مقاله مروری

فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی
سال دهم، شماره ۲، شماره پیاپی ۳۸، تابستان ۱۴۰۴
Vol. 10, No. 2 Issue No. 38
Summer 2025, Quarterly
صفحه ۱۵-۵

Iran Polymer Technology: Research and Development

مروری بر فرایند تولید و تعیین ماهیت پلیمرهای تشکیل‌دهنده بسته‌بندی چندلایه محصولات پزشکی

محمدمهدی اشتری برزکی، احسان گائینی*
دانشگاه تهران، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

فیلم‌های پلیمری چندلایه به‌دلیل خواص سدکننده عالی، استحکام مکانیکی و انعطاف‌پذیری به‌طور گسترده در بسته‌بندی‌های پزشکی و مواد غذایی استفاده می‌شوند. این فیلم‌ها از لایه‌های پلیمری متعددی تشکیل شده‌اند که هر کدام برای ارائه ویژگی‌های خاصی مانند مقاومت در برابر اکسیژن/ رطوبت، دوام و حفاظت میکروبی طراحی شده‌اند. در کاربردهای پزشکی، ایمنی و یکپارچگی فراورده‌های خونی، دارویی را در حین نگه‌داری و حمل‌ونقل تضمین می‌کنند. فرایندهای تولید متداول عبارتند از هم‌اکسترودکردن و چندلایه‌کردن که لایه‌هایی مانند مانع (به‌عنوان مثال PVDC، EVOH)، لایه حجیم (به‌عنوان مثال مانند PP، PE) و لایه آب‌بندی (به‌عنوان‌مثال مانند EVA، LDPE) را برای بهینه‌سازی عملکرد ترکیب می‌کنند. افزودنی‌هایی مانند آنتی‌اکسیدان‌ها، تثبیت‌کننده‌های UV و عوامل لغزش برای افزایش خواصی مانند پایداری حرارتی و عملکرد سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های شناسایی پیشرفته، از جمله میکروسکوپی (به‌عنوان‌مثال، SEM)، طیف‌سنجی FTIR، و کالری‌متری روبشی تفاضلی (DSC)، برای شناسایی ترکیب لایه و رفتار حرارتی فیلم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نفوذپذیری گاز و بخار آب معیارهای مهمی هستند که با موادی مانند EVOH (مانع اکسیژن عالی) و پلی‌اتیلن (مقاومت در برابر رطوبت برتر) می‌توانند کنترل شوند. چالش‌هایی مانند چسبندگی بین لایه‌ها با استفاده از لایه‌های چسب یا سازگارکننده‌ها برطرف می‌شوند. نوآوری در فناوری‌های اکسترود و چندلایه‌کردن، کنترل دقیق ضخامت و عملکرد لایه را امکان‌پذیر ساخته و کارایی، هزینه و ماندگاری محصول را بهبود می‌بخشد. این بررسی اهمیت انتخاب مواد، ترکیب افزودنی‌ها و بهینه‌سازی فرایند تولید را در توسعه فیلم‌های چندلایه با کارایی بالا برای برنامه‌های کاربردی در بخش بهداشتی و نگه‌داری مواد غذایی برجسته می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

فیلم‌های چندلایه، بسته‌بندی پلیمری، هم‌اکسترودکردن، خواص مانع، کاربردهای پزشکی، بهینه‌سازی افزودنی

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
ehsan.gaeini@ut.ac.ir

۱ مقدمه

فیلم‌های پلیمری چندلایه به‌دلیل ویژگی‌های برتر مانند خواص سدشوندگی، استحکام مکانیکی و انعطاف‌پذیری، در بسته‌بندی ثانویه کیسه خون و فراورده‌های خونی اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده‌اند. این فیلم‌ها معمولاً از چندین لایه پلیمری مختلف تشکیل شده‌اند که هر لایه عملکرد خاصی مانند مقاومت در برابر اکسیژن و رطوبت، دوام و حفظ پاکیزگی را فراهم می‌کند. استفاده از فیلم‌های چندلایه در بسته‌بندی محصولات پزشکی، ایمنی و یکپارچگی محصول را در طول ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل تضمین می‌کند و از آلودگی، نشت و عوامل محیطی محافظت می‌کند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که مواد پلیمری مختلف در بهبود خواص سدکنندگی، انعطاف‌پذیری و قابلیت مهروموم نقش مهمی را ایفا می‌کنند. ترکیب این مواد در ساختار چندلایه، راه‌حلی مفید و کاربردی برای حفظ کیفیت محصولات پزشکی ارائه می‌دهد. تحقیقات انجام شده تاکنون بر اهمیت بهینه‌سازی ضخامت و ترکیب لایه‌ها برای دستیابی به ویژگی‌های عملکردی مطلوب تأکید می‌کنند [۱و۲].

بسته‌بندی محصولات پزشکی

وظیفه اصلی بسته‌بندی، اطمینان از ایمنی و کیفیت محصول دارویی و در نتیجه تضمین ایمنی بیمار است. بسته‌بندی باید از محصول در برابر عوامل خارجی مانند رطوبت، نور و دما محافظت کند، زیرا این عوامل می‌توانند خواص محصول دارویی را تغییر دهند. هر بسته‌بندی دارویی باید دارای ویژگی‌های مطلوبی مانند حفظ محتویات دارویی، جلوگیری از انتشار یا نفوذ محصول، استحکام کافی، محافظت در برابر نور، رطوبت، اکسیژن و آلودگی بیولوژیکی، راحتی استفاده و اقتصادی‌بودن باشد. بسته‌بندی‌های دارویی بر اساس کاربرد به سه دسته تقسیم می‌شوند که این دسته‌بندی‌ها به بهبود ایمنی، کیفیت و کارایی بسته‌بندی‌های دارویی کمک می‌کنند؛

- بسته‌بندی‌های نوع اول (Primary)؛ در تماس مستقیم با محصول دارویی هستند و تأثیر مستقیم بر آن دارند.
- بسته‌بندی‌های نوع دوم (Secondary)؛ برای سازماندهی و حمل‌ونقل بسته‌بندی‌های اولیه استفاده می‌شوند.
- بسته‌بندی‌های نوع سوم(Tertiary)؛ برای جابه‌جایی در مقیاس‌های بزرگ طراحی شده‌اند [۳و۴].

بسته‌بندی‌های انعطاف‌پذیر چندلایه

فیلم بسته‌بندی، ماده پلیمری بسیار نازکی بوده که مؤلفه اصلی تشکیل‌دهنده آن پلاستیک و الاستومر است و برای محافظت از کالا در برابر عوامل آسیب‌رسان همچون آلودگی‌ها، میکروب‌ها، مایعات یا گازها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دهه‌های گذشته تاکنون استفاده از پوشش‌های پلیمری در قالب فیلم‌ها رواج یافته است. پلیمرهای مختلفی در طراحی و تولید بسته‌بندی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که بخش بزرگی از این صنعت را پلی‌الفین‌ها به خود اختصاص داده ست. پلیمرها را می‌توان به خاطر استحکام کششی، مقاومت در برابر نفوذ، قابلیت مهروموم شدن، شکل پذیری، ماشین‌پذیری، چسبندگی، خواص نوری و ویژگی‌های اقتصادی به‌عنوان انتخابی کلیدی نام برد. پلی‌اتیلن پرمصرف‌ترین گرمانرم مورد استفاده در صنایع بسته‌بندی است. در جدول ۱ به انواع پلیمرهای مورد استفاده در صنعت بسته‌بندی اشاره شده‌است [۵].

فیلم‌های چندلایه پلیمری

ویژگی‌های مواد بسته‌بندی را می‌توان با ترکیب یا اتصال پلیمرهای مختلف به یکدیگر با استفاده از فرایند چندلایه‌کردن (Lamina-tion) کردن یا از طریق فرایند هم‌اکسترودکردن (Co-extru-sion) افزایش داد. فیلم‌های چندلایه ساخته‌شده از مواد مختلف می‌توانند خواص مطلوبی مانند خواص عبورپذیری پایین، مقاومت مکانیکی و حرارتی بالا داشته باشند که معمولاً هیچ ماده‌ای به‌تنهایی همه ویژگی‌های مطلوب را ندارد. پارامترهای مختلفی بر روی خواص نهایی فیلم‌های چندلایه پلیمری اثرگذار هستند که عبارتند از؛ چگالی، جرم و توزیع جرم مولکولی، بلورینگی و ساختار مولکولی [۶].

بخش گسترده‌ای از بسته‌بندی‌ها در حوزه پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد که الزاماتی نظیر؛ قابلیت سترون‌سازی، سد میکروبی، خواص مکانیکی و مقاومت در برابر سوراخ‌شدن را شامل می‌شود. از فیلم‌های پلیمری برای مراقبت‌های بهداشتی از وسایل پزشکی استفاده می‌شود. از این نوع بسته‌بندی‌ها برای نگه‌داری وسایل یک‌بارمصرف پزشکی، بخیه، دارو، سرنگ و سایر موارد استفاده می‌شود.

مهم‌ترین بخش‌های ساختار فیلم‌های بسته‌بندی چندلایه را یک لایه مانع به‌عنوان سدی در جهت جلوگیری از تبادل گاز و رطوبت، لایه حجیم و لایه مهروموم تشکیل می‌دهند. ازلایه مهروموم برای دوخت حرارتی لبه‌های فیلم روی یکدیگر استفاده می‌شود. لایه حجیم ساختار اصلی فیلم چندلایه را تشکیل می‌دهد. پلیمرهای مورد استفاده در بخش فوق در جدول ۲ توضیح داده شده‌اند [۵].

عبورپذیری گاز و بخار آب

فیلم‌های پلیمری چندلایه به‌دلیل ایجاد موانع مؤثر در برابر گاز

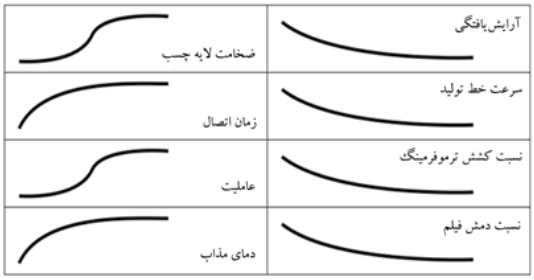
جدول ۱ انواع پلیمرهای مورد استفاده در صنعت بسته‌بندی چندلایه [۵].

نام پلیمر	مخفف	چگالی (g/cm^3)
اتیلن اکریلیک اسید	EAA	۹۲۵,۰–۹۵۰,۰
اتیلن مونوکسید کربن	ECO	۹۳۰,۰
اتیلن اتیل آکریلات	EEA	۹۲۵,۰–۹۵۰,۰
اتیلن متاکریلیک اسید تا حدی خنثی شده	ION	۹۴۰,۰–۹۵۰,۰
اتیلن متاکریلیک اسید	EMAA	۹۲۵,۰–۹۵۰,۰
اتیلن متیل آکریلات	EMA	۹۳۰,۰–۹۵۰,۰
اتیلن وینیل استات	EVA	۹۲۵,۰–۹۴۵,۰
اتیلن وینیل الکل	EVOH	۱۴,۱–۱۶,۱
پلی‌اتیلن پیوندی مالئیک انیدرید	PE-g-MAH	۹۱,۰–۹۴۰,۱
پلی‌اتیلن با چگالی بالا	HDPE	۹۴۰,۰–۹۶۵,۰
HDPE با وزن مولکولی بالا	HMWHDPE	۹۴۰,۰–۰,۹۶۲
پلی‌اتیلن با چگالی کم خطی	LLDPE	۹۱۵,۰–۹۴۰,۰
پلی‌اتیلن با چگالی کم	LDPE	۹۱۵,۰–۰,۹۲۵
پلی‌اتیلن با چگالی متوسط	MDPE	۹۲۵,۰–۹۴۰,۰
پلی‌اتیلن متالوسن	m-LLDPE	۸۶۵,۰–۹۶۰,۰
پلاستومر/الاستومر پلی‌الفین	POP/POE	۸۶۵,۰–۹۱۵,۰
پلی‌اتیلن تقویت شده	EPE	۹۰۰,۰–۹۲۵,۰
پلی‌آمید (نایلون)	PA	۱۲,۱–۱۴,۱
پلی بوتیلن	PB	۹۰۹,۰
پلی‌کربنات	PC	۲,۱
پلی‌اتیلن ترفتالات	PET	۳,۱
پلی‌پروپیلن	PP	۸۹۰,۰–۹۰۲,۰
پلی‌استایرن	PS	۰۴,۱
پلی‌وینیل کلرید	PVC	۱۶,۱
پلی وینیلیدین کلرید	PVDC	۷,۱
پلی‌اتیلن با چگالی فوق‌العاده پایین	ULDPE	۹۰,۰–۹۱۵,۰

و رطوبت، گزینه‌ای ایده‌آل برای بسته‌بندی مواد غذایی و داروها هستند و به افزایش عمر مفید محصولات فاسدشدنی کمک می‌کنند. این فیلم‌ها با خاصیت عبورپذیری پایین، از مواد غذایی در برابر آب‌کافت و اکسایش محافظت می‌کنند. بهبود خاصیت سدکنندگی در برابر بخار آب، اکسیژن و دی‌اکسیدکربن در فیلم‌های چندلایه تولیدشده به روش‌هایی مانند هم‌اکسترود یا چندلایه‌کردن، برای افزایش ماندگاری محصولات ضروری است. به‌عنوان مثال، پلی‌اتیلن با سدکنندگی عالی در برابر بخار آب برای بسته‌بندی محصولات خشک مناسب است، اما به‌دلیل عبورپذیری بالای اکسیژن، برای محصولات حساس به اکسایش کارایی ندارد. در جدول ۳ مقادیر عبورپذیری گاز و بخار آب برخی از پلیمرهای مورد استفاده در صنعت بسته‌بندی مقایسه شده است [۹–۶].

چسبندگی در فیلم‌های چندلایه

به‌دلیل ناسازگاری بسیاری از پلیمرها، چالش چسبندگی ضعیف بین لایه‌ها در ساختارهای چندلایه وجود دارد. این مشکل با استفاده از لایه‌ی واسطه به نام لایه‌ی اتصال یا چسب (Tie layer) حل می‌شود. این لایه به‌عنوان سازگارکننده عمل کرده و پیوند بین لایه‌های ناسازگار را ایجاد می‌کند. به‌عنوان‌مثال، در ساختارهای چندلایه شامل پلی‌الفین و پلیمر قطبی، از پلی‌الفین‌های عامل‌دارشده به‌عنوان لایه‌ی چسب استفاده می‌شود که با قطبیت متفاوت، پیوند شیمیایی یا فیزیکی بین لایه‌ها برقرار می‌کنند. عوامل مختلفی مانند دما، زمان تولید، ضخامت چسب و میزان عاملیت، بر کیفیت چسبندگی بین لایه‌ها تأثیر می‌گذارند. افزایش دما و زمان تولید، ضخامت چسب و عاملیت، می‌توانند چسبندگی را بهبود بخشند. بااین‌حال، آرایش‌یافتگی زنجیره‌های پلیمری در چسب ممکن است باعث کاهش چسبندگی شود؛ بنابراین، ترکیبات چسب باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که اثرات منفی ناشی از آرایش‌یافتگی به حداقل برسد. تأثیر این عوامل به‌صورت کیفی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱ تأثیر پارامترهای مختلف روی چسبندگی لایه‌ها در فیلم‌های چندلایه [۱۰و۱۱].

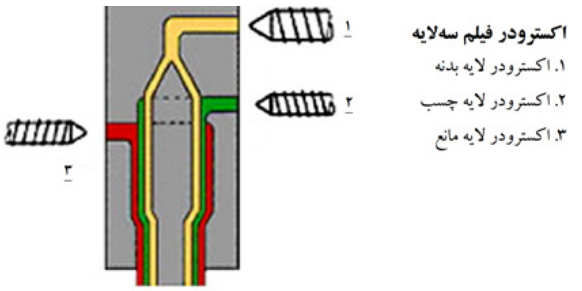
جدول ۲ پلیمرهای مورد استفاده در ترکیب لایه‌های مختلف فیلم چندلایه [۵].

لایه مانع	لایه حجیم	لایه مهروموم
کوپلیمر اتیلن وینیل الکل (EVOH): مانع اکسیژن	پلی‌اتیلن: LLDPE، LDPE، HDPE، PE، VLDPE	آینومرهای کوپلیمرهای اسیدی.
پلی‌آمید (PA6): مانع اکسیژن و روغن	پلی‌پروپیلن: هموپلیمر pp (HoPP)، کوپلیمر	کوپلیمر اسیدی (EAA) اتیلن
پلی‌آمید نیمه‌بلوری (MXD6): سد گاز O_2 و CO_2	اتیلن‌پروپیلن (CoPP)، ترپلیمر اتیلن‌پروپیلن بوتن (Ter PP)	اکریلیک اسید یا (EMAA) اتیلن متاکریلیک اسید.
پلی‌استرها (PET): سد رطوبت و مواد شیمیایی	آکریلات‌ها: اتیل متیل آکریلات (EMA)،	(VLDPE) پلی‌اتیلن با چگالی بسیار کم
پلی‌وینیلیدین کلرید (PVCD): مانع رطوبت و اکسیژن	اتیلن بوتیل آکریلات (EBA)، اتیلن اتیل	
پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE): مانع رطوبت	آکریلات (EEA)، پلی متیل متاکریلات	EVA یا EMA (اتیل متاکریلات)
پلی‌پروپیلن (PP): مانع رطوبت	(PMMA)، اتیلن متیل متاکریلات (EMMA)	با LLDPE ترکیب شده

فرایندهای تولید فیلم چندلایه

فیلم‌های چندلایه از طریق فرایندهای هم‌اکسترود و چندلایه‌کردن تولید می‌شوند. هم‌اکسترود به دو روش اکسترود فیلم (Film Extrusion) و اکسترود ریخته‌گری (Cast Extrusion) انجام می‌شود. در هر دو روش، گرانول‌های پلیمری ذوب شده و لایه‌های مذاب پلیمری با یکدیگر ترکیب می‌شوند. برای اتصال دولایه پلیمری، از پلیمر سوم به‌عنوان لایه چسب استفاده می‌شود.

هم‌اکسترودکردن باوجود چالش‌ها، مزایای زیادی دارد و روشی مناسب برای تولید محصولات محسوب می‌شود. در طراحی فیلم‌های بسته‌بندی، ویژگی‌های مختلفی مانند ضریب اصطکاک (Coefficient of Friction)، براقیت، قابلیت مهروموم‌شدن، چاپ‌پذیری (ویژگی‌های سطحی) و مقاومت کششی، شفافیت، مقاومت ضربه‌ای (ویژگی‌های بدنه) باید در نظر گرفته شوند. همچنین، ویژگی‌هایی مانند مقاومت در برابر گاز، مقاومت شیمیایی و قابلیت شکل‌پذیری نیز اهمیت دارند. ساختار معمولی هم‌اکسترود شامل لایه‌های اصلی (بخش عمده)، لایه سدکننده، لایه مهروموم و اغلب لایه‌ی چسب برای اتصال لایه‌های ناسازگار است. از فرایند هم‌اکسترود برای فیلم دمشی، فیلم ریخته‌گری و ورق ریخته‌گری استفاده می‌شود. [۱۰و۱۱].



شکل ۲ فرایند هم‌اکسترودکردن [۱۰و۱۱].

بر خلاف هم‌اکسترودکردن در فرایند چندلایه کردن (Lamination)، برای اتصال دو یا چندلایه از نوعی چسب در بین لایه‌ها به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده و شبکه‌کننده استفاده می‌شود. سه روش کلی در تهیه فیلم به روش چندلاسازی وجود دارد که عبارتند از؛

۱. چندلاسازی اکسترود (Extrusion Lamination)
۲. چندلاسازی چسب (Adhesive Lamination)
۳. چندلاسازی موم / گرم (Wax/hot Lamination)

در چندلاسازی اکسترود یک‌لایه مذاب روی یک‌لایه فیلم قرار می‌گیرد. در فرایند چندلاسازی چسب از چسب مبتنی بر حلال، چسب‌های یک یا چندجزئی استفاده شده و پخت از طریق پرتو فرابنفش صورت می‌گیرد. در فرایند چندلاسازی موم / گرم اتصال لایه‌ها از طریق قرارگرفتن لایه مذاب در بین دو لایه‌ی دیگر و سپس سردکردن لایه‌ها صورت می‌گیرد. به‌منظور بهبود ویژگی فیلم‌های چندلایه از لایه‌ها و پوشش‌های مختلفی استفاده می‌شود. پوشش‌ها عموماً به‌منظور محافظت، قابلیت مهروموم و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کاربردهای مختلف در بسیاری از انواع بسته‌بندی از لایه‌ای آلومینیومی به علت خواص ممانعتی خوب در برابر رطوبت، نور، هوا، بو و UV استفاده می‌شود [۱۲-۱۰].

فیلم دمشی

فیلم دمشی (Blown Film) روشی اصلی برای تولید فیلم‌های کشیده‌شده در دو محور (Biaxial) است. در این روش از فشار هوا برای کشش در جهت عرضی (Transverse Direction-TD) و از سرعت بالاتر غلتک‌های جمع‌کننده برای کشش در جهت ماشین (Machine Direction-MD) استفاده می‌شود. از این

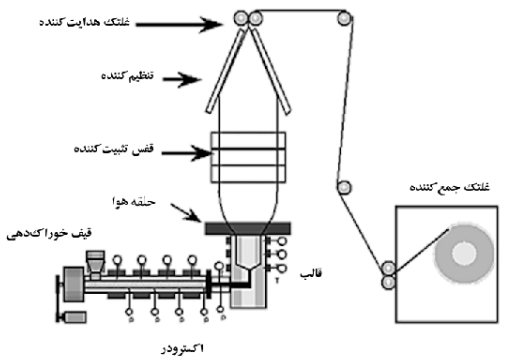
جدول ۳ مقادیر عبورپذیری بخار آب برای پلیمرهای مختلف [۹-۶].

Film	WTR ($g/m^2/day/atm$) at 38 °C, 90 % RH	(cm^3/m^2 d atm) for 25 m film at 25 C° نفوذپذیری		
		CO_2	N_2	O_2
Ethylene- vinyl Alcohol (EVAL)	16–18	–	–	3–5
PVdC–PVC Copolymer (Saran)	–	20–30	–	9–15
Low-density Polythene (PE- LD)	18	42.000	2800	7800
High-density Polyethylene PE-HD	7–10	7600	650	2600
Polypropylene Cast (PPcast)	10–12	10,000	680	3700
Polypropylene, Oriented (OPP)	6–7	8000	400	2000
Polypropylene, Oriented, PVdC Coated (OPP/PVdC)	4–5	35–50	8–13	10–20
Rigid Poly(Vinyl Chloride) PVC	30–40	450–1000	60–150	150–350
Plasticized Poly(Vinyl Chloride) (PVC P)	15–40	1500–46.000	300–10.000	500–30.000
Ethylene-Vinyl Acetate (EVAC)	40–60	50,000	4900	12.500
Polystyrene, Oriented (OPS)	100–125	18,000	800	5000
Polyurethane (PUR)	400–600	7000–25,000	600–1200	800–1500
PVdC–PVC Copolymer (Saran)	1.5–5.0	50–150	2–2.6	8–25
Polyamide (Nylon-6), (PA)	84–3100	150–190	14	40

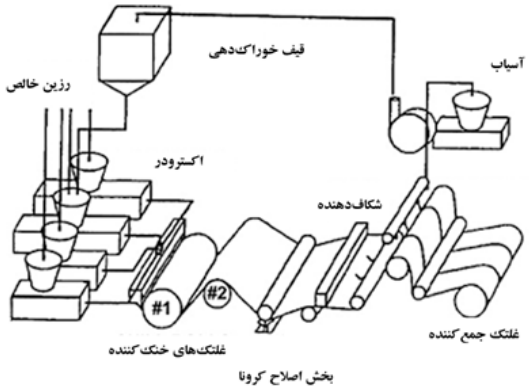
روش برای تهیه فیلم‌ها و کیسه‌های صنعتی، فیلم‌های سدکننده (Barrier) و غیره استفاده می‌شود. هم‌اکسترودکردن برای تولید فیلم‌های چندلایه بخش عمده‌ای از تولید فیلم دمشی را تشکیل می‌دهد. سامانه‌های هم‌اکسترودکردن می‌توانند تعداد دو تا نُه اکسترودر داشته باشند و فیلم با تعداد دو تا هفده لایه تولید کنند. اجزای اصلی خط تولید فیلم دمشی هم‌اکسترودکردن در شکل ۳ نشان داده شده است. این روش به دلیل انعطاف‌پذیری و توانایی تولید فیلم‌های با ویژگی‌های متنوع، به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف استفاده می‌شود.

فیلم ریخته‌گری

فرایند تولید فیلم ریخته‌گری (Cast Film) در مقایسه با فرایند فیلم دمشی، تفاوت‌های قابل‌توجهی دارد. در این روش، پس از خروج مواد مذاب از قالب، آن را روی یک یا چند غلتک فولادی خنک‌کننده سرد می‌کنند. این فرایند همچنین می‌تواند برای تولید ورق (Sheet) نیز استفاده شود، اما در خطوط تولید ورق، سرعت خط کندتر است و از چندین غلتک خنک‌کننده برای حذف حرارت لازم استفاده می‌شود. معمولاً تفاوت بین فیلم و ورق در ضخامت ۲۵۰ میکرون تعریف می‌شود؛ به‌طوری‌که فیلم ضخامتی کمتر از ۲۵۰ میکرون و ورق ضخامتی بیشتر از آن دارد. اجزای اصلی این فرایند در شکل ۴ نشان داده شده است. این فرایند به‌دلیل دقت بالا در کنترل ضخامت و کیفیت سطح، به‌طور گسترده‌ای در تولید فیلم‌های نازک و ورق‌های پلاستیکی استفاده می‌شود [۱۳].



شکل ۳ فرایند تهیه فیلم دمشی [۱۳].



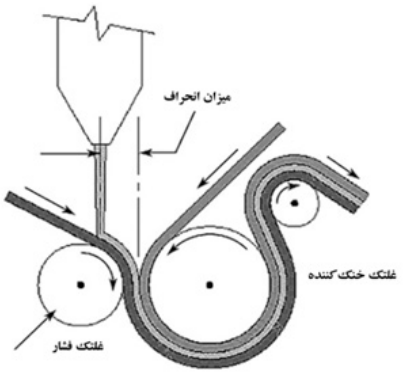
شکل ۴ فرایند تهیه فیلم ریخته‌گری [۱۳].

پوشش اکسترود و چندلاسازی

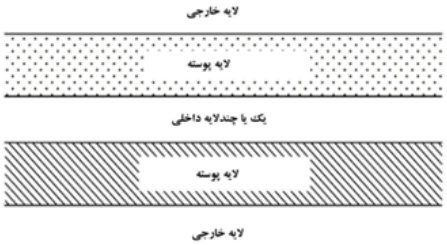
تفاوت اصلی بین پوشش‌دهی اکسترود (Extrusion Coating) و چندلاسازی اکسترود در حضور لایه‌ی دوم یا کمکی است که مذاب را از طرف دیگر پوشش می‌دهد. در پوشش‌دهی اکسترود، تنها از یک زیرلایه استفاده می‌شود و مذاب روی سطح آن پوشش داده شده و روی یک غلتک خنک‌کننده سرد می‌شود (مشابه فرایند فیلم ریخته‌گری). درحالی‌که در چندلاسازی اکستروژن، مذاب بین دو زیرلایه فشرده شده و سپس سرد می‌شود. معمولاً برای تهیه بسته‌بندی‌های پزشکی از این روش‌ها استفاده می‌شود.

افزودنی‌های فیلم چندلایه پلیمری

برای طراحی فیلم‌های چندلایه با کاربرد خاص، ویژگی‌های پلیمر اصلی باید به‌دقت اصلاح شود. این اصلاحات از طریق دو رویکرد اصلی انجام می‌شود: تغییر ساختار پلیمر و اضافه‌کردن مواد افزودنی. تغییر ساختار پلیمر شامل روش‌هایی مانند کوپلیمری‌کردن، آلیاژسازی پلیمری یا جایگزینی کامل یک پلیمر



شکل ۵ فرایند تهیه فیلم به روش چندلاسازی اکسترود [۱۳].



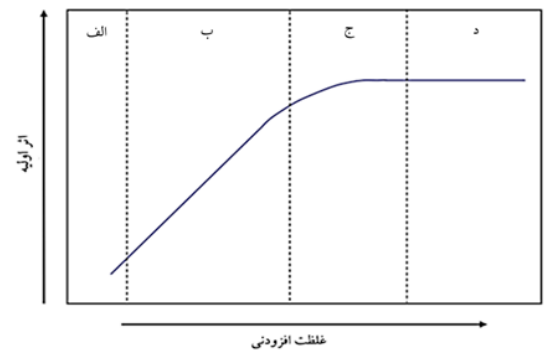
شکل ۶ ساختار فیلم چندلایه مرسوم [۱۳].

با پلیمر دیگر است. از سوی دیگر، مواد افزودنی به‌منظور بهبود، تثبیت یا تغییر خواص پلیمر به آن اضافه می‌شوند. افزودنی‌ها به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند؛

۱. تثبیت‌کننده‌ها: مانند ضد اکسایش‌ها و تثبیت‌کننده‌های UV که از تخریب پلیمر در برابر عوامل محیطی جلوگیری می‌کنند.
۲. اصلاح‌کننده‌ها: شامل عوامل لغزش، ضدچسبندگی، ضدالکتریسیته ساکن و براق‌کننده‌های نوری که عملکرد و خواص سطحی پلیمر را بهبود می‌بخشند.
۳. پرکننده‌ها: مانند تالک و گچ که خواص فیزیکی را بهبود داده یا هزینه‌ها را کاهش می‌دهند.

در ساخت فیلم‌های چندلایه، افزودنی‌ها لزوماً به همه لایه‌ها اضافه نمی‌شوند. به‌عنوان‌مثال، تثبیت‌کننده‌های UV فقط به لایه بیرونی (پوسته) اضافه می‌شوند. بااین‌حال، باید اثرات مهاجرت افزودنی‌ها بین لایه‌ها در نظر گرفته شود، زیرا این پدیده می‌تواند باعث کاهش غلظت افزودنی‌ها در لایه اولیه و توزیع ناهمگون آن‌ها در ساختار چندلایه شود؛ بنابراین، انتخاب و توزیع مناسب افزودنی‌ها در لایه‌های مختلف، همراه با درنظرگرفتن اثرات مهاجرت، برای دستیابی به خواص مطلوب در فیلم‌های چندلایه ضروری است (شکل ۶).

اثر هر افزودنی تحت‌تأثیر غلظت آن قرار دارد. بیشتر افزودنی‌ها وابستگی به غلظت را نشان می‌دهند. این رفتار به‌صورت منحنی اشباع نشان داده می‌شود. مطابق شکل ۷ (مرحله الف) در



شکل ۷ تأثیر غلظت بر اثرگذاری افزودنی [۱۳].

غلظت‌های پایین‌تر از حد بحرانی، هیچ اثر قابل اندازه‌گیری مشاهده نمی‌شود (مرحله ب) اثر اصلی افزودنی با افزایش غلظت، افزایش می‌یابد. (مرحله ج) اثر اصلی به حالت اشباع می‌رسد و افزایش بیشتر غلظت، اثرگذاری بیشتری را ایجاد نمی‌کند. (مرحله د) هیچ بهبود بیشتری در اثر ادامه افزایش غلظت مشاهده نشده و اثرات منفی ثانویه (مانند محدودیت حلالیت، رسوب و افزایش هزینه‌ها) ظاهر می‌شوند. در نتیجه استفاده بیش از حد از افزودنی نتیجه معکوس دارد. غلظت بهینه در مرحله ب یا ج قرار دارد و باید حاشیه ایمنی لازم برای دقت مقدار افزودنی در مقیاس صنعتی در نظر گرفته شود [۱۳].

ضد اکسایش‌ها

ضد اکسایش‌ها برای محافظت از بسترهای آلی در برابر تخریب حرارتی و اکسایش حرارتی در طول زمان انبارداری، فرایند شکل‌دهی یا عمر مفید در غیاب نور فرابنفش (نور خورشید) و حفظ خواص اولیه آن (ساختار مولکولی، ویژگی‌های ظاهری و غیره) استفاده می‌شود. اصطلاح پلی‌الفین (PO) شامل پلی‌پروپیلن (PP، عمدتاً همو پلیمرها و همچنین کوپلیمرهای تصادفی) و پلی‌اتیلن‌های مختلف (PE)، یعنی چگالی بالا (HDPE)، چگالی کم خطی (LLDPE) و چگالی کم (LDPE) است. اگرچه همه پلی‌اولفین‌ها فقط در الگوی اکسایش حرارتی مشابهی تجزیه می‌شوند، پایداری ذاتی متفاوتی را از خود نشان می‌دهند که پایداری حرارتی به‌ترتیب به‌صورت PP<HDPE<LLDPE<LDPE است.

پایدارکننده‌های UV

مواد پلیمری در طول عمر مفید خود به‌دلیل سازوکارهای مختلف دچار تخریب می‌شوند. علاوه بر تخریب حرارتی، اکسایش حرارتی (ناشی از اکسیژن و گرما) و تخریب ناشی از آب‌کافت، پرتو فرابنفش (UV) نیز می‌تواند موجب تخریب و اکسایش شود. مواد پلیمری که در فضای باز استفاده می‌شوند یا در معرض لامپ‌های UV قرار دارند، در معرض تخریب اکسایش نوری هستند. تثبیت‌کننده‌های UV یکی از ابزارهای مهم برای جلوگیری و کاهش اکسایش نوری (Photo-oxidative) هستند. تخریب اکسایش نوری اثری ناهمگن است که همیشه از سمتی که در معرض نور UV است، شروع می‌شود و به داخل نمونه گسترش می‌یابد. استفاده از ضد اکسایش‌ها می‌تواند مقاومت در برابر اکسایش نوری را بهبود بخشد. از تثبیت‌کننده‌های UV موجود دو مورد جذب UV (UV absorption) و پاک‌سازی رادیکال‌های آزاد (Free Radical Scavenging) برای کاربردهای بسته‌بندی انعطاف‌پذیر مناسب هستند. جاذب‌های UV نور فرابنفش را جذب کرده و آن را به‌صورت تابش کم‌ضررتر (گرما) پراکنده می‌کنند که برای تثبیت مواد بسته‌بندی مفید است. هنگامی که مواد در معرض عوامل مخرب مانند نور UV، گرما یا اکسیژن قرار می‌گیرند، رادیکال‌های آزاد تشکیل می‌شوند و باعث تخریب زنجیره‌ای مواد می‌شوند تثبیت‌کننده‌های رادیکال‌های آزاد با خنثی‌کردن این رادیکال‌ها، واکنش زنجیره‌ای را متوقف کرده و از تخریب بیشتر جلوگیری می‌کنند.

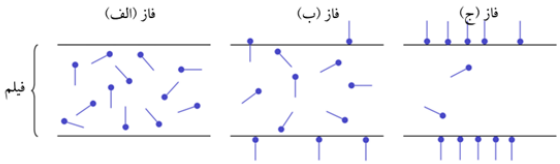
روشن‌کننده‌های نوری

مواد پلیمری که رنگ زرد کم‌رنگی دارند را می‌توان با افزایش نور آبی بازتاب شده (در محدوده ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر) سفیدتر و درخشان‌تر نشان داد. یکی از روش‌ها، استفاده از افزودنی‌هایی است که نور UV را جذب کرده و آن را در طول‌موج‌های بالاتر (مرئی) منتشر می‌کنند. این اثر به نام فلورسانس (Fluorescence) شناخته می‌شود و افزودنی‌های ایجادکننده آن، روشن‌کننده‌های نوری یا عوامل سفیدکننده فلورسنت (Fluorescent Whitening Agents) نامیده می‌شوند.

عوامل لغزش

لغزش زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌های فیلم پلیمری روی یکدیگر می‌لغزند. لغزش از طریق ضریب اصطکاک تعیین می‌شود. اگر فیلم‌ها دارای ضریب اصطکاک بالایی باشند، لایه‌های فیلم جداگانه دارای اصطکاک سطحی بالایی هستند و تمایل دارند به‌جای لغزش روی یکدیگر به هم بچسبند. این پدیده معمولاً استفاده از فیلم‌ها را نسبتاً دشوار می‌کند. چرا که منجر به چروک شدن لایه‌ها (ضایعات بیشتر) می‌شود. برای غلبه بر این موضوع، می‌توانیم از عوامل لغزش‌زا استفاده کنیم. افزودنی‌های لغزشی را می‌توان به دو دسته مهاجر (Migrating) و غیرمهاجر (Non-Migrating) تقسیم کرد.

در ابتدا، افزودنی لغزشی به‌طور یکنواخت در فیلم پخش شده و غلظت سطحی آن کم است (فاز الف)، در نتیجه ضریب اصطکاک بالا است. به‌دلیل سازگاری محدود با پلیمر، افزودنی لغزشی به سطح مهاجرت می‌کند و غلظت آن در سطح فیلم افزایش می‌یابد (فاز ب) و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. در حالت تعادل (فاز ج)، یک‌لایه پیوسته از مولکول‌های افزودنی لغزشی روی سطح فیلم تشکیل می‌شود و ضریب اصطکاک به حداقل مقدار خود می‌رسد. دو معیار اصلی، سرعت مهاجرت به سطح (زمان تا وقوع اثر لغزشی) و اثر لغزشی قابل‌دستیابی (حداقل ضریب اصطکاک) هستند.



شکل ۸ نحوه عملکرد افزودنی‌های لغزشی [۱۳].

افزودنی‌های لغزشی غیرمهاجر فقط در موارد خاص استفاده می‌شوند و به‌صورت خارجی اعمال می‌شوند. این روش باعث ایجاد اثر لغزشی فوری می‌شود و به‌نوعی به فاز ج تقلیل می‌یابد. کاربردهای معمول آن شامل بسترهای بسیار چسبنده و لایه بیرونی فیلم‌های چندلایه است (شکل ۸).

عوامل ضدچسبندگی

چسبندگی لایه‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌های مجاور فیلم به یکدیگر بچسبند. این یک اثر سطحی است و با نیروی لازم برای جداکردن دولایه فیلم تحت شرایط کنترل‌شده اندازه‌گیری می‌شود. نیروی بالاتر باعث دشواری در باز کردن فیلم پس از اکستروژن و جداسازی لایه‌ها پس از ذخیره‌سازی (چسبندگی مجدد) می‌شود. برای حل این مشکل، از افزودنی‌های ضدچسبندگی استفاده می‌شود. افزودنی‌های ضدچسبندگی به دودسته اصلی تقسیم می‌شوند؛

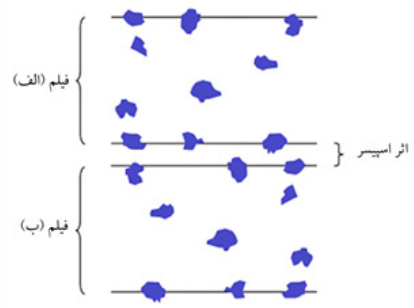
۱. غیرآلی (معدنی): این افزودنی‌ها که از نظر شیمیایی بی‌اثر هستند، رایج‌ترین نوع بوده و با مهاجرت به سطح فیلم و ایجاد زبری میکروسکوپی، از چسبندگی لایه‌ها جلوگیری می‌کنند.

۲. آلی: سازوکار دقیق عملکرد این افزودنی‌ها به‌طور کامل شناخته نشده است، اما تصور می‌شود که با تشکیل لایه مانع روی سطح فیلم، از چسبندگی لایه‌ها جلوگیری می‌کنند (شکل ۹).

عوامل ضد بار ساکن

هنگامی که دو پلیمر با یکدیگر در تماس هستند و اصطکاک ایجاد می‌شود، بارهای الکتریکی ساکن می‌توانند تشکیل شوند. این بارها می‌توانند تأثیرات مختلفی بر قطعات پلاستیکی داشته باشند؛ از جمله جذب ذرات گردوغبار. برای مقابله با این اثر، از افزودنی‌های ضد بار ساکن استفاده می‌شود. این اثر عمدتاً پدیده‌ای سطحی است، اگرچه یکی از راه‌های مقابله (مثلاً استفاده از پرکننده‌های رسانا) آن را به یک اثر حجمی تبدیل می‌کند. روش‌های کاهش بارهای الکتریکی ساکن و افزایش رسانایی پلیمر به سه دسته تقسیم می‌شوند؛

۱. ضد بار ساکن خارجی (اثر سطحی): روی سطح قطعه پلاستیکی اعمال می‌شود و مشابه افزودنی‌های لغزشی غیرمهاجر



شکل ۹ نحوه عملکرد عوامل ضدچسبندگی آلی [۱۳].

عمل می‌کند.

۲. پرکننده‌های رسانا (اثر حجمی و سطحی): در بستر آلی قرار گرفته و شبکه‌ای رسانا در مولکول ایجاد می‌کنند.

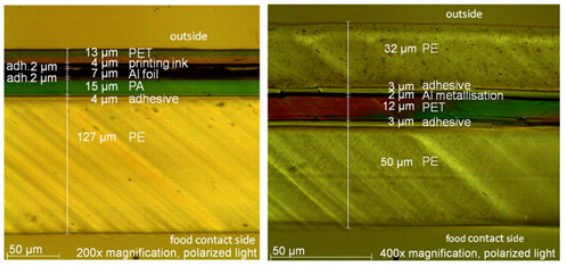
۳. ضد بار ساکن داخلی (اثر سطحی): به بستر آلی اضافه شده و به سطح قطعه پلاستیکی مهاجرت می‌کند و مشابه افزودنی‌های لغزشی مهاجر عمل می‌کند؛ اما جهت‌گیری مولکول‌ها برعکس است، به‌طوری که بخش قطبی بار ساکن به سمت بیرون قرار می‌گیرد. این بخش قطبی رطوبت را جذب کرده و لایه‌ی نازک آب روی سطح ایجاد می‌کند که بارهای الکتریکی ساکن را تخلیه می‌کند [۱۳].

شناسایی پلیمرهای مورد استفاده در فیلم‌های چندلایه

برای شناسایی اجزای فیلم‌های چندلایه پلیمری نیازمند بهره‌گیری از رویکردهای مختلف در راستای مشخص کردن عوامل تعیین‌کننده در خواص فیلم خواهیم بود. تفکیک و شناسایی مواد پلیمری بر اساس تفاوت در خواص حرارتی، فیزیکی مکانیکی و شناسایی طیف‌های IR از جمله این روش‌ها به‌حساب می‌آیند [۱۲].

برش نازک‌بُر و تصویربرداری میکروسکوپی

برای مشاهده تعداد لایه‌ها می‌توان یک برش نازک‌بر (Micro-tome) به ضخامت ۵ میکرومتر از نمونه تهیه کرده و توسط میکروسکوپ نور عبوری با نور قطبیده مورد بررسی قرارداد. توسط این روش تعداد لایه‌ها را می‌توان مشخص کرد. لایه‌های چسب در فیلم‌های چندلایه به‌صورت لایه‌های نازک باضخامت حدود ۱-۳ میکرومتر قابل‌مشاهده هستند. از طریق تفاوت رنگ لایه‌ها در نور قطبیده می‌توان شناسایی لایه‌ها را انجام داد. در شرایطی که میکروسکوپ نور قطبیده در دسترس نباشد، میکروسکوپ نوری نیز می‌تواند برای مشخص کردن تعداد لایه‌ها مورد استفاده قرار بگیرد [۱۲].



شکل ۱۰ تصویر برش مقطعی نازک‌بر از فیلم پلاستیکی چندلایه زیر نور قطبیده [۱۲]..

شناسایی لایه از طریق طیف‌سنجی فروسرخ ATR-FTIR

آزمون طیف‌سنجی فروسرخ برای هر یک از مواد پلیمری در محدوده ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ (ناحیه اثر انگشت) طیف متمایز به خود را ارائه می‌دهد. بدین صورت با انجام آزمون از نمونه پلیمری و تطابق طیف به‌دست‌آمده با طیف سایر پلیمرها می‌توان شناسایی لایه‌های فیلم چندلایه را انجام داد. انجام این آزمون زمانی مفید خواهد بود که برای شناسایی تک‌لایه‌های پلیمری، لایه‌های فیلم چندلایه را جدا کرده و آزمون برای هر لایه به‌تنهایی صورت پذیرد تا ماهیت هر لایه مشخص شود [۱۲].

جداسازی لایه‌ها

شناسایی و جداسازی لایه‌های مختلف فیلم می‌تواند با استفاده از حلال‌های مناسب صورت پذیرد. از طریق حل‌کردن لایه چسب، می‌توان جداسازی لایه‌ها را انجام داد. ۵ تا ۱۰ میلی‌لیتر از حلال را داخل بشر ریخته و نمونه‌ها را داخل ظرف قرار دهید سپس توسط شیشه ساعت درب ظرف را پوشانده و برای تسریع در انجام فرایند، نمونه‌ها را روی گرم‌کن‌همزن (Heater Stirrer) حرارت دهید. نمونه‌ها را حرارت داده تا حلال به نقطه جوش خود برسد (باید توجه داشت در مواردی که دمای ذوب پلیمر بسیار پایین‌تر از دمای جوش حلال باشد، تخریب اتفاق خواهد افتاد). باتوجه به نوع پلیمرمورد نظر ممکن است ۵ تا ۱۰ دقیقه طول بکشد تا پلیمر (لایه چسب) به‌طور کامل در حلال حل شود. سپس نمونه را از حلال خارج کرده و لایه‌ها را به‌آرامی از یکدیگر جدا کنید در انتها توسط حلال غیرسمی نمونه را شست‌وشو دهید [۱۲].

شناسایی لایه‌ها از طریق آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)

مشخصات لایه‌های پلیمری جداشده را می‌توان از طریق تعیین نقطه ذوب و برای تأیید با نتایج FTIR تعیین کرد. آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی قادر است تا میان پلیمرها با انواع مختلف تمایز قائل شده و باتوجه‌به تفاوت در نقطه ذوب شناسایی هر لایه را میسر سازد. در جدول ۴ به مشخصات حرارتی تعدادی از مواد پلیمری اشاره شده است [۱۲].

نتیجه‌گیری

بسته‌بندی چندلایه پلیمری به‌عنوان راه‌حل مؤثر در صنایع پزشکی و غذایی، با ارائه خواص برتر مانند سدکنندگی در برابر گازها، رطوبت و آلودگی، نقش مهمی در حفظ کیفیت

جدول ۴ دمای ذوب و دمای انتقال شیشه‌ای برخی از پلیمرهای پرکاربرد [۱۲].

Polymer	Tg [°C]	Tm [°C]
Polyethylene	-100	105-113 (LDPE)
		120 (LLDPE)
		135 (HDPE)
Polypropylene	-5	160
Polyvinylchloride	80	-
Polyvinylidene chloride	-18	190
Atactic Polystyrene	95	-
Isotactic Polystyrene	100	230
Polyethylene Terephthalate	67	256
Polycarbonate (Made of Bisphenol	150	225
Polyamide 6	50	215
Polyamide 66	60	266
Ethylene Vinyl Acetate	-	80-100 (Depends on EA Content)

و ایمنی محصولات ایفا می‌کند. این فیلم‌ها از ترکیب لایه‌های مختلف پلیمری تشکیل شده‌اند که هر یک عملکرد خاصی مانند مقاومت مکانیکی، انعطاف‌پذیری و قابلیت مهروموم شدن را ارائه می‌دهند. فرایندهای تولید مانند هم‌اکسترود و چندلا سازی، امکان ایجاد ساختارهای پیچیده با خواص مطلوب را فراهم می‌کنند. استفاده از افزودنی‌هایی مانند ضد اکسایش‌ها، تثبیت‌کننده‌های UV و عوامل لغزش، عملکرد بسته‌بندی را بهبود بخشیده، عمر مفید محصولات را افزایش می‌دهد. شناسایی و جداسازی لایه‌های پلیمری با روش‌های پیشرفته‌ای مانند میکروسکوپی، طیف‌سنجی فروسرخ (FTIR) و گرماسنجی تفاضلی (DSC) امکان‌پذیر است. این فناوری‌ها نه‌تنها به بهینه‌سازی طراحی بسته‌بندی کمک می‌کنند، بلکه با کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کارایی، نقش کلیدی در توسعه صنایع مرتبط ایفا می‌کنند. در نهایت، بسته‌بندی چندلایه پلیمری به‌عنوان راه‌حلی پایدار و اقتصادی، به بهبود کیفیت و ایمنی محصولات در صنایع مختلف منجر شده است.

مراجع

1. Robertson, G.L. Food Packaging: Principles and Practice, Third Edition (3rd ed.). CRC Press. University of Queensland, Brisbane, Australia. https://doi.org/10.1201/b21347, **2012**.
2. Marsh K., Bugusu B., Food Packaging—roles, Materials, and Environmental issues, *J. Food Sci*., 72, 3, R39–R55, **2007**.
3. Jadhav S., Gyan S., and Univeristy V., Study of Different Methods of Pharmaceutical Packaging. Sapana,vol. XV, no. February, pp. 254–277, **2023**.
4. Rydzkowski T., Wróblewska-KrepsztulJ ., Thakur V. K., and Królikowski T., Current Trends of Intelligent, Smart Packagings in new Medical Applications, *Procedia Comput. Sci*., 207, 1271–1282, 2022, doi: 10.1016/j.procs. .09.183, **2022.**
5. Hasanvand A., A Review of Multilayer Flexible Packaging Structures, *J. Packag. Sci. Technol.*, 14, 45–56, **2023**.
6. Kim, Young & Min, Byungjin & Kim, Kyung. General Characteristics of Packaging Materials for Food System. 10.1016/B978-0-12-394601-0.00002-3., **2014**.
7. Roy S., Ghosh T., Zhang W., and Rhim J. W., Recent Progress in PBAT-based Films and Food Packaging Applications: A Mini-review, *Food Chem.*, 437, 137822, 2024, doi: 10.1016 137822, **2023.**
8. Bang G., Kim S. W., Biodegradable Poly(lactic acid)-based Hybrid Coating Materials for Food Packaging Films with Gas Barrier Properties, *J. Ind. Eng. Chem.,* 18, 1063–1068, 2012, doi: 10.1016/j.jiec, 12.004, **2011**.
9. Ščetar M., Kurek M., and Galić K, Trends in Fruit and Vegetable Packaging, Univ. Zagreb. Fac. Food Technol. Biotechnol. Pierottijeva 6, 10000 Zagreb. Croat., 5, 69–86, **2010**.
10. Ščetar, M. Multilayer Packaging Materials. Packaging Materials and Processing for Food, *Pharmaceuticals and Cosmetics,* 131-144. **2021**.
11. Yam, K. L. (Ed.). The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology. John Wiley & Sons. **2010**.
12. Mieth, A., Simoneau, C., & Hoekstra, E. Guidance for the Identification of Polymers in Multilayer Films Used in Food Contact Materials : User Guide of Selected Practices to Determine the Nature of Layers, Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2788/10593, **2016**.
13. Wagner Jr., J.R. Multilayer Flexible Packaging: Technology and Applications for the Food, Personal Cares, and Over-the-Counter Pharmaceutical. William Andrew. https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2021-4.10019-X. **2009**.