

Polymerization
Quarterly, 2023
Volume 13, Number 3
Pages 14-25
ISSN: 2252-0449

A Review of Characteristics and Applications of Ethyl Cellulose

Ehsan Alikhani*, Salar Haghjoo, and Ali Khalili Gasht-Roudkhani

Polymer Engineering Department, Qom University of Technology, P.O. Box 37195-1519,
Qom, Iran

Received: 3 April 2022, Accepted: 23 July 2022

Abstract

Cellulose is the main constituent of most plants. The renewability of this material has made it a natural raw material which is abundantly available and there is no need to worry about running out of its resources. However, the industrial application of cellulose as a thermoplastic polymer is associated with some problems and difficulties. Due to the presence of strong hydrogen bonds between its chains, cellulose is destroyed before melting. In order to eliminate such difficulties, researchers have developed celluloses derivatives. Ethyl cellulose is one of the most widely used polymers derived from cellulose. Today, cellulose derivative polymers, such as ethyl cellulose in particular, are widely used in numerous industries like ceramic manufacturing, cosmetics, pharmaceuticals, tobacco, paint, paper, food, textile, various molding parts and printing ink. Renewability, biocompatibility, and in some cases the biodegradability of this polymer along with its high tensile strength and appropriate toughness, make this polymer play a prominent role in polymer science and technology in the future. In this article, along with the introduction of ethyl cellulose, its various properties and characteristics, the different applications of this polymer's mixtures have also been reviewed.

Key Words

cellulose,
ethylcellulose,
biocompatibility,
biodegradability,
renewability

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ehsanalikhani120@gmail.com

مروری بر ویژگی‌ها و کاربردهای اتیل سلولوز

احسان عالی‌خانی*، سالار حقجو، علی خلیلی گشت‌رودخانی

قم، دانشگاه صنعتی قم، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۳۷۱۹۵-۱۵۱۹

دریافت: ۱۴۰۱/۱/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۱

سلولوز، ترکیب اصلی تشکیل‌دهنده بیشتر گیاهان است. تجدیدپذیری این ماده موجب تبدیل سلولوز به ماده خام طبیعی شده که به فراوانی در دسترس است و بابت اتمام منابع آن نگرانی وجود نداشته باشد. با این حال، استفاده صنعتی از سلولوز به عنوان پلیمر گرمانرم با مشکلات و دشواری‌هایی همراه است. سلولوز به دلیل وجود پیوندهای هیدروژنی بسیار مستحکم میان زنجیرهای آن، پیش از ذوب تخریب می‌شود. پژوهشگران برای رفع چنین مسائلی با انجام انواع اصلاحات شیمیایی روی سلولوز، پلیمرهای مشتق از آن را توسعه داده‌اند. اتیل سلولوز از پرکاربردترین پلیمرهای مشتق از سلولوز است. امروزه این پلیمرها، به‌ویژه اتیل سلولوز به‌طور گسترده در صنایع سرامیک، لوازم آرایشی و بهداشتی، داروسازی، دخانیات، رنگ، کاغذ، غذا، پارچه، انواع قطعات قالب‌گیری شده و جوهر چاپ استفاده می‌شوند. تجدیدپذیری، زیست‌سازگاری و در مواردی زیست‌تخریب‌پذیری اتیل سلولوز در کنار استحکام کششی زیاد و چقرمگی مناسب آن، موجب می‌شوند تا این پلیمر در آینده نقش پررنگ‌تری در دانش و فناوری پلیمر داشته باشد. در این مقاله، ضمن معرفی اتیل سلولوز، خواص و ویژگی‌های گوناگون آن، کاربردهای مختلف آمیخته‌های این پلیمر نیز مرور شده است.

چکیده



احسان عالی‌خانی



سالار حقجو



علی خلیلی گشت‌رودخانی

واژگان کلیدی

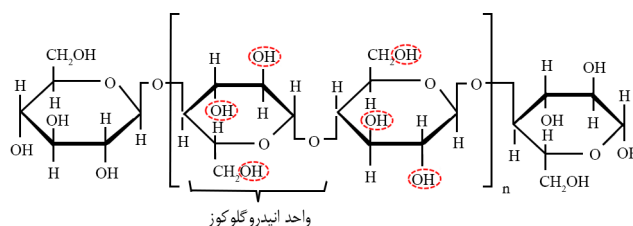
سلولوز،
اتیل سلولوز،
زیست‌سازگاری،
زیست‌تخریب‌پذیری،
تجدیدپذیری

مقدمه

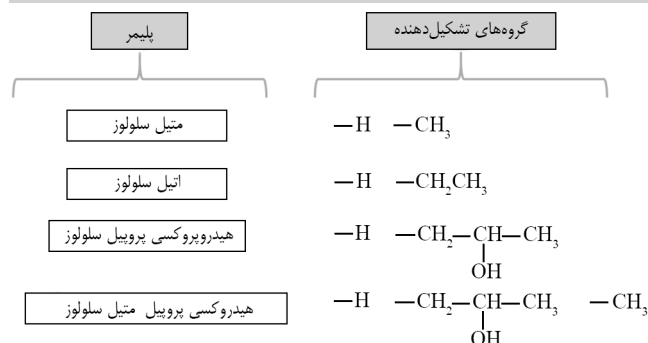
سلولوز یکی از مهم‌ترین پلیمرهای طبیعی و جزء اصلی تشکیل‌دهنده گیاهان است. بیشتر گیاهان دارای مواد سلولوزی هستند، به‌طوری که سلولوز بخش زیادی از دیواره‌های سلولی آن‌ها را تشکیل می‌دهد. اما مهم‌ترین منابع تأمین سلولوز، چوب و ریزه پنبه (linter) است. ۴۰٪ تا ۶۰٪ از چوب خشک و بیش از ۹۰٪ پنبه خام از سلولوز تشکیل شده است [۱]. پلیمر طبیعی سلولوز پیش از ذوب، تخریب می‌شود. بنابراین برای فراوری آن مانند یک پلیمر گرمانرم باید سلولوز را به‌طور شیمیایی اصلاح کرد [۲]. زنجیر اصلی سلولوز اصلاح‌نشده متشکل از واحدهای تکرارشونده بتانیدروگلوکوز یا به‌اختصار واحدهای انیدروگلوکوز است. هر واحد تکرارشونده دارای سه گروه هیدروکسیل با قابلیت جایگزینی با سایر گروه‌هاست. هنگام اصلاح شیمیایی، بسته به گروه‌هایی که جای هیدروکسیل را می‌گیرند، پلیمرهای متفاوتی به‌دست می‌آیند [۳]. شکل ۱، ساختار مولکولی زنجیرهای سلولوز را نشان می‌دهد. پلیمرهای مشتق از سلولوز فراوان‌ترین پلیمرهای طبیعی در جهان هستند [۲]. این گروه از پلیمرها می‌توانند از اتری شدن، استری شدن، شبکه‌ای شدن و نیز کوپلیمر شدن سلولوز ساخته شوند [۵]. از اتری شدن سلولوز، خانواده پرکاربردی از مشتقات سلولوز با نام پلیمرهای سلولوز اتر به‌دست می‌آیند. این خانواده، گستره بزرگی از محصولات از گرمانرم‌های محلول در حلال‌های آلی تا افزودنی‌های محلول در آب را شامل می‌شوند. در سال‌های گذشته، این دسته از پلیمرها اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند. افزایش قیمت پلیمرهای مشتق از منابع نفتی و شیمیایی، آلودگی‌های زیست‌محیطی حاصل از ساخت و استفاده از آن‌ها و نیز رو به پایان بودن این منابع از جمله مهم‌ترین دلایل افزایش اهمیت پلیمرهای زیست‌پایه مانند مشتقات سلولوز هستند [۳].

برخی از مهم‌ترین مشتقات سلولوز

در پلیمرهای مشتق از سلولوز، بسته به نوع گروه‌های جایگزین



شکل ۱- ساختار مولکولی سلولوز، گروه‌های هیدروکسیل خط چین مشخص شده‌اند [۴].



شکل ۲- گروه‌های متصل به زنجیر اصلی برخی از مهم‌ترین پلیمرهای مشتق از سلولوز [۳].

گروه‌های هیدروکسیل موجود در واحدهای تکرارشونده سلولوز، خواص، کاربرد و نام پلیمر تغییر می‌کند. بر این اساس، می‌توان تعداد زیادی ساختار پلیمری به‌دست آورد. متیل سلولوز، هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز، هیدروکسی پروپیل اتیل سلولوز (EC)، سلولوز استات فتالات و هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز فتالات از جمله مهم‌ترین پلیمرهای مشتق از سلولوز هستند. شکل ۲، گروه‌های جانشین شده به‌جای گروه هیدروکسیل در سنتز برخی از پلیمرهای مشتق از سلولوز را نشان می‌دهد [۳]. امروزه مشتقات اتری سلولوز، به‌ویژه اتیل سلولوز به‌طور گسترده در صنایع ساخت سرامیک، لوازم آرایشی و بهداشتی، داروسازی، دخانیات، رنگ، کاغذ، غذا، پارچه و جوهر چاپ استفاده می‌شوند. حتی در پلیمر شدن پلیمرهایی مانند پلی‌وینیل کلرید (PVC) و پلی‌وینیل استات (PVA) نیز کاربرد دارند [۶].

اتیل سلولوز

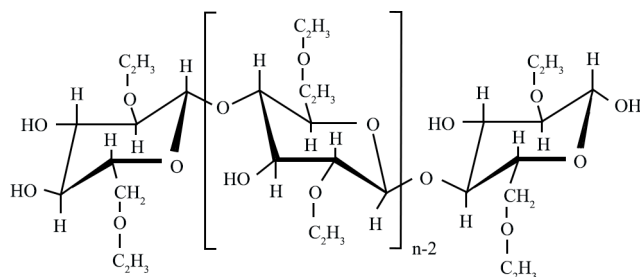
اتیل سلولوز در کنار متیل سلولوز مهم‌ترین و کاربردی‌ترین اتر سلولوزها هستند. تقریباً تمام انواع گرگ پنبه و خمیر چوب می‌توانند برای تولید اتیل سلولوز به‌کاربرده شوند. مراحل تولید بدین صورت است که در گام نخست، سلولوز به‌کمک سدیم هیدروکسید (NaOH) اصلاح می‌شود تا سلولوز قلیایی تشکیل شود. سلولوز قلیایی نسبت به سلولوز معمولی ساختار گسترده‌تر و بازتری دارد، به‌طوری که گروه‌های هیدروکسیل برای جایگزینی با سایر گروه‌ها دسترس‌پذیرتر می‌شوند. همچنین، سدیم هیدروکسید موجب فعال شدن سلولوز و آماده شدن آن برای ادامه فرایند نیز می‌شود [۳، ۴]. شکل ۳، تغییرات زنجیرهای سلولوز پس از قلیایی شدن به‌کمک سدیم هیدروکسید را نشان می‌دهد. سپس، سلولوز قلیایی درون واکنشگاه با دیواره نیکل اندود در دمای ۹۰ °C تا ۱۵۰ °C، فشار ۸۰۰ kPa تا ۱۰۰۰ kPa به‌مدت ۶ h تا ۱۲ h

- اتیل سلولوز با درجه جانشینی ۱/۵ تا ۱/۰ در آب محلول است.
- اتیل سلولوز دارای درجه جانشینی ۲/۵ تا ۲/۴ در حلال‌های آلی قطبی و غیرقطبی محلول است.
- اتیل سلولوز با درجه جانشینی بیش از ۲/۵ در حلال‌های آلی قطبی مانند اتیل الکل محلول نیست، اما در حلال‌های آلی غیرقطبی مانند تولوئن محلول است [۹].

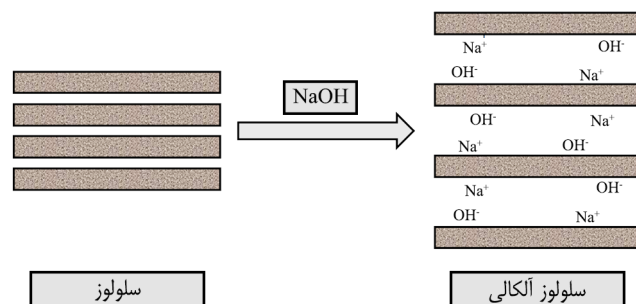
از سوی دیگر، براساس درصد وزنی گروه‌های اتوکسیل، اتیل سلولوز به سه دسته K، N و T گروه‌بندی می‌شوند. این سه دسته به ترتیب دارای ۴۷/۹-۴۴، ۴۹/۵-۴۸ و ۵۱/۰-۴۹/۶ گروه‌های اتوکسیل هستند [۸]. اتیل سلولوز در گستره بزرگی از دما و رطوبت، ویژگی‌های مکانیکی مناسبی دارد. ویژگی‌های عایق الکتریکی آن برای بسیاری از منظورها، به‌ویژه در مواردی رضایت‌بخش بوده که قابلیت آن در حفظ انعطاف‌پذیری زیاد در دماهای کم سودمند است. در کاربردهایی مانند لایه‌گذاری در دماهای بسیار کم، بیشتر پلیمرها شکننده هستند، اما اتیل سلولوز انعطاف‌پذیری مورد نیاز برای استفاده مطمئن را حفظ می‌کند. از مهم‌ترین موارد کاربرد اتیل سلولوز، مصرف آن با سایر رزین‌ها در تهیه لاک‌ها، روغن جلاها و چسب‌ها برای بهبود چقرمگی و انعطاف‌پذیری است. ساخت انواع قطعات قالب‌گیری‌شده، پوشش‌های پارچه، ماده عایق و لوله اکستروژنه‌شده از دیگر موارد کاربرد اتیل سلولوز هستند [۱۰].

ساختار اتیل سلولوز

آزمون‌های طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR) و پراش پرتو ایکس (XRD) ابزارهای مفیدی برای شناسایی پلیمرها و درک ساختار مولکولی آن‌ها هستند. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نمودارهای FTIR و XRD پودر اتیل سلولوز در حالت خالص را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود، پیک لرزشی کششی O-H در 3485 cm^{-1} ، پیک لرزشی کششی C-H در 2978 cm^{-1} و 2926 cm^{-1} ، پیک لرزشی کششی C-O-C در 1047 cm^{-1} و پیک لرزشی خمشی C-H در 1388 cm^{-1} [۷] و سه پیک تیز مربوط به گروه C_2H_5 در 1380 ، 1450 و 2970 cm^{-1}



شکل ۵- ساختار مولکولی زنجیرهای اتیل سلولوز [۸].



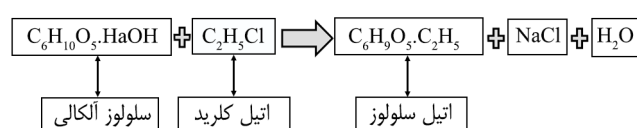
شکل ۳- تغییرات ایجادشده پس از واکنش سدیم هیدروکسید با سلولوز [۴].

با اتیل کلرید مخلوط می‌شود. بنزن یا تولوئن را می‌توان به‌عنوان رقیق‌کننده استفاده کرد. در پایان واکنش، اتیل سلولوز، آب و سدیم کلرید به دست می‌آیند که در نهایت اتیل سلولوز از آن‌ها جداسازی شده و به بازار عرضه می‌شود [۳،۷].

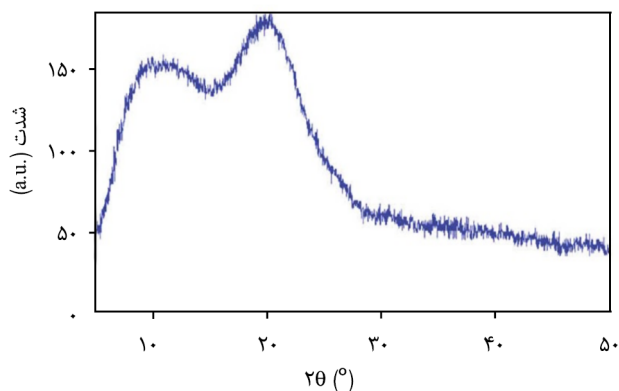
شکل ۴، واکنش تهیه اتیل سلولوز از سلولوز قلیایی را نشان می‌دهد. باید توجه داشت، در اتیل سلولوز پس از انجام اصلاح شیمیایی، گروه‌های اتیل به اتم اکسیژن متصل می‌شوند. روی زنجیر اتیل سلولوز، گروه‌های اتوکسیل (OC_2H_5) به جای گروه‌های هیدوکسیل قرار می‌گیرند (شکل ۵). در سنتز پلیمرهای مشتق از سلولوز، اصطلاح درجه جانشینی (DS) به کار می‌رود. این پارامتر به طور ساده تعیین می‌کند، چه تعداد از گروه‌های هیدروکسیل موجود در سلولوز با گروه‌های دیگر جایگزین شده‌اند. برای نمونه، اگر هر سه گروه هیدروکسیل تمام زنجیرها با گروه‌های دیگر جایگزین شده باشند، درجه جانشینی پلیمر ۳ است. باید توجه داشت، این پارامتر به طور متوسط در تمام زنجیرها گزارش می‌شود. درجه جانشینی برای گونه‌های پرکاربرد اتیل سلولوز معمولاً عددی میان ۲/۲ تا ۲/۶ است. بسته به درجه جانشینی خواص اتیل سلولوز، سنتزی متفاوت می‌شود [۳].

برای نمونه، اثر درجه جانشینی اتیل سلولوز بر انحلال‌پذیری آن در حلال‌های مختلف به شرح زیر است:

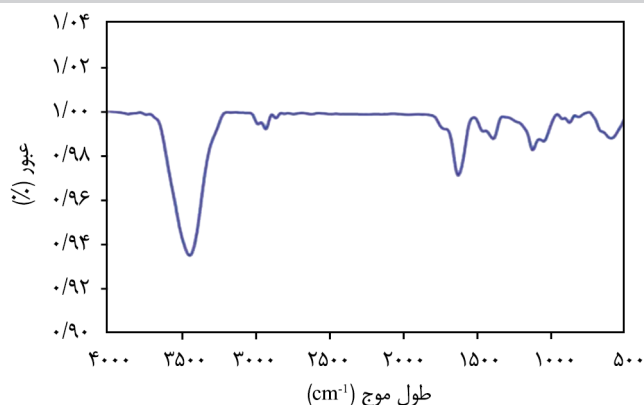
- اتیل سلولوز دارای درجه جانشینی ۰/۵ تا ۱/۰ در حلال‌های آبی قلیایی محلول است.



شکل ۴- واکنش سنتز اتیل سلولوز از سلولوز قلیایی.



شکل ۷- نمودار طیف XRD اتیل سلولوز [۷].



شکل ۶- نمودار طیف‌سنجی زیرقرمز اتیل سلولوز [۷].

لازم است که از مقادیر معینی پایدارکننده بهره گرفت. اکتیل فنول و هیدروکسی فنول بوتیل‌دار شده به‌عنوان ضد اکسندده‌های مؤثر و ۴،۲-دی‌هیدروکسی بنزوفنون با نام تجاری Uvinul 400 به‌عنوان پایدارکننده مؤثر نوری برای اتیل سلولوز به‌شمار می‌آیند. ترکیب ۱٪ تا ۲٪ ضد اکسندده با ۰/۵٪ تا ۱٪ پایدارکننده نوری، پایداری اتیل سلولوز را در حین فراورش و عمر کاری فراهم می‌کند. در ادامه، ویژگی‌های گرمایی و مکانیکی اتیل سلولوز به‌طور کوتاه بررسی می‌شود [۳].

ویژگی‌های گرمایی اتیل سلولوز

رسانندگی گرمایی و ظرفیت گرمایی اتیل سلولوز به‌ترتیب برابر با ۰/۲۱ W/m.K و ۰/۳۱ kJ/K.mol تا ۰/۷۱ kJ/K.mol گزارش شده‌اند [۱۶]. دمای انتقال شیشه‌ای آن در منابع مختلف $^{\circ}\text{C}$ ۱۲۰ تا $^{\circ}\text{C}$ ۱۲۴ [۱۶]، $^{\circ}\text{C}$ ۱۴۰ تا $^{\circ}\text{C}$ ۱۵۰ [۷] و $^{\circ}\text{C}$ ۱۳۰ تا $^{\circ}\text{C}$ ۱۵۰ [۱۷] گزارش شده است. دمای ذوب آن نیز $^{\circ}\text{C}$ ۲۴۰ تا $^{\circ}\text{C}$ ۲۵۵ [۸]، $^{\circ}\text{C}$ ۱۳۱ [۱۸] و در منبع دیگری $^{\circ}\text{C}$ ۲۳۰ [۷] گزارش شده است. اتیل سلولوز در دماهای بیش از $^{\circ}\text{C}$ ۲۰۰ دچار تخریب گرمایی می‌شود. مگر اینکه در فرمول‌بندی آن از پایدارکننده‌های مناسب استفاده شده باشد [۷]. همچنین، دمای اشتعال این پلیمر در بازه دمایی $^{\circ}\text{C}$ ۳۳۰ تا $^{\circ}\text{C}$ ۳۶۰ واقع شده است [۸]. باید توجه داشت، وزن مولکولی اتیل سلولوز و نیز درجه جانشینی آن اثر مستقیمی بر دمای انتقال شیشه‌ای و ذوب آن دارد. بنابراین، متفاوت بودن دماهای انتقال شیشه‌ای و ذوب اتیل سلولوز در منابع مختلف بدین مسئله بازمی‌گردد که اتیل سلولوز استفاده‌شده در این منابع متفاوت بوده است. افزون بر این، بود یا نبود نرم‌کننده، نوع و مقدار آن نیز بر دماهای انتقال گرمایی این پلیمر اثرگذارند. جدول ۲ دمای انتقال شیشه‌ای اتیل سلولوز با ۲۰٪ از نرم‌کننده‌های گوناگون را نشان

[۱۱] در طیف ظاهر شده‌اند.

نمودار XRD اتیل سلولوز نیز دو پیک پهن در $^{\circ}$ ۱۹/۲۵ و $^{\circ}$ ۷/۹۹ را نشان می‌دهد که نمایانگر ساختار بی‌شکل اتیل سلولوز با نواحی کوچک بلوری در آن هستند [۷]. شکل ۷، ساختار مولکولی اتیل سلولوز را نشان می‌دهد.

خواص اتیل سلولوز

اتیل سلولوز پودری بی‌بو و بی‌مزه با رنگ سپید یا خاکستری روشن است. چگالی آن ۱/۰۷ g/mL تا ۱/۱۸ g/mL است [۹،۱۰]. این پلیمر، زیست‌سازگار، غیرسمی و غیرمحرک است [۸]، اما درباره زیست‌تخریب‌پذیری آن اختلاف نظر وجود دارد. تعدادی از منابع، اتیل سلولوز را پلیمری زیست‌تخریب‌پذیر به‌شمار آورده‌اند [۱۲-۱۴]، اما Murtaza [۸] در معرفی اتیل سلولوز، آن را زیست‌تخریب‌پذیر ندانسته است. شاید اختلاف نظر بر سر زیست‌تخریب‌پذیری یا زیست‌تخریب‌ناپذیری اتیل سلولوز را بتوان به تفاوت درجه جانشینی و نیز درجه پلیمرشدن در گونه‌های اتیل سلولوز بررسی‌شده در این منابع دانست. این پلیمر با بیشتر نرم‌کننده‌ها و سایر پلیمرهای برپایه سلولوز سازگار است. گونه‌های پرکاربرد اتیل سلولوز در آب نامحلول بوده، اما در تعدادی از حلال‌های آلی مانند کتون‌ها، استرها، الکل‌ها و اترها محلول هستند. جدول ۱، انحلال‌پذیری اتیل سلولوز در حلال‌های مختلف را نشان می‌دهد. این پلیمر جذب آب نسبتاً اندکی نیز دارد و آب جذب شده نیز به سادگی با گرما تبخیر می‌شود [۸]. اتیل سلولوز در برابر اسیدها ضعیف است. بنابراین، باید به فرمول‌بندی‌های اتیل سلولوز (شامل اتیل سلولوز، نرم‌کننده‌ها و پایدارکننده‌ها) مواد پذیرنده اسید مانند انواع اپوکسی‌ها را اضافه کرد. همچنین، برای بهبود پایداری اتیل سلولوز در برابر عوامل تخریب مانند تابش فرابنفش و دماهای زیاد،

جدول ۱- انحلال پذیری اتیل سلولوز در حلال های مختلف [۹،۱۵].

حلال	حالت	حلال	حالت
سیکلو هگزیل استات	PS	سیکلو هگزانون	S
گلیکول دی استات	PS	متیل سیکلو هگزانون	S
اتیل اتر	S	کامفور-اتیل الکل	S
اتیلن گلیکول مونومتیل اتر	S	اتیل اتر-اتیل الکل	S
اتیلن گلیکول مونواتیل اتر	S	تولون-اتیل الکل	S*
دی اکسان	S	زایلن-اتیل الکل	S*
بنزن	S	بنزن-اتیل الکل	S*
تولون	S	دی اتیلن گلیکول مونواتیل اتر	SW
متیل الکل	S	زایلن	S
اتیل الکل	S	پترولیوم نفتای هیدروژن دار شده	PS
بوتیل الکل	S	سیکلو هگزان	S*
بنزین الکل	S*	تترا هیدرو نفتالن	PS
دی استون الکل	SW	ترپانتین	SW
سیکلو هگزانون	PS	هگزان	I
اتیل استات	S	متیلن کلرید	S*
بوتیل استات	S	کربن تتراکلرید	S*
بنزین استات	S	اتیلن دی کلرید	S*
اتیل لاکتات	S	اتیل فرمات	S
بوتیل لاکتات	S	-	-

S* محلول بسیار شفاف، S محلول کمی مات، PS نیمه محلول، SW متورم و I نامحلول است.

می دهد. همچنین گفتنی است، روش اندازه گیری دماهای مربوط نیز بر دمای گزارش شده اثر دارد.

Carracedo و همکاران [۱۸] در پژوهشی، مقادیر دمای انتقال شیشه ای مشتقات اتری سلولوز را به کمک آزمون های گرماسنجی

جدول ۲- دمای انتقال شیشه ای اتیل سلولوز با وجود ۲۰٪ از نرم کننده های مختلف [۳].

نرم کننده	دمای انتقال شیشه ای (°C)
بدون نرم کننده	۱۳۵
دی متیل فتالات	۹۶
دی اتیل فتالات	۸۴
دی بوتیل فتالات	۱۰۵

تفاضلی پوششی (DSC) و رئومتر نوسانی اندازه گیری کردند. بررسی ها نشان داد، دقیق ترین نتایج از آزمون رئولوژی به دست می آید، چرا که اثر سلولوزها هنگام رسیدن به دمای انتقال شیشه ای تغییرات چشمگیری را در مدول کشسانی و گرانروی نشان می دهند. این تغییرات به خوبی با دستگاه های رئومتر قابل شناسایی هستند، اما در دستگاه هایی مانند DSC که براساس تغییرات انرژی گرمایی انتقالی کار می کنند، قابل شناسایی نیستند. براساس دماهای گزارش شده می توان گفت، دمای انتقال شیشه ای اتیل سلولوز خالص، دمایی میان ۱۲۰ °C تا ۱۵۰ °C است. این در حالی است که دمای انتقال شیشه ای سلولوز حدود ۳۲۰ °C گزارش شده است [۷]. کاهش درخور توجه دمای انتقال شیشه ای در اتیل سلولوز نسبت به سلولوز، به خاطر کاهش شدید پیوندهای هیدروژنی موجود میان و بین زنجیرهای پلیمر، به دلیل جایگزینی گروه های

جدول ۳- برخی از نرم‌کننده‌های سازگار با اتیل سلولوز [۹].

نرم‌کننده			
متیل آبتات	دی‌ایزوبوتیل کربونیل فتالات	کافور	روغن پنبه‌دانه
دی‌اتیل فتالات	بوتیل استئارات	دی‌بوتیل تارتارات	دی‌فنیل فتالات
دی‌بوتیل فتالات	آمیل اولئات	روغن کرچک خام	پنتافن
تری‌کرزیل فسفات	تری‌استین	روغن سویای خام	آلکیل سولفونامید
دی‌آمیل فتالات	روغن برزک خام	روغن سویای دم‌پرورد	سیکلوهگزیل آدیپات

هیدروکسیل است. کاهش چشمگیر دمای انتقال شیشه‌ای موجب شده است تا برخلاف سلولوز، اتیل سلولوز فراوری قابل‌قبولی داشته باشد و تبدیل به پلیمر پرکاربردی در صنایع مختلف شود.

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی اتیل سلولوز

استحکام کششی زیاد اتیل سلولوز در کنار انعطاف‌پذیری مناسب آن، موجب شده است تا اتیل سلولوز کاربردهای فراوانی پیدا کند. می‌توان از اتیل سلولوز خالص (بدون نرم‌کننده) فیلم‌هایی با استحکام کششی، انعطاف‌پذیری و چقرمگی مناسب تهیه کرد. با این حال، چنین فیلم‌هایی به انعطاف‌پذیری بیشتری نیاز دارند. از سوی دیگر در پاره‌ای از موارد، نرمی و جریان‌پذیری این پلیمر برای فراوری با تجهیزات فراوری صنعت پلیمر نیاز به بهبود دارد. بنابراین در بیشتر موارد، اتیل سلولوز با مقادیر معینی از ترکیبات نرم‌کننده فرمول‌بندی می‌شود [۳]. اتیل سلولوز نرم‌تر از نیتروسلولوز (NC) و سلولوز استات (CA) است، بنابراین به مقدار نرم‌کننده کمتری نیاز دارد. به‌طور معمول، نیتروسلولوز و سلولوز استات به ۳۰٪ تا ۳۵٪ نرم‌کننده نیاز دارند. این در حالی است که اتیل سلولوز برای رسیدن به همان درجه از نرمی و انعطاف‌پذیری به ۱۵٪ تا ۲۰٪ نرم‌کننده نیاز دارد [۱۵]. براساس گزارش Koch و همکاران [۹]، معمولاً ۱۵٪ یا کمتر از نرم‌کننده‌های استری برای تأمین نرمی و انعطاف‌پذیری مورد نیاز در بیشتر کاربردها کافی هستند. در برخی موارد ممکن است ۲۵٪ تا ۵۰٪ نرم‌کننده نیز افزوده شود. اتیل سلولوز به‌طور شگفت‌انگیزی با بیشتر نرم‌کننده‌های شناخته‌شده در صنعت، سازگاری مناسبی دارد. نام این نرم‌کننده‌ها در جدول ۳ آورده شده است [۹]. با این حال جدا از بحث سازگاری، اتیل سلولوز در دمای محیط با بیشتر نرم‌کننده‌ها امتزاج‌ناپذیر بوده و تنها در دماهای زیاد با نرم‌کننده‌ها امتزاج‌پذیر است. برای نمونه، هنگامی که پودر اتیل سلولوز به نرم‌کننده مایعی چون دی‌اکتیل فتالات (DOP) افزوده می‌شود، اتیل

سلولوز حتی متورم هم نمی‌شود. اما هنگامی که دما به ۱۰۰ °C می‌رسد، اتیل سلولوز به‌راحتی در DOP حل می‌شود [۱۵]. باید توجه داشت، یکی از اصول انتخاب نرم‌کننده برای پلیمرهای نیازمند نرم‌کننده (مانند PVC) این است که پلیمر و نرم‌کننده در دمای فرایند (دماهای بیش از دمای محیط) امتزاج‌پذیر باشند تا هم اختلاط به‌خوبی انجام شود و هم فراوری ساده‌تر باشد. با این حال، نرم‌کننده و پلیمر باید در دمای محیط امتزاج‌ناپذیر باشند تا نرم‌کننده، پلیمر را متورم نکند و موجب افت شدید و غیرقابل‌قبول خواص مکانیکی آن نشود. جدول ۴، استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی اتیل سلولوز فرمول‌بندی‌شده با ۲۰٪ از نرم‌کننده‌های مختلف را نشان می‌دهد. اتیل سلولوز به‌کاررفته، گونه ۱۰۰٪ شرکت Hercules ایالات متحده آمریکا بوده و آزمون‌های استفاده‌شده به‌صورت فیلم‌هایی با ضخامت ۵ mm هستند.

متأسفانه اطلاعات بیشتری درباره خواص مکانیکی اتیل سلولوز و

جدول ۴- خواص مکانیکی اتیل سلولوز دارای ۲۰٪ از نرم‌کننده‌های مختلف [۱۵].

نرم‌کننده	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول تا پارگی (%)
دی‌بوتیل فتالات	۳۷/۹۲	۴۵
روغن کرچک خام	۴۶/۱۹	۴۲
تری‌کرزیل فسفات	۴۴/۱۲	۳۸
دی‌آمیل فتالات	۴۴/۱۲	۴۲
دی‌ایزوبوتیل کربونیل فتالات	۴۴/۱۲	۳۷
دی‌فنیل فتالات	۴۲/۷۴	۳۹
پنتافن	۵۴/۱۲	۲۷
بوتیل دی‌گلیکول کربنات	۱۸/۲۷	۱۳
بوتوکسی‌اتیل استئارات	۱۸/۶۱	۱۹

پژوهشی بوده و در متن مقالات اشاره‌ای به کاربردهای بالقوه یا احتمالی آن‌ها نشده است.

بسته‌بندی مواد غذایی

Yang و همکاران [۲۰] با هدف ساخت فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی، آمیخته‌هایی با نسبت ۱:۱ از پلی‌وینیل الکل (PVA) و اتیل سلولوز تهیه کردند. از آنجا که PVA مقاومت اندکی در برابر آب و رطوبت دارد، مقادیر مختلفی از اتیل سلولوز به آن افزوده شد تا مقاومت به آب PVA بهبود یابد. همچنین برای بیشتر کردن خواص ضدآکسندگی و افزایش مقاومت به فعالیت میکروب‌ها و باکتری‌ها، به آمیخته‌ها مقادیری پلی‌فنول چای افزودند. در این کار، تمام نمونه‌ها با موفقیت تهیه شدند و خواص ضد میکروب و ضدآکسندگی مناسبی نشان دادند. نمونه‌های دارای ۳ و ۵٪ پلی‌فنول چای، بهینه‌ترین خواص را دارا بودند. این پژوهشگران توصیه کرده‌اند، آمیخته‌های مزبور از قابلیت بالقوه به کارگیری در ساخت بسته‌بندی‌های فعال برای نگهداری مواد غذایی برخوردارند [۲۰].

بیک‌زاده و همکاران [۲۱] آمیخته‌هایی از اتیل سلولوز، پلی‌کاپرولاکتون (PCL) و ژلاتین (GEL) تهیه کردند. همچنین، برای بهبود پایداری آمیخته‌ها در برابر اکسایش و نیز میکروب‌ها و قارچ‌ها از مقادیر معین روی اکسید (ZnO) و روغن اسانس‌دار آویشن شیرازی پرگل (Zataria multiflora essential oil, ZEO) بهره بردند. نتایج نشان داد، آمیخته‌های EC/PCL/GEL با نسبت‌های وزنی ۱۰/۷۰/۲۰ با وجود ۳٪ روی اکسید و ۳۰٪ ZEO افزون بر دارا بودن خواص مکانیکی و پایداری گرمایی مناسب، مقاومت خوبی نسبت به اکسایش و میکروب‌ها دارند.

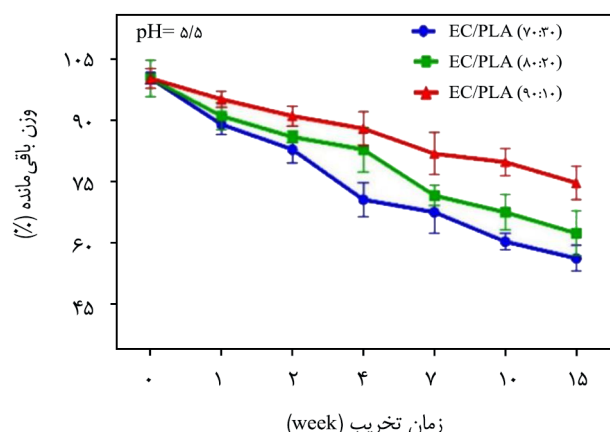
ساخت غشاهای جداسازی گازها

Xu و همکاران [۲۲]، آمیخته‌ای از پلی‌دی‌متیل سیلوکسان و اتیل سلولوز به منظور ساخت غشاهای جداسازی گازها تهیه کردند. در این آمیخته‌ها، اتیل سلولوز شکل‌پذیری و نیز قابلیت جداسازی گاز را بهبود بخشید. افزون بر این، Ma و همکاران [۲۳] نیز آمیخته‌های اتیل سلولوز و نوعی پلی‌دی‌متیل سیلوکسان اصلاح‌شده را برای کاربرد مشابهی توسعه دادند. نتایج نشان داد، این آمیخته‌ها پایداری گرمایی و خواص مکانیکی مناسبی دارند. همچنین در پژوهش دیگری، Li و همکاران [۲۴] به کمک روش محلولی و به کاربردن کلروفرم در نقش حلال، آمیخته‌هایی از پلی‌وینیل پیرولیدون (PVP) و اتیل سلولوز تهیه کردند. نتایج آزمون‌های XRD میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) و DSC نشان داد، این آمیخته‌ها امتزاج

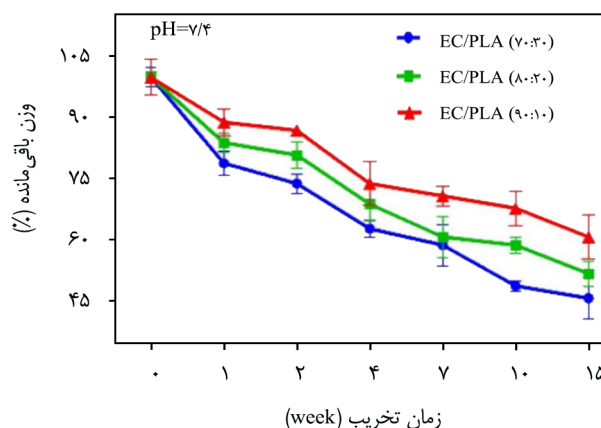
تأثیر نوع و مقدار نرم‌کننده‌ها بر خواص و ویژگی‌های آن وجود ندارد. با این حال از آنجا که بیش از ۸۰٪ نرم‌کننده‌های مصرفی در صنعت پلیمر برای نرم کردن PVC به کار گرفته می‌شوند [۱۹]، منابع فراوانی به بررسی اثر نوع و مقدار نرم‌کننده‌ها بر خواص مختلف PVC وجود دارد. از سوی دیگر، PVC نیز خواص نسبتاً مشابهی با اتیل سلولوز دارد. بنابراین، اطلاعات موجود درباره PVC می‌تواند برای اتیل سلولوز نیز سودمند باشند. براساس داده‌های جدول ۴، روغن کرچک نسبت به نرم‌کننده‌های فتالاتی خواص مکانیکی بهتری را برای اتیل سلولوز به همراه داشته است. Chen و همکاران [۱۹]، اثر افزودن مقادیر مختلف روغن کرچک و DOP را بر PVC بررسی کردند. نتایج نشان داد، فرمول‌بندی‌های نرم‌شده با روغن کرچک، مدول، استحکام کششی، ازدیاد طول تا پارگی، انعطاف‌پذیری و حتی پایداری گرمایی بیشتری نسبت به انواع نرم‌شده با DOP دارند. همچنین، روغن کرچک در درصد‌های کمتر همان اثری را دارد که DOP در درصد‌های بیشتر ایجاد می‌کند. در ادامه عنوان شده است، روغن کرچک زنجیرهای آلکیدی بلندتری نسبت به DOP دارد، بنابراین نرم‌کننده مناسب‌تری است. همچنین دیده شد، افزودن دو نرم‌کننده به طور هم‌زمان به PVC، زمانی که مقدار روغن کرچک نسبت به DOP بیشتر است، بر خواص مکانیکی PVC، اثر هم‌افزایی دارد. به طوری که خواص مکانیکی فرمول‌بندی به دست آمده از انواع پیشین برتر است. بی‌شک می‌توان پژوهش‌هایی را با موضوع مشابه درباره اتیل سلولوز انجام داد و اثر روغن‌ها و نرم‌کننده‌های گوناگون را بر خواص متفاوت این پلیمر ارزیابی کرد. به طور قطع، نتایج چنین پژوهش‌هایی برای بهبود هر چه بیشتر خواص و ویژگی‌های فرمول‌بندی‌های اتیل سلولوز از جنبه‌های مختلف و گسترده‌تر شدن کاربردهای صنعتی آن سودمند است.

آمیخته‌های اتیل سلولوز

توسعه پلیمر جدید و تجاری‌سازی آن نیازمند زمان طولانی و اختصاص دادن هزینه هنگفتی است. حال آنکه می‌توان با صرف هزینه کمتر، آمیخته پلیمری مناسب یا کوپلیمری با خواص مطلوب را به کمک تجهیزات پایین‌دستی صنایع پلیمر توسعه داد. اتیل سلولوز نیز با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد آن می‌تواند گزینه مطلوبی برای آمیخته‌شدن با سایر پلیمرها باشد. در این نوشتار، آمیخته‌های اتیل سلولوز براساس کاربرد نهایی اشاره‌شده در مقالات پژوهشی منتشر شده به چهار گروه آمیخته‌های مناسب صنایع بسته‌بندی مواد غذایی، ساخت غشاهای جداسازی گازها، کاربردهای پزشکی و آمیخته‌هایی دسته‌بندی شده‌اند که هدف از توسعه آن‌ها انجام کار



شکل ۹- مقاومت به تخریب آمیخته‌ها در محیط با pH برابر با ۵/۵ [۱۲].



شکل ۸- مقاومت به تخریب آمیخته‌ها در محیط با pH برابر با ۷/۴ [۱۲].

کامپوزیت را بر خواص محصولات نهایی بررسی کردند. نتایج نشان داد، کامپوزیت‌های با ۲۰٪ هیدروکسی آپاتیت دارای خواص مکانیکی مناسب و ساختار متخلخل بهینه هستند. آن‌ها در پایان نتیجه‌گیری کردند، خواص کامپوزیت یادشده برای استفاده در مهندسی بافت استخوان بسیار مناسب است.

Huang و همکاران [۲۶] به‌منظور رهایش کنترل‌شده داروهای با انحلال‌پذیری کم در آب، آمیخته‌هایی از کوپلیمر آمونیو پلی‌متاکریلات و اتیل سلولوز تهیه کردند. در این آمیخته‌ها نسبت آمونیو پلی‌متاکریلات به اتیل سلولوز، دو به یک بود. Sakellariou و Rowe [۲۷]، جدایش فازی و شکل‌شناسی آمیخته‌های اتیل سلولوز و سلولوز استات فتالات (CAP) را بررسی کردند. آنان دریافتند، اتیل سلولوز و CAP در دمای محیط، نسبت به یکدیگر ناسازگار بوده و آمیخته دوفازی تشکیل می‌دهند. در دو پژوهش آخر [۲۶، ۲۷]، آمیخته‌های اتیل سلولوز به‌عنوان گزینه‌های مناسبی برای استفاده در سامانه‌های دارورسانی کنترل‌شده توصیه شدند و اتیل سلولوز و آمیخته‌های آن برای چنین کاربردی بسیار مناسب بودند. Winnicka [۲۸] به‌طور مفصل کاربردهای اتیل سلولوز و آمیخته‌های آن را در زمینه رهایش کنترل‌شده دارو بررسی کرده است.

اهداف پژوهشی

Rogovina و همکاران [۱۴]، آمیخته‌هایی از PLA و اتیل سلولوز توسعه دادند و به برخی از آن‌ها، مقادیری پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) به‌عنوان نرم‌کننده افزودند. نتایج نشان داد، به‌دلیل ناسازگاری زیاد PLA و اتیل سلولوز، افزایش مقداری اتیل سلولوز موجب کاهش شدید مدول، استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی آمیخته‌ها می‌شود. همچنین وجود PEG، مدول و استحکام کششی آمیخته‌ها

ناپذیرند. در این پژوهش، به‌منظور بررسی استفاده از آمیخته‌های اتیل سلولوز و PVP در نقش غشا، نفوذپذیری، تراوایی، انحلال‌پذیری و گزینش‌پذیری گازهای اکسیژن، نیتروژن، کربن دی‌اکسید، متان و هیدروژن آن‌ها ارزیابی و اندازه‌گیری شد. نتایج شکل‌شناسی و نفوذپذیری نشان داد، آمیخته‌های مزبور برای ساخت غشاهای جداسازی گازها، مواد بسیار جالب توجهی هستند. در مقایسه با PVP خالص، آمیخته‌های PVP/EC خواص مکانیکی و شکل‌پذیری بهتر و قیمت ارزان‌تری دارند. این بهبود در خواص و قیمت به وجود اتیل سلولوز نسبت داده شد.

کاربردهای پزشکی

احمدیان و همکاران [۱۲] به‌منظور ساخت نانوالیاف ضدباکتری استفاده‌شده در زمینه‌های پزشکی، آمیخته‌هایی از اتیل سلولوز، پلی‌لاکتیک اسید (PLA) و کلاژن تهیه کردند. آن‌ها دریافتند، با افزایش مقدار اتیل سلولوز در آمیخته‌ها، پایداری گرمایی بهبود پیدا می‌کند. با این حال افزایش مقدار اتیل سلولوز در آمیخته‌ها، استحکام کششی آن‌ها را کاهش می‌دهد. افزون بر این، آزمونی برای بررسی تخریب آمیخته‌ها در محیط‌های با pHهای مختلف در دوره‌های زمانی متفاوت نیز انجام شد. شکل‌های ۸ و ۹، نتایج این آزمون را نشان می‌دهند. براساس این نتایج، هر چه مقدار اتیل سلولوز موجود در آمیخته‌ها بیشتر باشد، تخریب آمیخته با سرعت کمتری رخ می‌دهد.

Mao و همکاران [۲۵]، PLA و اتیل سلولوز را با نسبت ۲ به ۱ آمیخته‌سازی کردند. آن‌ها برای تقویت هر چه بیشتر خواص آمیخته‌ها، مقادیر مختلف هیدروکسی آپاتیت را افزودند. سپس تأثیر مقدار هیدروکسی آپاتیت و نیز روش‌های مختلف ساخت

تخریب‌پذیر مانند سلولوز و اتیل سلولوز است. با این حال، چنین محصولاتی در کنار زیست‌تخریب‌پذیری بیشتر نسبت به پلیمرهای متداول باید داری خواص و ویژگی‌های مکانیکی و گرمایی مناسب نیز باشند تا تجاری‌سازی و استفاده از آن‌ها در ابعاد صنعتی توجیه‌پذیر و معقول باشد. اما خواص آمیخته‌های ساخته‌شده در این پژوهش، چنین ویژگی را نداشتند.

نتیجه‌گیری

رو به پایان‌بودن منابع نفتی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از زباله‌های پلیمری موجب شده است تا به پلیمرهای تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست، بیشتر توجه شود. خواص و ویژگی‌های بسیار مناسب اتیل سلولوز از جمله استحکام کششی زیاد، چقرمگی، زیست‌سازگاری و در مواردی زیست‌تخریب‌پذیری آن در کنار اینکه اتیل سلولوز تجدیدپذیر است و تهیه و ساخت آن مشکلات پلیمرهای تولیدی از منابع نفتی را ندارد، از جمله دلایلی هستند که کار با این پلیمر را جذاب می‌سازد. بنابراین، پژوهش‌هایی پیرامون بهبود خواص اتیل سلولوز و گسترده‌ترکردن کاربردهای آن انجام شده است. از زمینه‌های پژوهشی در این باره، بررسی خواص آمیخته‌های آن است. برای نمونه خواص مکانیکی مناسب، زیست‌سازگاری و غیرسمی‌بودن اتیل سلولوز موجب شده است تا برای ساخت فیلم‌های بسته‌بندی نوین مواد غذایی، اتیل سلولوز با پلیمرهایی مانند PVA و PCL آمیخته شود. با وجود آمیخته‌های گوناگونی که از ترکیب اتیل سلولوز با سایر پلیمرها به‌دست آمده است، باز هم پلیمرهای دیگری وجود دارند که به‌نظر می‌رسد، افزودن آن‌ها به اتیل سلولوز یا افزودن اتیل سلولوز به آن‌ها بتواند آمیخته‌هایی با ویژگی‌های منحصر به‌فرد ایجاد کند. افزون بر این، از آنجا که در بیشتر موارد به‌منظور افزایش انعطاف‌پذیری و نرمی اتیل سلولوز از نرم‌کننده‌ها استفاده می‌شود، بررسی اثر نرم‌کننده‌های مختلف بر خواص و ویژگی‌های اتیل سلولوز نیز می‌تواند موضوع پژوهش مناسب و کاربردی باشد که تاکنون توجه چندانی به آن نشده است.

را در برابر افزایش ناچیز ازدیاد طول تا پارگی، به‌مقدار زیادی کاهش می‌دهد. در پژوهش دیگری Yiping و همکاران [۲۹]، آمیخته‌هایی از پلی‌کاپرولاکتون (PCL) را تهیه کردند. نتایج آزمون DSC نشان داد، دماهای ذوب (T_m) و بلورینگی (T_c) PCL در آمیخته‌ها کاهش یافته، در حالی که اختلاف دماهای ذوب و بلورینگی ($T_m - T_c$) این پلیمر در مقایسه با PCL خالص افزایش یافته است. بنابراین می‌توان گفت، PCL و اتیل سلولوز نسبت به هم جزئی سازگار هستند. نتایج آزمون FTIR نیز حاکی از این بود که هنگام افزایش درصد PCL در آمیخته‌ها، پیک جذب گروه‌های هیدروکسیل موجود در اتیل سلولوز به‌سوی بسامدهای کمتر جابه‌جا می‌شود و برهم‌کنش ویژه‌ای میان گروه‌های هیدروکسیل اتیل سلولوز و کربونیل موجود در PCL وجود دارد. باید توجه داشت، درجه جانشینی اتیل سلولوز به‌کاررفته برابر با ۱/۶ و درجه پلیمرشدن آن برابر با ۷۰ بوده است.

Liu و همکاران [۳۰]، امتزاج‌پذیری کیتوسان و اتیل سلولوز را به‌کمک آزمون‌های DSC، FTIR و SEM بررسی کردند. نتایج آزمون DSC نشان داد، دمای آغاز تخریب گرمایی کیتوسان از اتیل سلولوز بیشتر است. بیشتر آمیخته‌ها دارای دمای آغاز تخریب هستند که دمایی میان دمای آغاز تخریب کیتوسان و اتیل سلولوز خالص است. بنابراین می‌توان گفت، در بیشتر ترکیب‌درصدها، اتیل سلولوز و کیتوسان آمیخته‌های امتزاج‌پذیر تشکیل می‌دهند. چرا که در صورت دوفازی شدن آمیخته که نشانگر امتزاج‌پذیری دو پلیمر است، دمای آغاز تخریب آمیخته‌ها باید در دو پیک جداگانه مربوط به هر یک از فازهای پلیمری تشکیل‌دهنده آمیخته دیده می‌شد. همچنین نتایج آزمون‌های FTIR و SEM، امتزاج‌پذیری این دو پلیمر در برخی از ترکیب‌درصدها را تأیید کردند. در کار دیگری Lomakin و همکاران [۱۳]، آمیخته‌هایی از LDPE با سلولوز و اتیل سلولوز ساختند. در ادامه، خواص مکانیکی و پایداری گرمایی آمیخته‌ها بررسی شدند. نتایج نشان داد، خواص مکانیکی و پایداری گرمایی تمام آمیخته‌ها از LDPE خالص کمترند. سایر خواص بررسی‌شده نیز رضایت‌بخش نبودند. چرا که سازگاری مناسبی میان پلیمرهای تشکیل‌دهنده آمیخته وجود نداشت. هدف از انجام این پژوهش براساس گفته Lomakin و همکاران [۱۳]، شتاب‌دهی تخریب پلیمری مانند LDPE در محیط زیست، با افزودن پلیمرهای

مراجع

1. Zhang J., Yingping Q., Yongfeng S., and Hua I., Research Progress on Chemical Modification and Application of Cellulose: A Review, *Mater. Sci.*, **28**, 60-67, 2022.
2. Tsiptsias C., Glass Chemical Transition: An Unknown Thermal Transition Observed in Cellulose Acetate Butyrate, *Carbohydr. Polym.*, **259**, 117754, 2021.
3. Rekhi G.S. and Jambhekar S.S., Ethylcellulose-A Polymer Review, *Drug Dev. Ind. Pharm.*, **21**, 61-77, 1995.
4. Long Y., *Biodegradable Polymer Blends and Composites from Renewable Resources*, John Wiley and Sons, USA, 23, 2009.
5. Oprea M. and Voicu I., Recent Advances in Composites Based on Cellulose Derivatives for Biomedical Applications, *Carbohydr. Polym.*, **247**, 116683, 2020.
6. Heinze T., El Seoud O.A., and Koschella A., Cellulose Derivatives: *Synthesis, Structure, and Properties*, Springer, Switzerland, 272 and 452, 2018.
7. Ahmadi P., Jahanban-Esfahlan A., Ahmadi A., Tabibiazar M., and Mohammadifar M., Development of Ethyl Cellulose-Based Formulations: A Perspective on the Novel Technical Methods, *Food Rev. Int.*, **38**, 1-48, 2020.
8. Murtaza G., Ethylcellulose Microparticles: A Review, *Acta. Pol. Pharm.*, **69**, 11-22, 2012.
9. Koch W., Properties and Uses of Ethylcellulose, *Ind. Eng. Chem.*, **29**, 687-690, 1937.
10. Seddiqi H., Oliaei E., Honarkar H., Jin J., Geonzon C., Bacabac G. et al., Cellulose and Its Derivatives: Towards Biomedical Applications, *Cellulose*, **28**, 1893-1931, 2021.
11. Zhibankov R., *Infrared Spectra of Cellulose and Its Derivatives*, Springer, New York, 94, 2013.
12. Ahmadian S., Ghorbani M., and Mahmoodzadeh F., Silver Sulfadiazine-Loaded Electrospun Ethyl Cellulose/Poly(lactic Acid)/Collagen Nanofibrous Mats with Antibacterial Properties for Wound Healing, *Int. J. Biol. Macromol.*, **162**, 1555-1565, 2020.
13. Lomakin S.M., Rogovina S.Z., Grachev A.V., Prut E.V., and Alexanyan C.V., Thermal Degradation of Biodegradable Blends of Polyethylene with Cellulose and Ethylcellulose, *Thermochim. Acta*, **521**, 66-73, 2011.
14. Rogovina S.Z., Aleksanyan K.V., Grachev A.V., Berlin A.A., and Prut E.V., Mechanical and Thermophysical Properties of Biodegradable Polylactide Compositions with Ethyl Cellulose and Chitosan Containing Poly(ethylene glycol), *Mendeleev. Commun.*, **25**, 361-363, 2015.
15. Ethylcellulose, Chemical and Physical Properties, Hercules, Wilmington, Del., 1989.
16. Mark J., *Polymer Data Handbook*, Oxford University, UK, 97-101, 1999.
17. Lai H.L., Pitt K., and Craig D.Q., Characterisation of the Thermal Properties of Ethylcellulose Using Differential Scanning and Quasi-Isothermal Calorimetric Approaches, *Int. J. Pharm.*, **386**, 178-184, 2010.
18. Go'mez-Carracedo A., Alvarez-Lorenzo C., Go'mez-Amoza J.L., and Concheiro A., Chemical Structure and Glass Transition Temperature of non-Ionic Cellulose Ethers. DSC, TMD-SCw, Oscillatory Rheometry Study, *J. Therm. Anal. Calorim.*, **73**, 587-596, 2003.
19. Kumar S., Recent Developments of Biobased Plasticizers and their Effect on Mechanical and Thermal Properties of Poly(vinyl chloride): A Review, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **58**, 11659-11672, 2019.
20. Yang Y., Shi Y., Cao X., Liu Q., Wang H., and Kong B., Preparation and Functional Properties of Poly(vinyl alcohol)/Ethyl Cellulose/Tea Polyphenol Electrospun Nanofibrous Films for Active Packaging Material, *Food. Control.*, **130**, 108331, 2021.
21. Beikzadeh S., Hosseini S.M., Mofid V., Ramezani S., Ghorbani M., Ehsani A. et al., Electrospun Ethyl Cellulose/Polycaprolactone/Gelatin Nanofibers: The Investigation of Mechanical, Antioxidant, and Antifungal Properties for Food Packaging, *Int. J. Biol. Macromol.*, **191**, 457-464, 2021.
22. Xu S., Ma W., Zhou H., Zhang Y., Jia H., Xu J. et al., Preparation of Butadiene-Bridged Polymethylsiloxane (BBPMS)/Ethyl Cellulose (EC) Hybrid Membranes for Gas Separation, *Eur. Polym. J.*, **157**, 110679, 2021.
23. Ma W., Xu S., Jia H., Xu J., Liu D., Zhang M. et al., Preparation of Butadiene-Bridged Polymethylsiloxane/Ethylcellulose/1-Carboxymethyl-3-methylimidazolium Chloride Ternary Composite Membranes for Gas Separation, *ACS Omega*, **7**, 3626-3633, 2022.
24. Li X.G., Kresse I., Springer J., Nissen J., and Yang Y.L., Morphology and Gas Permselectivity of Blend Membranes of Polyvinylpyridine with Ethylcellulose, *Polymer*, **42**, 6859-6869, 2001.
25. Mao D., Li Q., Bai N., Dong H., and Li D., Porous Stable Poly(lactic acid)/Ethyl Cellulose/Hydroxyapatite Composite Scaffolds Prepared by a combined Method for Bone Regeneration, *Carbohydr. Polym.*, **180**, 104-111, 2018.
26. Huang J., Wigent R.J., and Schwartz J.B., Drug-Polymer Interaction and its Significance on the Physical Stability of Nifedipine Amorphous Dispersion in Microparticles of an Ammonio Methacrylate Copolymer and Ethylcellulose Binary Blend, *Asian J. Pharm. Sci.*, **97**, 251-262, 2008.

27. Sakellariou P. and Rowe R.C., Phase Separation and Morphology in Ethylcellulose/Cellulose Acetate Phthalate Blends, *J. Appl. Polym. Sci.*, **43**, 845-855, 1991.
28. Winnicka K., Advanced Materials in Drug Release and Drug Delivery Systems, *Materials*, **14**, 1042, 2021.
29. Yiping H., Xiaolie L., and Dezhu M., Ringed Spherulite Morphology and Compatibility in the Binary Blends of Poly(ϵ -caprolactone) with Ethyl Cellulose, *Eur. Polym. J.*, **37**, 2153-2157, 2001.
30. Liu P.T., Miao H., and Liu Z., Miscibility and Liquid Crystallinity Studies of Chitosan/Ethylcellulose Blends, *Appl. Mech. Mater.*, **79**, 210-214, 2011.