STM20 ساخت شرکت سنتام اندازه‌گیری شد. سپس مقادیر انرژی شکست، مدول و استحکام کششی از روی منحنی تنش-کرنش به‌دست آمدند.

۲-۳-۲ آزمون تحلیل دینامیکی مکانیکی-حرارتی (DMTA): از آزمون DMTA برای بررسی اثرات مواد مختلف و تشکیل‌دهنده‌ی نمونه‌ها بر روی خواص دینامیکی-مکانیکی نمونه‌ها استفاده شد. آزمون بر روی نمونه‌ها از دمای ۱۰۰- درجه سانتی‌گراد آغاز و تا دمای ۱۴۰ درجه سانتی-گراد تحت بسامد ۱ هرتز انجام شد.

۲-۳-۳ آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM): از آزمون SEM یا میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تصویربرداری از نمونه‌ها و

از مدت‌زمان تقریباً سه ماه از زیر خاک خارج شدند و خاک موجود در سطح آن با آب مقطر شستشو داده شد. در پایان نمونه‌ها در آون خشک شد و میزان کاهش وزن در طول زمان برای ارزیابی میزان زیست‌تخریب‌پذیری در نظر گرفته شد. میزان کاهش وزن با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\text{درصد کاهش وزن} = \frac{W_0 - W_d}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه W_0 وزن نمونه‌ی اولیه، W_d وزن نمونه بعد از تخریب است. روش دیگر برای بررسی زیست‌تخریب‌پذیری نمونه‌ها استفاده از محیط فاضلاب شیر طبق استاندارد ASTM D5271-02 است. نمونه‌ها طی دو ماه در محیط فاضلاب شیر قرار داده شدند و کاهش وزن نمونه‌ها قبل و بعد از قرارگرفتن در فاضلاب شیر بررسی و مقایسه شد.

تعیین ویژگی سطحی و مورفولوژی نمونه‌ها استفاده شد. در این آزمون تصویر مورفولوژی نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی‌های مختلف به دست آمد. قبل از آزمون SEM، نمونه‌ها در نیتروژن مایع شکسته شدند. سطح شکست نمونه‌ها در حلال کلروفرم قرار داده شد و پلی (لاکتیک‌اسید) در حلال کلروفرم حل شد. در ادامه سطح شکست نمونه‌ها، با روکش طلا پوشش داده شد و در انتها تصویربرداری از سطح نمونه‌ها انجام شد.

۲-۳-۴ زیست‌تخریب‌پذیری: برای اندازه‌گیری میزان زیست‌تخریب‌پذیری نمونه‌ها در خاک مطابق با استاندارد ISO 846، ابتدا فیلم‌های تولیدی در آون خشک و سپس وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. در ادامه نمونه‌ها زیر خاک دفن و در طول زمان آزمایش، خاک روی نمونه‌ها با اضافه کردن آب مقطر مرطوب نگه داشته شد. برای اندازه‌گیری میزان تخریب، نمونه‌ها پس

جدول ۱ مواد مورد استفاده در این پژوهش

Table 1 Materials were used in this study

Material Name	Density (g/cc)	Company	Color
S65- Polyvinyl Chloride (PVC)	1.37	Ghadir Petrochemical	White
Polylactic Acid (PLA)	1.25	Belgian Company	White
(DOP) Dioctyl Phthalate	0.985	Ramafidar rad Shimi	Colorless
(DOA) Dioctyl Adipate	0.93	Ramafidar rad Shimi	Colorless
Epoxidized Soybean Oil (ESO)	0.982	Sajou Haio China	Light Yellow
Chlorinated Paraffin Wax	1.3	Ramafidar rad Shimi	Light Yellow
Stearic Acid	0.948	Ramafidar rad Shimi	White
Calcium-Zinc Stabilizer	1.3	Hamyar	White
SEBS-g-MA	0.91	Shell Chemicals	White

جدول ۲ ترکیب درصد نمونه‌های مختلف

Table 2 Various composition of samples

Sample	PVC (Phr)	PLA (Phr)	DOP (Phr)	DOA (Phr)	ESO (Phr)	Wax (Phr)	Stabilizer (Phr)	Stearic acid (Phr)	SEBS-g-MA (Phr)
PVC-DOP	100	0	50	0	0	0	4	0.4	0
PVC/PLA(70/30)-DOP	70	30	35	0	0	0	2.8	0.28	0
PVC/PLA(80/20)-DOP	80	20	40	0	0	0	3.2	0.32	0
PVC/PLA(90/10)-DOP	90	10	45	0	0	0	3.6	0.36	0
PVC/PLA(80/20)-DOP/ESO	80	20	35	0	5	0	3.2	0.32	0
PVC/PLA(80/20)-DOP/Wax	80	20	35	0	0	5	3.2	0.32	0
PVC/PLA(80/20)-DOA	80	20	0	40	0	0	3.2	0.32	0
PVC/PLA(80/20)-DOA/ESO	80	20	0	35	5	0	3.2	0.32	0
PVC/PLA(80/20)-DOP/SEBS-g-MA	80	20	40	0	0	0	3.2	0.32	5
PVC/PLA(80/20)-DOP/ESO/SEBS-g-MA	80	20	35	0	5	0	3.2	0.32	5

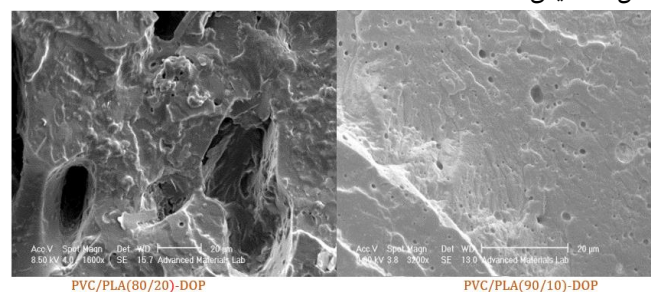
۳ نتایج و بحث

۳-۱ اثر میزان پلی(لاکتیک اسید)

ترکیب PVC با PLA اغلب برای بهبود خواص و ایجاد مواد زیست‌تخریب‌پذیر و دوستدار محیط‌زیست مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۲، ۲۳]. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که فرایند احیای شیمیایی معرفی شده در این پژوهش، نه تنها موجب افزایش استحکام مکانیکی می‌شود، بلکه باعث بهبود پیوستگی ساختاری، یکنواختی شکست، جذب انرژی و عملکرد دینامیکی بهتر الیاف کولار می‌شود. این موضوع بیانگر قابلیت بالای این روش برای بازگرداندن پارچه‌های تاریخ‌گذشته به چرخه تولید و استفاده مجدد در ساختارهای کامپوزیتی است.

۳-۱-۱ نتایج مورفولوژی

برای بررسی مورفولوژی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. تصاویر به دست آمده از نمونه‌های تهیه شده با ترکیب درصدی مختلف در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱ تصاویر SEM نمونه‌ها

Figure 1 SEM micrographs of the samples

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، در نمونه PVC/PLA(90/10)-DOP، نسبت به نمونه PVC/PLA(80/20)-DOP فاز PLA در زمینه PVC بهتر و یکنواخت‌تر پراکنده شده است. در نمونه PVC/PLA(80/20)-DOP، اندازه فاز پراکنده بزرگ‌تر است و همچنین یکنواختی کمتری دارد. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش میزان PLA، به دلیل عدم سازگاری دو فاز، توزیع فاز پراکنده ضعیف‌تر می‌شود [۲۴].

۳-۱-۲ نتایج آزمون کشش

بررسی نتایج آزمون کشش نشان داد که در نمونه PVC/PLA(90/10)-DOP خواص مکانیکی مشابه نمونه فاقد PLA است (جدول ۳). در این نمونه استحکام کششی و کرنش در نقطه‌ی شکست اندکی کاهش یافته است. با افزایش مقدار PLA در نمونه‌های دیگر، استحکام کششی و کرنش در نقطه‌ی شکست به مقدار زیادی کاهش یافته است. با توجه به اینکه PLA امتزاج-پذیری خوبی با PVC ندارد و این مسئله در تصاویر SEM نیز مشهود بوده است، افزایش میزان PLA به طور قابل ملاحظه‌ای سبب کاهش کرنش در نقطه‌ی شکست شده است.

در نمونه PVC/PLA(70/30)-DOP کرنش در نقطه‌ی شکست کاهش بسیار زیادی نشان داد. برای PV کرنش در نقطه شکست عامل بسیار مهمی است؛ بنابراین با توجه به نتایج که از این آزمون به دست آمده است، نمونه PVC/PLA(70/30)-DOP کنار گذاشته شد و مطالعات بیشتری روی این نمونه انجام نشده است.

جدول ۳ اثر میزان PLA بر نتایج آزمون کشش آلیاژهای (PVC/PLA)

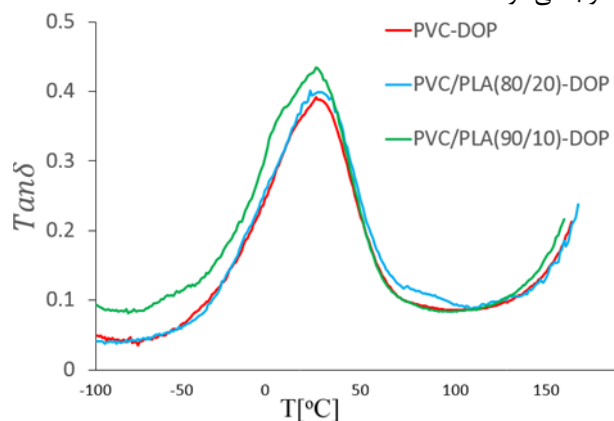
Table 3 Effect of PLA content on the tensile test results of PVC/PLA blends

Sample	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	W(kJ)
PVC/DOP	4.1 ± 0.1	19.8 ± 0.5	366 ± 22	13.7 ± 1
PVC/PLA(70/30)-DOP	5.0 ± 0.1	6.7 ± 0.2	88 ± 32	1997 ± 656
PVC/PLA(80/20)-DOP	4.8 ± 0.5	10.5 ± 0.1	307 ± 45	5715 ± 769
PVC/PLA(90/10)-DOP	4.2 ± 0.9	18.1 ± 1.84	370 ± 44.2	10.1 ± 0.801

۳-۱-۳ نتایج آزمون DMTA

به منظور بررسی اثر پلی (لاکتیک اسید) بر روی دمای انتقال شیشه‌ای (Tg)

نمونه‌ها آزمون DMTA انجام شد. نمودار $Tan\delta$ بر حسب دما برای این نمونه‌ها در شکل ۲ آمده است. دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) هر نمونه از روی دمای متناظر با بیشینه قله $Tan\delta$ در نمودارهای DMTA تعیین شد که روشی متداول برای تعیین دمای انتقال شیشه‌ای در سامانه‌های پلیمری محسوب می‌شود.



شکل ۲ اثر میزان پلی (لاکتیک اسید) بر $Tan\delta$

Figure 2 Effect of poly(lactic acid) (PLA) content on $Tan\delta$

دمای انتقال شیشه‌ای پلی(وینیل کلرید) در حضور دی‌اکتیل فتالات برابر با ۲۲ درجه سانتی‌گراد است؛ دمای انتقال شیشه‌ای نمونه PVC/PLA(80/20)-DOP، برابر با ۲۴ درجه سانتی‌گراد و دمای انتقال شیشه‌ای PVC/PLA(90/10)-DOP، برابر با ۲۲ درجه سانتی‌گراد است. افزودن PLA تأثیری بر دمای انتقال شیشه‌ای نمونه‌ها ندارد و این موضوع نشان می‌دهد که برهم کنشی بین دوفاز وجود ندارد و دو فاز کاملاً ناسازگار هستند. این نتایج با نتایجی که در آزمون کشش به دست آمد همخوانی دارد و تصاویر SEM نیز آن را تأیید می‌کند. دمای انتقال شیشه‌ای پلی (لاکتیک اسید) برابر با ۶۰ درجه سانتی‌گراد است، با توجه به اینکه در این نمونه‌ها مقدار پلی (لاکتیک اسید) کم است قله واضحی در این دما مشاهده نمی‌شود.

۳-۲-۲ نتایج آزمون کشش

نتایج آزمون کشش نمونه‌های PVC/PLA(80/20) در حضور نرم‌کننده‌های مختلف در شکل ۵ و جدول ۴ آمده است. در نمونه‌ی دارای نرم‌کننده‌ی DOA کاهش استحکام کششی و انرژی شکست در مقایسه با نمونه‌ی دارای نرم‌کننده DOP دیده می‌شود. نرم‌کننده‌ی DOA، نرم‌کننده مؤثرتری از DOP است؛ این نرم‌کننده همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، ساختاری خطی دارد و با نفوذ بین زنجیرهای PVC سبب کاهش استحکام کششی و انرژی شکست در مقایسه با نمونه‌ی دارای نرم‌کننده DOP می‌شود. در نمونه‌ای که نرم‌کننده‌ی DOA به همراه نرم‌کننده‌ی ESO مورد استفاده قرار می‌گیرد، خواص مشابه نمونه‌ای است که تنها دارای نرم‌کننده DOP است. در نمونه‌ی PVC/PLA(80/20)-DOA/ESO، نرم‌کننده‌ی ESO نسبت به DOA ضعیف‌تر است و در ترکیب با DOA، اثر نرم‌کنندگی آن را کاهش می‌دهد؛ همان‌طور که در شکل ۴ و جدول ۴ مشاهده می‌شود، در این نمونه استحکام کششی و انرژی شکست در مقایسه با نمونه‌ی دارای نرم‌کننده DOA افزایش می‌یابد. در نمونه‌ی دارای نرم‌کننده‌ی DOP به همراه نرم‌کننده ESO کاهش استحکام کششی و انرژی شکست در مقایسه با نمونه‌ی دارای نرم‌کننده DOP دیده می‌شود. در نمونه‌ی حاوی نرم‌کننده‌ی DOP به همراه نرم‌کننده پارافین واکس کله خواص مشابه نمونه‌ای است که تنها دارای نرم‌کننده DOP است. این نتایج نشان می‌دهد که برخی از نرم‌کننده‌هایی که در این پژوهش استفاده کردیم خواصی مشابه نرم‌کننده DOP دارند و می‌توانند جایگزین مناسبی برای آن باشند. البته بررسی‌های بیشتری در این زمینه نیاز است.

جدول ۴ نتایج آزمون کشش نمونه‌های PVC/PLA(80/20) در حضور

نرم‌کننده‌های مختلف

Table 4 Tensile test results of PVC/PLA(80/20) samples in the presence of different plasticizers

Sample	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	W(J)
PVC/PLA(80/20)-DOP	4.8 ± 0.5	10.5 ± 1	307 ± 45	5715 ± 769
PVC/PLA(80/20)-DOA	4.3 ± 0.1	6.9 ± 0.3	328 ± 2	3834 ± 371
PVC/PLA(80/20)-DOP/ESO	4.5 ± 0.2	8.5 ± 0.3	311 ± 10	4363 ± 284
PVC/PLA(80/20)-DOA/ESO	4.3 ± 0.1	9.6 ± 0.6	372 ± 29	6025 ± 765
PVC/PLA(80/20)-DOP/Wax	4.8 ± 0.2	10.4 ± 0.5	325 ± 13	5764 ± 417

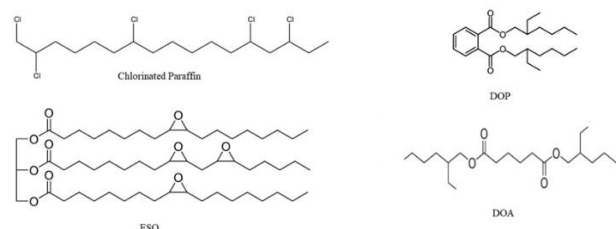
۳-۲-۳ نتایج آزمون DMTA

در شکل ۶ اثر نرم‌کننده‌های مختلف بر نمودار فاکتور اتلاف بر حسب دما دیده می‌شود. دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) نمونه حاوی روغن DOP حدود ۲۲ °C است؛ دمای انتقال شیشه‌ای نمونه‌های حاوی روغن DOP به همراه روغن سویای اپوکسید شده یا واکس کله حدود ۲۳ °C است؛ درحالی‌که

شدت قله اتلاف در نمونه‌ی PVC/PLA(90/10)-DOP بیشتر است. باتوجه‌به اینکه در این نمونه پلی (لاکتیک‌اسید) بهتر و یکنواخت‌تر پراکنده شده است و برهم‌کنشی با پلی (وینیل‌کلرید) ندارد، سطح مشترک وسیعی بین دوفاز وجود دارد که ضعیف است و سبب ایجاد حفره می‌شود. ایجاد این حفره‌ها سبب تمرکز تنش و حرکت بیشتر زنجیرهای پلی (وینیل‌کلرید) می‌شود و در نهایت اتلاف بیشتری را ایجاد می‌کند.

۳-۲-۳ اثر نرم‌کننده‌های مختلف بر آلیاژ PVC و PLA با ترکیب درصد (۸۰/۲۰)

در این بخش، تأثیر انواع نرم‌کننده‌ها بر خواص مکانیکی آلیاژهای PVC/PLA(80/20) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، مقایسه اثر نرم‌کننده‌های مختلف با DOP است. این مقایسه مشخص می‌کند که آیا نرم‌کننده‌های جایگزین قادر به ارائه عملکرد مشابه DOP هستند و می‌توانند جایگزین مناسبی برای آن باشند. در شکل ۳ ساختار شیمیایی نرم‌کننده‌های مختلف آمده است.

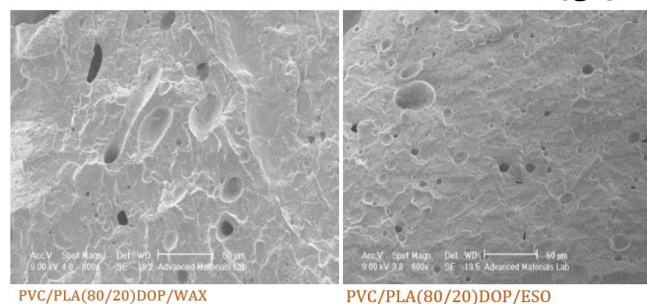


شکل ۳ ساختار شیمیایی نرم‌کننده‌های Chlorinated Paraffin، DOP، ESO و DOA

Figure 3 Chemical structure of Chlorinated Paraffin, DOP, ESO and DOA plasticizers

۳-۲-۳-۱ نتایج مورفولوژی

در شکل ۴ تصاویر SEM نشان می‌دهد که افزودن واکس کله و روغن سویای اپوکسید شده (ESO) در ترکیب PVC/PLA تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود پراکنش فاز PLA، کاهش اندازه ذرات فاز PLA و یکنواخت‌تر شدن ندارد. در مقایسه بین نرم‌کننده‌ها، در نمونه‌های حاوی دی‌اکتیل آدیپات (DOA) توزیع فاز PLA در زمینه‌ی PVC نامناسب و با اندازه ذرات بزرگ‌تری دیده می‌شود. آن‌طور که از تصاویر SEM مشاهده می‌شود، نرم‌کننده‌های مختلفی که در این پژوهش استفاده شده است، تأثیر خاصی بر بهبود سازگاری بین دو فاز ندارد و لزوم استفاده از سازگارکننده در ترکیب ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۴ تصاویر SEM نمونه‌های PVC/PLA (80/20) دارای نرم‌کننده واکس کله و روغن سویای اپوکسید شده

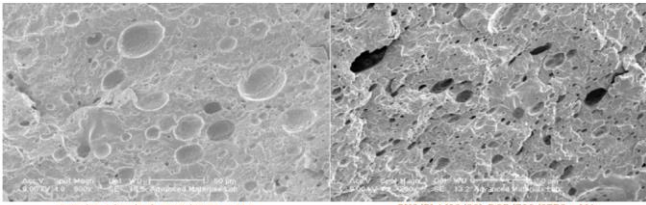
Figure 4 SEM micrographs of PVC/PLA (80/20) samples containing ESO and Chlorinated Paraffin plasticizers

۳-۳ اثر سازگارکننده بر آلیاژهای PLA و PVC با نسبت (۸۰/۲۰)

باتوجه به نتایجی که در قسمت‌های قبل به دست آمد، استفاده از سازگارکننده در ترکیب‌های PVC/PLA ضروری به نظر می‌رسد. در این قسمت اثر سازگارکننده مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۳-۱ نتایج مورفولوژی

در تصاویر SEM به‌وضوح اثر سازگارکننده دیده می‌شود (شکل ۷). با افزودن SEBS-g-MA، در هر دو نمونه حاوی روغن DOP به‌تنهایی و نمونه حاوی روغن DOP به همراه روغن سویای اپوکسیدشده، اندازه فاز متفرق کوچک‌تر شده است، پراکندگی آن یکنواخت‌تر شده است و توزیع بهتری از فاز پراکنده مشاهده می‌شود. متوسط اندازه قطر ذرات پراکنده در نمونه PVC/PLA(80/20)-DOP/ESO/SEBS-g-MA ۵/۱ میکرومتر و در نمونه PVC/PLA(80/20)-DOP/SEBS-g-MA ۶/۲ میکرومتر است. به نظر می‌رسد با افزودن SEBS-g-MA، سازگاری بین دو فاز بیشتر شده است و می‌تواند سازگارکننده‌ی مناسبی برای این ترکیب‌ها باشد [۲۴].



شکل ۷ تصاویر SEM نمونه‌های PVC/PLA(80/20) در حضور سازگارکننده
Figure 7 SEM micrographs of PVC/PLA (80/20) samples in the presence of the compatibilizer

۳-۳-۲ نتایج آزمون کشش

در نمونه‌ی دارای نرم‌کننده‌ی DOP به همراه سازگارکننده SEBS-g-MA افزایش استحکام کششی، انرژی شکست و مدول در مقایسه با نمونه‌ی دارای نرم‌کننده DOP و فاقد سازگارکننده دیده می‌شود (جدول ۵). در نمونه‌ی که نرم‌کننده‌ی DOP به همراه نرم‌کننده‌ی ESO و سازگارکننده مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ افزایش استحکام کششی و مدول در مقایسه با نمونه‌ی دارای نرم‌کننده DOP به همراه نرم‌کننده‌ی ESO و فاقد سازگارکننده مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که سازگارکننده اثر مثبتی بر خواص مکانیکی نمونه‌ها دارد و نتایجی که از تصاویر SEM به‌دست آمده، تأییدی بر آن است که SEBS-g-MA سازگارکننده‌ی مناسبی برای این سامانه است.

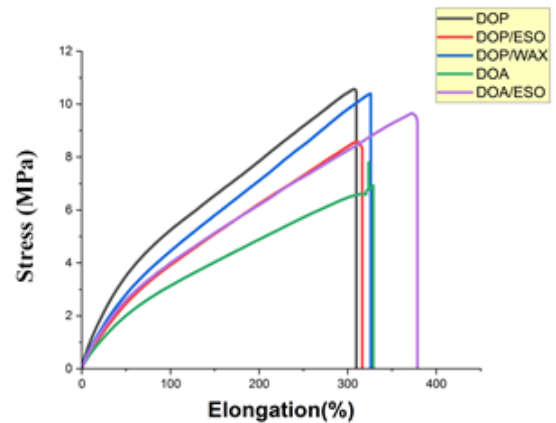
افزایش نرم‌کننده به PVC سبب بهبود انعطاف‌پذیری آن می‌شود. نرم‌کننده بین زنجیرهای PVC قرار می‌گیرد و سبب حرکت آسان‌تر زنجیرها می‌شود. با افزایش نرم‌کننده، انعطاف‌پذیری، انرژی شکست و کرنش شکست افزایش می‌یابد؛ اما استحکام و مدول کاهش می‌یابد. استفاده هم‌زمان از نرم‌کننده، PLA و سازگارکننده علاوه بر اینکه مزایای استفاده از نرم‌کننده را به همراه دارد، کاهش استحکام و مدول را تا حدودی جبران می‌کند.

۳-۳-۳ نتایج آزمون DMTA

در شکل ۸ اثر سازگارکننده بر نمودار عامل اتلاف بر حسب دما دیده می‌شود. دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) نمونه حاوی روغن DOP حدود ۲۲ °C است؛

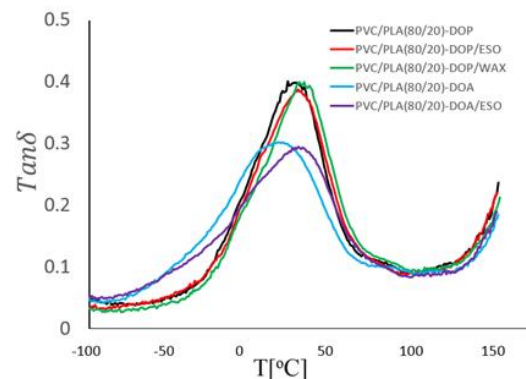
دمای انتقال شیشه‌ای نمونه حاوی روغن DOA به ۹ °C کاهش یافته است. اما دمای انتقال شیشه‌ای نمونه حاوی روغن DOA به همراه روغن سویای اپوکسیدشده حدود ۲۲ °C است. DOA نرم‌کنندگی بیشتری نسبت به DOP دارد و Tg پایین‌تری را نشان می‌دهد. در ناحیه انتقال شیشه‌ای، نمونه‌های حاوی DOA پهنای بیشتری را نشان می‌دهند که دلالت بر یکنواختی کمتر این ترکیب‌ها دارد. در ناحیه بالاتر از دمای (Tg) همه نمونه‌ها رفتار نسبتاً یکسانی نشان می‌دهند و تفاوت قابل‌توجهی مشاهده نشده است.

در نمونه‌ای که نرم‌کننده‌ی DOA به همراه نرم‌کننده‌ی ESO مورد استفاده قرار گرفته است؛ با وجود اینکه دمای انتقال شیشه‌ای بالاتری از نمونه حاوی نرم‌کننده‌ی DOA دارد، کرنش در نقطه شکست بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داده است. این مسئله می‌تواند به این علت باشد که مقدار DOA در نمونه‌ای که فقط حاوی نرم‌کننده DOA است، بیش از مقدار کرنش بیشینه است. با افزایش مقدار نرم‌کننده در یک نمونه ابتدا کرنش شکست افزایش می‌یابد تا به مقدار کرنش بیشینه برسد؛ افزایش بیشتر نرم‌کننده سبب کاهش کرنش شکست می‌شود. استفاده از نرم‌کننده‌ی DOA به همراه نرم‌کننده‌ی ESO، سهم نرم‌کننده‌ی DOA را کاهش داده است و کرنش شکست افزایش یافته است.



شکل ۵ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های PVC/PLA(80/20) در حضور نرم‌کننده‌های مختلف

Figure 5 Tensile Stress-Strain curve of PVC/PLA(80/20) samples in the presence of different plasticizers



شکل ۶ Tan delta برحسب دما برای نمونه‌های PVC/PLA(80/20) در حضور نرم‌کننده‌های مختلف

Figure 6 Tan delta as a function of temperature for PVC/PLA(80/20) samples in the presence of different plasticizers

نتیجه استفاده از PLA می‌تواند به طور چشمگیری زیست‌تخریب‌پذیری نمونه‌ها را افزایش دهد و آلودگی زیست‌محیطی PVC را کاهش دهد. این یافته‌ها با مطالعات پیشین در زمینه زیست‌تخریب‌پذیری PVC/PLA مطابقت دارد [۲۵-۲۷].

جدول ۶ نتایج افت وزن برای بررسی زیست‌تخریب‌پذیری نمونه‌ها در خاک و فاضلاب شیر

Table 6 Weight loss results for assessing the biodegradability of samples in soil and waste milk

Sample	Weight Loss % in Soil	Weight Loss % in Waste milk
PLA	8.48	9.01
PVC/DOP	0.55	0.63
PVC/PLA(80/20)-DOP	3.78	4.62
PVC/PLA(80/20)-DOP/SEBS-g-MA	2.73	3.02

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آلیاژهای PVC و PLA با نسبت‌های وزنی متفاوت در حضور نرم‌کننده‌های دی‌اکتیل فتالات (DOP)، دی‌اکتیل آدیپات (DOA)، روغن سویای اپوکسیدشده (ESO) و پارافین واکس کلره، همچنین سازگارکننده SEBS-g-MA تهیه و مورفولوژی، خواص مکانیکی و زیست‌تخریب‌پذیری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

در آلیاژهای PVC/PLA با افزایش مقدار PLA، استحکام کششی و انرژی شکست به مقدار زیادی کاهش یافته است. با توجه به اینکه PLA امتزاج‌پذیری خوبی با PVC ندارد و این مسئله در تصاویر SEM نیز مشهود است، افزایش میزان PLA به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای سبب افت خواص مکانیکی می‌شود. استفاده از سازگارکننده اثر مثبتی بر خواص مکانیکی نمونه‌ها داشته است و نتایجی که از آزمون DMTA، آزمون کشش و تصویربرداری SEM به‌دست‌آمده است همگی تأییدی بر آن است که SEBS-g-MA سازگارکننده مناسبی برای این سامانه است.

نتایج نشان می‌دهد که برخی از نرم‌کننده‌هایی که در این پژوهش استفاده شده است، خواصی مشابه نرم‌کننده DOP دارند و می‌توانند جایگزین مناسبی برای آن باشند. استفاده از PLA در حضور سازگارکننده ضمن بهبود خواص مکانیکی، می‌تواند به‌طور چشمگیری زیست‌تخریب‌پذیری نمونه‌ها را افزایش دهد و آلودگی زیست‌محیطی PVC را کاهش دهد.

مراجع

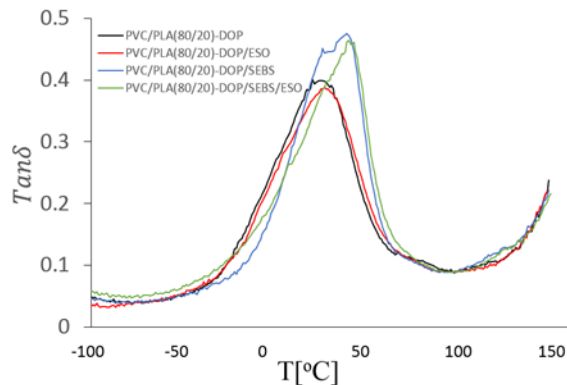
- Lors C., Leleux P., & Park C. H., State of the art on biodegradability of bio-based plastics containing polylactic acid, *Frontiers in Materials*, 11, 1476484, 2025.
- Olonisakin K., Mohanty A. K., Thimmanagari M., & Misra M., Recent advances in biodegradable polymer blends and their biocomposites: A comprehensive review. *Green Chemistry*, 27(38), 11656-11704, 2025.
- Caicho-Caranqui J., Taipe L. A., Mena K. A., Ponce S., Mora J. R., Negrete-Bolagay D., ... & Alexis F., Towards sustainable bioplastifiers from biomass to polymers applications: A review, *Sustainable Materials and Technologies*, 43, e01194, 2025.

دمای انتقال شیشه‌ای نمونه‌های حاوی روغن DOP به همراه روغن سویای اپوکسیدشده حدود ۲۳ °C است؛ درحالی‌که دمای انتقال شیشه‌ای نمونه حاوی نرم‌کننده‌ی DOP به همراه سازگارکننده SEBS-g-MA و نمونه‌ی حاوی روغن DOP به همراه روغن سویای اپوکسید شده و سازگارکننده به حدود ۴۹ °C افزایش یافته است. همچنین در ناحیه انتقال شیشه‌ای، نمونه‌های حاوی سازگارکننده پهنای کمتری را نشان می‌دهند که دلالت بر یکنواختی بیشتر این ترکیب‌ها در حضور سازگارکننده دارد. در ناحیه بالاتر از دمای (Tg) همه نمونه‌ها رفتار نسبتاً یکسانی نشان می‌دهند و تفاوت قابل‌توجهی مشاهده نشده است.

جدول ۵ اثر سازگارکننده بر خواص مکانیکی نمونه‌های PVC/PLA(80/20)

Table 5 Effect of compatibilizer on the mechanical properties of PVC/PLA(80/20) samples

Sample	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	$(\%)\epsilon_{max}$	W(J)
PVC/PLA(80/20)-DOP/SEBS-g-MA	6.1 ± 0.1	12.6 ± 0.2	298.8 ± 11	7535 ± 399
PVC/PLA(80/20)-DOP/ESO/SEBS-g-MA	5.9 ± 0.2	10.3 ± 1	225 ± 23	4436 ± 581



شکل ۸ اثر سازگارکننده بر $Tan\delta$ در ترکیب درصدهای PVC/PLA (80/20)

Figure 8 Effect of compatibilizer on $\tan\delta$ in PVC/PLA (80/20)

۳-۴ آزمون زیست‌تخریب‌پذیری

نتایج آزمون زیست‌تخریب‌پذیری نشان داد که حضور PLA در ترکیب موجب افزایش درصد افت وزن نمونه‌ها شد (جدول ۶). در محیط فاضلاب شیر با وجود اینکه زمان قرارگیری نمونه‌ها یک ماه کمتر از زمان قرارگیری در خاک است تخریب بیشتری صورت گرفته است و افت وزنی نمونه‌ها بیشتر است. افت وزنی PVC در خاک ۰/۵۵ درصد و در فاضلاب شیر ۰/۶۳ درصد است؛ درحالی‌که افت وزنی نمونه‌های حاوی PLA بسیار بیشتر از نمونه‌ای است که PLA در ترکیب آن وجود ندارد. در نتیجه استفاده از PLA افت وزنی نمونه PVC/PLA(80/20)-DOP/SEBS-g-MA حدود ۵ برابر و افت وزنی نمونه PVC/PLA(80/20)-DOP حدود ۷ برابر شده است.

19. Turco R., Mallardo S., Zannini D., Moeini A., Di Serio M., Tesser R., ... & Santagata G. Dual role of epoxidized soybean oil (ESO) as plasticizer and chain extender for biodegradable polybutylene succinate (PBS) formulations. *Giant*, 20, 100328. 2024
20. Tee Y. B., Talib R. A., Abdan K., Chin N. L., Basha R. K., & Yunos K. F. M., Comparative study of chemical, mechanical, thermal, and barrier properties of poly (lactic acid) plasticized with epoxidized soybean oil and epoxidized palm oil. *BioResources*, 11(1), 1518-1540, 2016.
21. Najera-Losada L., Narváez-Rincón P. C., Orjuela A., Gomez-Caturla J., Fenollar O., & Balart R., Plasticization of polylactide using biobased epoxidized isobutyl esters derived from waste soybean oil deodorizer distillate. *Journal of Polymers and the Environment*, 33(1), 125-144, 2025.
22. Singh S. K., Chowdhury A., Thakur R. R., Mangaraj S., Sami R., Aljahani A. H., ... & Helal M., Development and characterization of polyvinyl chloride/poly lactic acid blend based biodegradable polymeric films, *Materials Express*, 13(4), 632-643, 2023.
23. Hachemi R., Belhaneche-Bensemra N., & Massardier V., Elaboration and characterization of bioblends based on PVC/PLA, *Journal of Applied Polymer Science*, 131(7) 2014.
24. Khamisinasab M., Azizi A., Najafi M., Aghazadeh R., & Bagherian M. H., Investigation of mechanical properties of compatibilized polyvinyl chloride/polylactic acid nanocomposites, *Materialwiss. Werkstofftech.*, 55:1-8, 2024.
4. Dziendziol P., Waśkiewicz S., & Jaszcz K., New biobased plasticizers for PVC derived from saturated dimerized fatty acids. *Materials*, 18(9), 2155, 2025.
5. Zamani M., Fasihi M., & Rasouli S., Enhancing the flexibility and thermal properties of polylactic acid/thermoplastic starch blends through selective plasticization, *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 10, 100780, 2025.
6. Minale Y. F., Gajdoš I., Štefák P., Dulebová E., Jachowicz T., Szabó T., ... & Marossy K., Thermodynamic and technological compatibility of polyvinyl chloride, thermoplastic polyurethane, and bio-plasticizer blends. *Polymers*, 17(9), 1149, 2025.
7. Lyu Y., Pang J., Gao Z., Zhang Q., & Shi X., Characterization of the compatibility of PVC/PLA blends by Aid of Rheological Responses, *Polymer*, 176, 20-29, 2019.
8. Sun S., Weng Y., & Zhang C., Recent advancements in bio-based plasticizers for polylactic acid (PLA): A review. *Polymer Testing*, 140, 108603, 2024.
9. Andrzejewski J., Das S., Lipik V., Mohanty A. K., Misra M., You X., ... & Chang B. P., The development of poly (lactic acid) (PLA)-based blends and modification strategies: methods of improving key properties towards technical applications. *Materials*, 17(18), 4556, 2024.
10. Costa A. R. D. M., Luna C. B. B., do Nascimento E. P., Ferreira E. D. S. B., Costa C. D. M., de Almeida Y. M. B., & Araújo E. M., Tailoring PLA/ABS blends compatibilized with SEBS-g-MA through annealing heat treatment. *Polymers*, 15(16), 3434, 2023.
11. Astaneh R. P., & Jahani Y., The effect of poly (methyl methacrylate) on the interfacial interactions and mechanical properties of plasticized poly (vinyl chloride)/poly (lactic acid) blends. *Polymer Engineering & Science*, 65(10), 5459-5468, 2025.
12. Janesch J., Solt-Rindler A., Dumschat L., Vay O., Mija A., Gindl-Altmatter W., ... & Hansmann C., Flexible biobased thermosets from epoxidized plant oils: A study of aliphatic cross-linking agents, *ACS Applied Polymer Materials*, 7(6), 3686-3697, 2025.
13. Luna CBB, da Silva FS, do Nascimento EP et al. Flexible and transparent bio-based composites of poly (lactic acid) and microfibrillated cellulose (MC): Mechanical, thermal, optical, thermomechanical properties and morphological evolution. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 08927057251397387, 2025.
14. Dağdelen A. F., Demirel F. T. K. & Sarıcaoğlu F. T., Preventing of migration in food contact polyvinyl chloride-based stretch films with polylactic acid layer, *Gıda*, 49(4), 624-640, 2024.
15. Bee S. T., Mok W. R., Lee T. S., Tee T. T., Issabayeva G., & Rahmat A. R., Evaluation performance of multiple plasticizer systems on the physicomechanical, crystallinity and thermogravimetry of polyvinyl chloride, *Journal of Polymer Engineering*, 34(6), 521-529, 2014.
16. Raksakri L., Chaiwutthinan P., Larpkasemsuk A., Chuayjuljit S., & Boonmahitthisud A, Properties of wood-plastic composites based on PVC/PLA/PBAT ternary blend, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 30(2), 124-135, 2020.
17. Singh S. K., Chowdhury A., Thakur R. R., Mangaraj S., Sami R., Aljahani A. H., ... & Helal M., Development and characterization of polyvinyl chloride/poly lactic acid blend based biodegradable polymeric films, *Materials Express*, 13(4), 632-643, 2023.
18. Liu M., Wang J., Yan Q., Lyu J., Lei Y., Lyu S., & Yan L. Green bio-derived epoxidized linseed-oil plasticizer improves the toughness, strength, and dimensional stability of furfuryl alcohol-modified wood. *Industrial Crops and Products*, 217, 118886, 2024.