

استفاده از تیمار پلاسمای سرد به منظور تولید فیلم‌های دولایه پلی‌اتیلن با چگالی کم/ پروتئین میوفیبریل حاوی عصاره چای سبز

راضیه رئیسی^۱، بهاره شعبان پور^{۱*}، محمدرضا خانی^۲، پرستو پورعاشوری^۱، سمیرا تاجیک نژاد^۳، بابک شکری^۲

۱- گروه عمل آوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- گروه فیزیک، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- گروه شیمی و فیزیک، دانشکده علوم پایه و فنی مهندسی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

چکیده

نوع مقاله

مقاله پژوهشی اصیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰

تاریخ چاپ الکترونیکی:

۱۴۰۴/۰۹/۲۴

*نویسنده مسئول:

Shabanpour@gau.ac.ir

b_shabanpour@yahoo.com

در این مطالعه از تیمار پلاسما برای اصلاح سطحی فیلم پلی‌اتیلن با چگالی کم استفاده شد و سپس با پروتئین میوفیبریل ماهی حاوی عصاره چای سبز پوشش داده شد و مجدداً تحت تیمار پلاسما قرار گرفت. ویژگی‌های فیلم‌های دولایه (شامل: زاویه تماس، ضخامت، انحلال‌پذیری در آب، مکانیکی و نفوذپذیری بخار آب) قبل و بعد از تیمار پلاسما انجام شد. نتایج نشان داد که تیمار پلاسما منجر به کاهش قابل توجهی در میزان نفوذپذیری بخار آب فیلم‌ها شد. همچنین زاویه تماس آب فیلم‌ها پس از تیمار پلاسما به طور معنی‌داری از $54 \pm 15^\circ$ به $73 \pm 55^\circ$ و $1/25 \pm 85/3^\circ$ افزایش پیدا کرد که نشان دهنده کاهش آب‌دوستی فیلم‌ها بود. با این حال، همه نتایج زیر ۹۰ درجه بود و بنابراین، سطح همچنان آب‌دوست ماند. بررسی نتایج حاصل از انحلال‌پذیری، اختلاف معنی‌داری بین فیلم‌های تیمار شده و تیمار نشده با پلاسما نشان نداد (از $17/02 \pm 0/621$ درصد به $12/74 \pm 0/205$ درصد کاهش پیدا کرد). ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌ها پس از تیمار با پلاسما تفاوت معنی‌داری پیدا نکرد که نشان می‌دهد که تیمار پلاسما تأثیر معنی‌داری بر انعطاف‌پذیری کلی فیلم‌ها نداشت. طبق نتایج به دست آمده تیمار پلاسما پتانسیل بالایی در اصلاح ویژگی‌های فیلم‌ها دارد که باید با توجه به نوع فیلم، تعدیل‌سازی پارامترهای آن انجام شود تا نتایج مطلوب مورد نظر حاصل شود.

کلید واژه‌ها: پلی‌اتیلن با چگالی کم، فیلم دولایه، پوشش‌دهی، تیمار پلاسما، عصاره چای سبز،

بسته‌بندی فعال

مقدمه

بسته‌بندی مرحله مهمی در تهیه محصولات غذایی برای حمل و نقل، جابه‌جایی و نگهداری است [۱]. پلاستیک‌هایی مانند پلی‌اتیلن، پلی‌استایرن، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌وینیل کلرید، به دلیل کم هزینه بودن، راحتی، فرآیندپذیری و خواص فیزیکوشیمیایی بسیار عالی در این زمینه کاربرد زیادی دارند [۲]. با وجود این، از آنجا که مواد شیمیایی خاصی که برای بسته‌بندی مصنوعی استفاده می‌شود، مختل کننده غدد درون ریز هستند، منجر به ایجاد گازهای گلخانه‌ای می‌شوند [۳]، دارای قابلیت تجزیه زیستی نیستند و همچنین میزان بازیافت آن‌ها کم است (کمتر از ۱۴ درصد) [۲] بنابراین، تقاضا برای بسته‌بندی‌های سازگار با محیط زیست افزایش یافته است [۳].

پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر از منابع تجدیدپذیر به دلیل مزایای محیط زیستی، پتانسیل قابل توجهی در کاربردهای بسته‌بندی نشان داده‌اند [۳]. موادی که معمولاً برای بسته‌بندی مواد غذایی مورد بررسی قرار می‌گیرند، پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و لیپیدها هستند [۴]. پروتئین‌های میوفیبریل ماهی دارای قابلیت ایجاد شبکه‌های کمی شفاف با قابلیت شکل‌پذیری و کشسانی هستند و خاصیت سد اکسیژن، اشعه ماوراء بنفش

[۲] و مقاومت کششی [۵] خوبی دارند. با این حال، استفاده صنعتی از بیوپلیمرهای طبیعی به عنوان بسته‌بندی مواد غذایی به دلیل سد حرارتی، مکانیکی و بخار آب ضعیف آن‌ها محدود شده است [۶]. برای به‌دست آوردن مزایای هر دو نوع پلی‌مر (طبیعی و مصنوعی)، تولید یک فیلم دولایه با روکش پلی‌مر طبیعی روی مصنوعی یک راه حل مناسب است. با این حال، اتصال تکنیکی این لایه‌ها به‌دلیل ماهیت متفاوتشان یک چالش است. بنابراین، پوشش بیوپلیمرهای آب‌دوست روی فیلم‌های آب‌گریز با پیش تیمارسازی که انرژی سطح پلیمرها را افزایش می‌دهد، بهبود می‌یابد [۷].

پلاسمای سرد یکی از انواع تکنیک‌های مختلف است که توجه زیادی را برای تیمارهای سطح از جمله عملکرد یا اصلاح پلیمرها به خود جلب کرده است [۸]. فن‌آوری پلاسما می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌تیمار برای تولید فیلم‌های دولایه مورد استفاده قرار گیرد، زیرا اتصال فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر طبیعی به لایه پلی‌مری مصنوعی را تسهیل می‌کند. این می‌تواند منجر به کاهش ضخامت فیلم مصنوعی یا به عبارت دیگر، کاهش استفاده از مواد مصنوعی شود [۶]. همچنین پلاسما می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد برای بهبود عملکرد کلی فیلم‌های پروتئینی ماهی به کار برود [۲]. اصطلاح پلاسما به یک گاز یونیزه نیمه‌خنثی حاوی الکترون‌های آزاد، فوتون‌ها، یون‌ها و اتم‌ها در حالت بنیادی یا برانگیخته با بار خنثی خالص گفته می‌شود [۸].

علاوه بر این، امروزه در استفاده از مواد نگهدارنده مصنوعی برای افزایش مدت ماندگاری مواد غذایی تجدید نظر شده و علاقه به استفاده از نگهدارنده‌های طبیعی افزایش یافته است [۹]. عصاره‌ها و اسانس‌های گیاهی دارای خاصیت ضدباکتریایی و ضداسکایسی هستند [۱۰]. بخش بیوپلی‌مر فیلم‌های دولایه می‌تواند به‌عنوان یک حامل مناسب برای این گونه مواد باشد [۶]. ثابت شده است که این روش نسبت به روش‌های دیگر (مانند غوطه‌ور کردن و اسپری کردن) مؤثرتر است [۱۱]. فعالیت ضداسکایسی عصاره چای سبز (*Camellia sinensis*) به‌خوبی اثبات شده است [۱۲].

در مطالعات مختلف اثر انواع تیمارهای پلاسما بر خواص فیلم‌های مصنوعی و خوراکی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اطلاعات مورد بررسی، تاکنون هیچ مطالعه‌ای درمورد اثر استفاده از پلاسمای سرد برای بهبود اتصال بین پوشش پروتئین میوفیبریل ماهی و فیلم پلی‌اتیلنی و کاربرد پلاسما برای کاهش حساسیت به آب لایه پروتئینی پوشش‌دهی شده روی لایه پلی‌اتیلنی گزارش نشده است. بنابراین، هدف از این مطالعه تولید فیلم دولایه متشکل از پلی‌اتیلن تیمار شده با پلاسما و پروتئین میوفیبریل ماهی حاوی عصاره چای سبز و کاربرد پلاسما برای کاهش حساسیت به آب لایه پروتئینی و ارزیابی ویژگی‌های این فیلم‌های دولایه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد:

فیلم پلی‌اتیلنی با چگالی کم از شرکت آیس پلاست، ماهی کاراس از بازار ماهی فروشان شهر گرگان، چای سبز از یک فروشگاه در شهر گرگان، ۲،۲-دی فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH)، متانول، اسید هیدروکلریک ۳۷ درصد و گلیسرول از شرکت مرک آلمان خریداری شدند. فیلم‌های پلی‌اتیلنی به قطر ۱۲ سانتی‌متر برش داده شدند، سپس برای حذف گرد و غبار یا ترکیبات روغنی از سطح آن‌ها قبل از تیمار با پلاسما با الکل تمیز، با آب مقطر شسته و خشک شدند [۱۳]. سپس فیلم‌ها با استفاده از دستگاه پلاسمای اتمسفری (مدل Enhancedtech-18A- شرکت کاوش یاران فن پویا-ایران) با ولتاژ ورودی ۲۰۰ ولت به مدت ۵ دقیقه تیمار شدند. این دستگاه از نوع تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD)^۱

^۱ Dielectric Barrier Discharge

بود و تیمار با گاز اتمسفر و در دما و فشار محیط انجام شد. سپس، فیلم‌های تیمار شده حدود ۲ دقیقه در معرض هوا قرار گرفتند تا رادیکال‌های آزاد ایجاد شده روی سطح فیلم با مولکول‌های هوا واکنش داده و گروه‌های عاملی فعال را تشکیل دهند.

ابتدا مینس از عضله ماهی کاراس (*Carassius aratus*) تهیه شد و با آب مقطر به نسبت ۱:۵ (وزنی/حجمی) مخلوط و با استفاده از هموژنایزر هموژن شدند. سپس محلول‌سازی اسیدی در pH ۳ (با استفاده از محلول اسید هیدروکلریک ۱ مولار) انجام شد. این مخلوط به مدت ۲۰ دقیقه در یخچال (دمای ۴ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شد. سپس سانتریفیوژ در ۷۵۰۰×g به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد تا فاز میانی (پروتئین‌های محلول) از لیپیدها و مواد نامحلول جدا شود [۱۴]. سپس گلیسرول به عنوان پلاستی‌سایزر به مقدار ۳۰ درصد (وزنی/وزنی) و عصاره چای سبز به مقدار ۶ درصد (وزنی/وزنی) پروتئین به این محلول اضافه و مجدداً pH محلول به ۳ تنظیم شد. به منظور یک دست شدن، این محلول به مدت ۳۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس، فیلم‌های پلی‌اتیلنی تیمار شده با پلازما، درون پلیت‌های شیشه‌ای قرار داده شدند و محلول فیلم‌ساز نهایی در مرکز فیلم‌ها ریخته شد [۷] و در آن دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. فیلم‌های خشک شده از پلیت‌ها جدا شده و درون دسیکاتور حاوی سیلیکاژل در دمای محیط نگهداری شدند [۲]. سپس سطح فیلم‌های دولایه (قسمت پوشش داده شده با پروتئین) تحت تیمار پلازما با ولتاژ ورودی ۲۰۰ ولت به مدت ۵ دقیقه قرار گرفتند. فیلم‌ها پس از تیمار با پلازما در کیسه‌های پلاستیکی زیپ کیپ قرار گرفتند تا از آن‌ها در برابر محیط آنتی‌استاتیک و ذرات گرد و غبار محافظت شود [۱۱]. سپس درون دسیکاتور با رطوبت نسبی ۵۳ درصد در دمای محیط نگهداری شدند [۷]. برگ‌های چای سبز با استفاده از مخلوط کن آسیاب شدند و بلافاصله پس از خرد شدن برای تهیه عصاره استفاده شدند. محلول عصاره آبی چای سبز با مخلوط کردن پودر چای سبز در آب مقطر (۱:۱۰ وزنی/وزنی) در یک فلاسک ارلن مایر تهیه شد. سپس در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه در یک حمام آب تکان دهنده هم زده شد (با ۱۰۰ دور در دقیقه). عصاره آبی چای سبز از طریق کاغذ صافی واتمن شماره ۱ با استفاده از دستگاه فیلتر تحت خلأ فیلتر [۱۵] و سپس خشک شد.

زاویه تماس استاتیک فیلم‌های پلی‌اتیلنی و لایه پروتئینی پوشش داده شده روی آن‌ها (لایه دوم)، به روش قطره چسبیده با استفاده از یک آنالیزور زاویه تماس (PGX, FIBRO System AB، سوئد) انجام شد. اندازه‌گیری‌ها قبل و پس از تیمار پلازما در دمای محیط انجام شد. به این منظور، ۴/۵ میکرولیتر آب مقطر با استفاده از میکروسرنج دستگاه روی سطح فیلم‌ها قرار داده شد. تصویر هر قطره با استفاده از دوربین متصل به کامپیوتر گرفته شد. میانگین زاویه‌های تماس به دست آمده برای هر نمونه گزارش شد [۱۶].

برای اندازه‌گیری ضخامت فیلم‌ها از یک میکرومتر دیجیتالی با حساسیت ۰/۰۰۱ میلی‌متر استفاده شد. اندازه‌گیری در ۱۰ نقطه تصادفی مختلف از هر فیلم انجام و میانگین آن محاسبه و گزارش شد [۱۴].

مقدار حلالیت در آب فیلم‌ها طبق روش Moradi و همکاران [۷] اندازه‌گیری شد. ابتدا وزن اولیه فیلم‌ها با خشک کردن اولیه تکه‌های فیلم (۲×۲ سانتی‌متر) در آن دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد (تا رسیدن به وزن ثابت) تعیین شد. سپس نمونه‌های فیلم در ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر تحت هم زدن مداوم به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شدند. نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی، فیلتر شدند و قسمت باقی مانده (مواد نامحلول) در آن دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. انحلال‌پذیری در آب فیلم‌ها سه بار برای هر نوع فیلم انجام، طبق فرمول زیر محاسبه و براساس درصد گزارش شد.

$$\% \text{ انحلال پذیری در آب} = \frac{\text{وزن خشک نهایی} - \text{وزن خشک اولیه}}{\text{وزن خشک اولیه}} \times 100$$

اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی شامل قدرت کششی و مدول فیلم‌ها طبق روش Moosavi و همکاران [۸] انجام شد. این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه کشش (شرکت سنتام، مدل STM-1، ایران) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد طبق استاندارد ASTM انجام شد. ابتدا فیلم‌ها به

شکل نوارهایی با عرض ۱۵ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر برش داده شدند و ضخامت آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس بین دو فک دستگاه ثابت شدند. فاصله اولیه بین فک‌های دستگاه ۵۰ میلی‌متر و سرعت حرکت آن‌ها ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. اعمال نیرو تا زمانی که لایه‌های فیلم پاره شوند ادامه یافت. اندازه‌گیری برای هر نمونه سه بار انجام و میانگین آن‌ها محاسبه و گزارش شد.

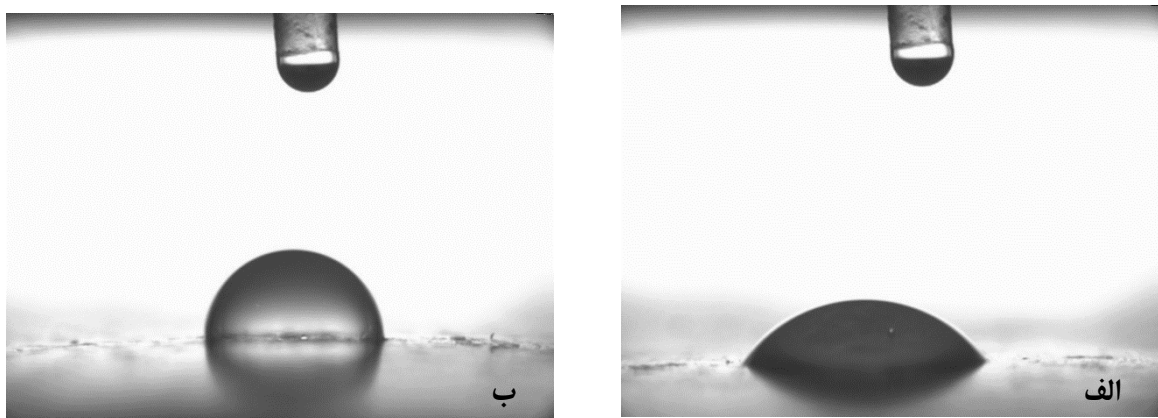
میزان نفوذپذیری فیلم‌ها در برابر بخار آب با استفاده از روش Dong و همکاران [۱۷] اندازه‌گیری شد. مقدار آن طبق فرمول زیر محاسبه و براساس $\text{gm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ گزارش شد.

$$\text{WVP}\% = \frac{\text{ضخامت} \times \text{اختلاف وزن}}{\text{زمان اختلاف} \times \text{فشار} \times \text{مساحت}} \times 100$$

تمامی آزمون‌ها با سه تکرار انجام شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS vs. 22 در قالب طرح کاملاً تصادفی به کمک آزمون t-test مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج

شکل ۱ تصاویر قطرات آب مقطر بر روی سطح فیلم‌های تیمار نشده (الف) و تیمار شده (ب) با پلاسما را نشان می‌دهد. زاویه تماس اندازه‌گیری شده روی سطح فیلم LDPE/Pr پس از تیمار پلاسما از $54 \pm 55/73$ درجه به $25 \pm 85/3$ درجه افزایش یافت ($P < 0/05$).



شکل ۱- زاویه تماس فیلم‌های دولایه؛ تیمار نشده (الف) و تیمار شده با پلاسما (ب).

اندازه‌گیری مقدار ضخامت برای ارزیابی تغییر ضخامت با استفاده از تیمار پلاسمای سرد DBD استفاده شد و مقادیر آن در جدول ۱ بیان شد. ضخامت فیلم‌های تیمار نشده $0/139 \pm 0/002$ میلی‌متر و ضخامت فیلم‌های تیمار شده $0/146 \pm 0/007$ میلی‌متر بود. بنابراین، تیمار پلاسما تأثیر معنی‌داری بر ضخامت فیلم‌ها نداشت ($P > 0/05$).

نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان حلالیت فیلم‌ها در جدول ۱ گزارش شده است. از آنجایی که جزء سنتزی کاملاً نامحلول در آب است، حل‌پذیری فیلم‌های دولایه وابسته به جزء خوراکی آن می‌باشد [۱۸]. حلالیت فیلم‌ها پس از تیمار با پلاسما کاهش معنی‌داری نداشت ($P > 0/05$).

جدول ۱- ضخامت و درصد انحلال‌پذیری در آب فیلم‌های تیمار نشده و تیمار شده با پلاسما.

نوع فیلم	ضخامت (mm)	انحلال پذیری در آب (%)
LDPE/Pr-ut	$0/139 \pm 0/002^a$	$17/02 \pm 0/621^a$
LDPE/Pr-pt	$0/146 \pm 0/007^a$	$12/74 \pm 0/205^a$

LDPE/Pr-ut: فیلم دولایه پلی اتیلنی پوشش داده شده با پروتئین میوفیبریل بدون تیمار پلاسما

LDPE/Pr-pt: فیلم دولایه پلی اتیلنی پوشش داده شده با پروتئین میوفیبریل تیمار شده با پلاسما

جدول ۲ ویژگی‌های مکانیکی (شامل: قدرت کششی و مدول) فیلم‌های دولایه را نشان می‌دهد. استحکام کششی و مدول فیلم‌ها پس از تیمار پلاسما کاهش معنی‌داری پیدا نکرد ($P>0/05$).

جدول ۲- ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌های تیمار نشده و تیمار شده با پلاسما.

نوع فیلم	استحکام کششی (MPa)	مدول (MPa)
LDPE/Pr-ut	12/75±0/23 ^a	1/59±0/236 ^a
LDPE/Pr-pt	11/31±0/129 ^a	1/56±0/241 ^a

LDPE/Pr-ut: فیلم دولایه پلی‌اتیلنی پوشش داده شده با پروتئین میوفیبریل بدون تیمار پلاسما
LDPE/Pr-pt: فیلم دولایه پلی‌اتیلنی پوشش داده شده با پروتئین میوفیبریل تیمار شده با پلاسما

جدول ۳ مقایسه‌ای از میزان نفوذپذیری نسبت به بخار آب (WVP) در فیلم‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. فیلم LDPE/Pr در حالت تیمار شده با پلاسما نفوذپذیری کمتری در برابر بخار آب نسبت به فیلم LDPE/Pr بدون تیمار پلاسما داشت ($P<0/05$) ($3/9537 \times 10^{-7}$).
جدول ۳- ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌های تیمار نشده و تیمار شده با پلاسما.

نوع فیلم	نفوذپذیری نسبت به بخار آب ($gs^{-1}m^{-1}Pa^{-1}$)
LDPE/Pr-ut	1/4481±0/032 ^a
LDPE/Pr-pt	3/9537±0/033 ^b

LDPE/Pr-ut: فیلم دولایه پلی‌اتیلنی پوشش داده شده با پروتئین میوفیبریل بدون تیمار پلاسما
LDPE/Pr-pt: فیلم دولایه پلی‌اتیلنی پوشش داده شده با پروتئین میوفیبریل تیمار شده با پلاسما

بحث و نتیجه‌گیری

درجه آب‌دوستی یا آب‌گریزی سطوح ساده و تیمار شده را می‌توان با اندازه‌گیری زاویه تماس آب به دست آورد [۱۹]. زاویه تماس یک متغیر مهم است که ترشوندگی سطح را با ارزیابی تمایل قطره مایع به پخش شدن روی یک ماده مسطح نشان می‌دهد [۱۷]. زاویه تماس زیر ۹۰ درجه مربوط به آب‌دوستی سطح و بیش از ۹۰ درجه مربوط به آب‌گریزی سطح است. بنابراین، می‌توان پی برد که فیلم آزمایش شده با زاویه تماس $55/73 \pm 1/54$ نشان دهنده ترشوندگی بالا است [۲۰]. پس از قرار دادن فیلم‌ها در معرض پلاسما به مدت ۵ دقیقه، افزایش قابل توجهی ($P<0/05$) در زاویه تماس آب مشاهده شد (از $55/73 \pm 1/54$ درجه به $85/3 \pm 1/25$ درجه). افزایش معنی‌دار زاویه تماس تایید کرد که تیمار پلاسما برای کاهش آب‌دوستی یا بهبود آب‌گریزی سطح پروتئینی مؤثر است [۲۱]. با این حال، علی‌رغم افزایش قابل توجه زاویه تماس، همه نتایج زیر ۹۰ درجه بود و بنابراین، سطح همچنان آب‌دوست ماند [۲۲]. سطوح با زوایای تماس بالاتر را می‌توان با ساختار بندی سطوح با زبری مناسب به دست آورد [۲۲]. مطالعات قبلی نیز گزارش کرده‌اند که پلاسما می‌تواند به عنوان یک روش اصلاح سطح مؤثر (کاهش آب‌دوستی) برای سایر فیلم‌های پروتئینی مانند فیلم‌های تهیه شده از سویا [۲۳] و گلوتن [۸] عمل کند. هرچند که در فیلم‌های تهیه شده از گلوتن کاهش آب‌دوستی فیلم‌ها چشمگیر نبود. محققان دلیل آن را ویژگی آب‌دوست زیاد گلوتن دانستند. همچنین در مطالعه Goiana و همکاران [۲۲] نیز افزایش زاویه تماس فیلم‌های نشاسته ذرت با تیمار پلاسما گزارش شد. با این حال، برخی از مطالعات کاهش زاویه تماس فیلم‌های طبیعی را پس از تیمار پلاسما مشاهده کردند [۸، ۱۷، ۲۴-۲۵]. ضخامت فیلم‌ها پس از تیمار با پلاسما افزایش معنی‌داری پیدا نکرد ($P>0/05$) و با نتایج تحقیقات Romani و همکاران [۲۶]، Honarvar و همکاران [۶] و Li و همکاران [۲۴] همسو بود. Wu و همکاران [۲۷] شاهد افزایش معنی‌دار ضخامت پس

از تیمار پلاسما بودند. آنها بیان کردند که پلاسمای DBD می‌تواند کند و کاش^۲ (فیزیک و شیمی) را به همراه داشته باشد، که منجر به برخی عملکردها در تخریب پیوندها، تخریب شیمیایی، بریدگی زنجیره و بمباران قوی توسط ذرات پراثرژی می‌شود که توسط رادیکال‌های حاصل از تخلیه پلاسما تقویت می‌شود [۲۷].

حلالیت عامل مهم دیگری در مطلوبیت یک فیلم برای بسته‌بندی است [۸]. آزمایش حلالیت در آب اطلاعاتی در مورد رفتار مواد در محیط‌های آبی و مقاومت آن در برابر آب ارائه می‌دهد [۲]. حل نشدن مواد در توسعه بسته‌بندی مواد غذایی با فعالیت آب بالا مهم است. همچنین، حلالیت بالاتر ممکن است نشان دهنده زیست تخریب‌پذیری آسان‌تر مواد در محیط باشد [۲۶]. تیمار پلاسما اثر معنی‌داری بر حلالیت در آب (کاهش) فیلم‌ها نداشت ($P < 0/05$) و با نتایج مطالعه Moosavi و همکاران [۸] همسو بود. این نشان می‌دهد که جریان ذرات پلاسما فقط روی سطح فیلم تأثیر می‌گذارد، بنابراین ذرات پراثرژی پلاسما نمی‌توانند در عمق لایه پروتئینی پخش شوند [۸]. Romani و همکاران [۱۴] فیلم‌های طبیعی حاصل از پروتئین میوفیبریل ماهی را تحت تیمارهای مختلف پلاسما با توان‌ها و زمان‌های متفاوت قرار دادند و با اینکه در برخی از تیمارها شاهد افزایش انحلال‌پذیری فیلم‌ها بودند، کمترین میزان انحلال‌پذیری در آب را با کمترین توان و زمان مورد مطالعه به دست آوردند و بیان کردند که این نشان دهنده کاهش میزان رطوبت در فیلم است و احتمالاً بدون سایر اثرات قابل توجه مانند کند و کاش و/یا تخریب ماتریس رخ داده است. عملکرد مکانیکی فیلم‌ها برای بسته‌بندی مواد غذایی نقش مهمی در محافظت از محصول دارد، به طوری که مواد باید از زمان نگهداری (در طول زنجیره توزیع تا مصرف) در برابر حمل و نقل مقاومت کنند [۲۶]. فیلم‌های در نظر گرفته شده برای بسته‌بندی نیاز به عملکرد مکانیکی کافی دارند. استحکام کششی به استحکام مکانیکی فیلم‌ها مربوط می‌شود، در حالی که مدول کششی به استحکام فیلم‌ها مرتبط است [۲۸]. اثر نامطلوب تیمار پلاسما بر ویژگی‌های مکانیکی (کاهش معنی‌دار) در برخی از مطالعات قبلی گزارش شده است Moosavi و همکاران [۸]؛ Oh و همکاران [۲۳]؛ Li و همکاران [۲۹]؛ Honarvar و همکاران [۶] بیان کردند که کاهش استحکام کشش و مدول فیلم‌ها می‌تواند به دلیل شکستگی‌هایی باشد که در ساختارهای مولکولی و به دنبال آن شکاف‌های کوچک در شبکه پلیمری رخ می‌دهد و منجر به ایجاد ترک راحت‌تر روی سطح می‌شود [۶]. با این حال، کاهش جزئی ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌ها پس از تیمار با پلاسما مشاهده شد که نشان می‌دهد که تیمار پلاسما تأثیر معنی‌داری بر انعطاف‌پذیری کلی فیلم‌ها نداشت و نمونه پس از ۵ دقیقه تیمار توانست استحکام خود را در برابر تنش کششی حفظ کند. این احتمالاً به دلیل زمان کوتاه تیمار پلاسما بود.

خاصیت ممانعت کنندگی مواد بسته‌بندی مواد غذایی پارامتر مهمی است که مناسب بودن فیلم‌های پلیمری را برای کاربردهای بسته‌بندی تعیین می‌کند [۳۰]. نفوذپذیری در برابر بخار آب (WVP) برای تعیین مقاومت در برابر رطوبت فیلم‌های بسته‌بندی مهم است و بر مدت ماندگاری و کیفیت مواد غذایی بسته‌بندی شده تأثیر می‌گذارد [۱۶]. برخی از غذاها مانند میوه‌ها و سبزیجات به دلیل فرآیند تنفس نیاز به کاهش سد در برابر بخار آب دارند [۱۴]. در حالی که برای غذاهای خشک که افت کیفیت آنها تحت تأثیر رطوبت قرار می‌گیرد (به عنوان مثال تردی در بیسکویت‌ها و میان وعده‌ها) مهم است [۲]. به طور کلی، فیلم‌های تهیه شده با پروتئین‌ها به آب حساس هستند و در نتیجه خاصیت سد بخار آب ضعیفی دارند [۲۶]. Hernandez [۳۱] بیان کرد که انتقال بخار آب معمولاً از طریق بخش آب‌دوست فیلم اتفاق می‌افتد و به نسبت آب‌دوست-آب‌گریز اجزای فیلم بستگی دارد. بررسی‌ها به طور کلی نشان داده‌اند که فیلم‌های دولایه حاوی حداقل یک منبع آب‌گریز، موانع مؤثری در برابر انتقال بخار آب هستند [۲]. با توجه به Siracusa [۳۲] مکانیسم نفوذ بخار آب در یک فیلم شامل جذب سطحی مواد، به دنبال انتشار در ساختار و سپس دفع از سطح دیگر است. لازم به ذکر است که نفوذپذیری بخار آب به مکانیسم‌های توده‌ای مانند فشار بخار و گرادیان غلظت بین دو سطح بستگی دارد [۳۰]. همانطور که در جدول ۳ گزارش شده است، کاهش قابل توجهی در مقدار WVP برای فیلم دولایه پس از تیمار پلاسما مشاهده شد (از $1/4481 \times 10^{-8}$ به $3/9537 \times 10^{-7}$). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تیمار پلاسما منجر به بهبود مقاومت در برابر رطوبت فیلم شد [۲۶]. این می‌تواند برای تضمین کیفیت غذای بسته‌بندی شده مفید باشد [۲۶]. Oberlinter و همکاران [۳۳] و Romani و همکاران [۱۴] بیان کردند که کاهش WVP می‌تواند به افزایش ویژگی آب‌گریزی فیلم نسبت داده شود [۳۳]. Romani و همکاران [۱۴] بیان کردند که با کاهش WVP ممکن است کاهش قابل توجهی از رطوبت در سطح فیلم رخ داده باشد، و همچنین نشان دهنده قرار گرفتن در معرض مکان‌های آب‌گریز اسیدهای آمینه در توالی پروتئین است. برخی از نویسندگان [۳۴] تغییرات در ساختارهای ثانویه پروتئین‌ها را در نتیجه تیمار پلاسما (به عنوان مثال

² Etching

در مقدار ماریچ α ، مناطق β -ورقه، و همچنین سیم پیچ‌های تصادفی) گزارش کردند که مطابق با روند مشاهده شده در الگوهای XRD در مطالعه Romani و همکاران [۱۴] است.

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این تحقیق نشان داد که تیمار پلاسمای تخلیه سد دی‌الکترونیک منجر به بهبود ویژگی‌های فیلم‌های دولایه LDPE/Pr (به خصوص کاهش آب‌دوستی و نفوذپذیری بخار آب) شد. به طور کلی بر اساس نتایج به دست آمده مناسب بودن استفاده از تیمار پلاسمای برای بهبود ویژگی فیلم‌های دولایه را نشان داد و همچنین انجام تحقیقات بیشتر برای بهینه‌سازی فرآیند با توجه انواع مختلف فیلم‌ها توصیه می‌گردد.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر حسین نورانی جهت همکاری در انجام برخی آزمایشات و شرکت آيسا پلاست استان چهارمحال و بختیاری واقع در شهرک صنعتی شهر جونقان صمیمانه تشکر می‌نماییم.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع مالی: این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به شماره ۹۷۲۱۳۳۴۱۰۱ انجام شده است.

سهم نویسندگان:

راضیه رئیسی: انجام کارهای آزمایشگاهی، نمونه‌برداری، فراهم آوردن داده‌ها، نوشتن نسخه اولیه مقاله؛ بهاره شعبان‌پور: استاد راهنمای دانشجوی، تصحیح و ویرایش نسخه نهایی مقاله؛ محمدرضا خانی: استاد راهنمای دانشجوی؛ پرستو پورعاشوری: تجزیه و تحلیل داده‌ها؛ سمیرا تاجیک نژاد: انجام کارهای آزمایشگاهی؛ بابک شکری: تصحیح و ویرایش نسخه نهایی مقاله

منابع

- [1] Bahrami A, Delshadi R, Assadpour E, Jafari S. M, Williams L. Antimicrobial-loaded nanocarriers for food packaging applications. *Journal of Advances in Colloid and Interface Science*. (2020) 102140.
- [2] Romani V. P, Olsen B, Collares M. P, Oliveira J. R. M, Prentice C, Martins V. G. Cold plasma and carnauba wax as strategies to produce improved bi-layer films for sustainable food packaging. *Journal of Food Hydrocolloids*. (2020) 106087.
- [3] Pankaj S. K, Bueno-Ferrer C, Misra N. N, Bourke P, Cullen P. J. Zein film: Effects of dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma. *Journal of Applied Polymer Science*. (2014) 131 (18).
- [4] Sharmin N, Sone I, Walsh J. L, Sivertsvik M, Fernandez E. N. Effect of citric acid and plasma activated water on the functional properties of sodium alginate for potential food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*. (2021) 29, 100733.
- [5] Cuq B, Aymard C, CUQ J. L, Guilbert S. Edible packaging films based on fish myofibrillar proteins: formulation and functional properties. *Journal of Food Science*. (1995) 60(6): 1369-1374.
- [6] Honarvar Z, Farhoodi M, Khani M. R, Mohammadi A, Shokri B, Ferdowsi R, Shojaei-Aliabadi S. Application of cold plasma to develop carboxymethyl cellulose-coated polypropylene films containing essential oil. *Journal of Carbohydrate Polymers*. (2017) 176: 1-10.

- [7] Moradi E, Moosavi M. H, Hosseini S. M, Mirmoghtadaei L, Moslehishad M, Khani M. R, Jannatyha N, Shojaee-Aliabadi S. Prolonging shelf life of chicken breast fillets by using plasma-improved chitosan/low density polyethylene bilayer film containing summer savory essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*. (2020) 156: 321-328.
- [8] Moosavi M. H, Khani M. R, Shokri B, Hosseini S. M, Shojaee-Aliabadi S, Mirmoghtadaie L. Modifications of protein-based films using cold plasma. *International Journal of Biological Macromolecules*. (2020) 142: 769-777.
- [9] Maktabi S, Zarei M, Chadorbaf M. Effect of a traditional marinating on properties of rainbow trout fillet during chilled storage. In *Veterinary Research Forum*. (2016) 7 (4): p. 295.
- [10] Olatunde O. O, Benjakul S. Natural preservatives for extending the shelf-life of seafood: A revisit. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. (2018) 17(6): 1595-1612.
- [11] Clarke D, Tyuftin A. A, Cruz-Romero M. C, Bolton D, Fanning S, Pankaj S. K, Bueno-Ferrer C, Cullen P. J, Kerry J. P. Surface attachment of active antimicrobial coatings onto conventional plastic-based laminates and performance assessment of these materials on the storage life of vacuum packaged beef sub-primals. *Journal of Food Microbiology*. (2017) 62: 196-201.
- [12] Noudoost B, Noori N, Amo Abedini G, Gandomi H, Akhondzadeh Basti A, Jebeli Javan A, Ghadami F. Encapsulation of green tea extract in nanoliposomes and evaluation of its antibacterial, antioxidant and prebiotic properties. *Journal of Medicinal Plants*. (2015) 3 (55): 66-78.
- [13] Wong L. W, Loke X. J, Chang C. K, Ko W. C, Hou C. Y, Hsieh C. W. Use of the plasma-treated and chitosan/gallic acid-coated polyethylene film for the preservation of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets. *Journal of Food Chemistry*. (2020) 126989.
- [14] Romani V. P, Olsen B, Collares M. P, Oliveira J. R. M, Prentice C, Martins V. G. Plasma technology as a tool to decrease the sensitivity to water of fish protein films for food packaging. *Journal of Food Hydrocolloids*. (2019) 94: 210-216.
- [15] Siripatrawan U, Harte B. R. Physical properties and antioxidant activity of an active film from chitosan incorporated with green tea extract. *Journal of Food hydrocolloids*. (2010) 24 (8): 770-775.
- [16] Chen G, Chen Y, Jin N, Li J, Dong S, Li S, Zhang Z, Chen Y. Zein films with porous polylactic acid coatings via cold plasma pre-treatment. *Journal of Industrial Crops and Products*. (2020) 150: 112382.
- [17] Dong S, Guo P, Chen Y, Chen G. Y, Ji H, Ran Y. E, Li Sh. Chen Y. E. Surface modification via atmospheric cold plasma (ACP): Improved functional properties and characterization of zein film. *Industrial Crops and Products*. (2018) 115, 124-133.
- [18] Honarvar Z, Farhoodi M, Mohammadi A, Ferdosi R, Shojaee A. S. Application of plasma surface treatment to produce carboxymethyl cellulose coated by polypropylene film as a novel food packaging (in Persian). *Iranian Journal of Nutritional Sciences and Food Industry*. (2017) 55-64.

- [19] Karam L, Jama C, Mamede A. S, Fahs A, Louarn G, Dhulster P, Chihib N. E. Study of nisin adsorption on plasma-treated polymer surfaces for setting up materials with antibacterial properties. *Reactive and Functional Polymers*. (2013) 73 (11), 1473-1479.
- [20] Ulbin-Figlewicz N, Zimoch-Korzycka A, Jarmoluk, A. Antibacterial activity and physical properties of edible chitosan films exposed to low-pressure plasma. *Food and Bioprocess Technology*. (2014) 7 (12), 3646-3654.
- [21] Lei J, Yang L, Zhan Y, Wang Y, Ye T, Li Y, Deng H, Li B. Plasma treated polyethylene terephthalate/polypropylene films assembled with chitosan and various preservatives for antimicrobial food packaging. *Journal of Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. (2014) 114: 60-66.
- [22] Goiana M. L, de Brito E. S, Alves Filho E. G, de Castro Miguel E, Fernandes F. A. N, de Azeredo H. M. C, de Freitas Rosa M. Corn starch based films treated by dielectric barrier discharge plasma. *International Journal of Biological Macromolecules*. (2021) 183, 2009-2016.
- [23] Oh Y. A, Roh S. H, Min S. C. Cold plasma treatments for improvement of the applicability of defatted soybean meal-based edible film in food packaging. *Journal of Food Hydrocolloids*. (2016) 58: 150-159.
- [24] Li Y., Bai Y., Huang J., Yuan C., Ding T., Liu D, Hu Y. Airglow discharge plasma treatment affects the surface structure and physical properties of zein films. *Journal of Food Engineering*. (2020) 273, 109813.
- [25] Chen G, Dong S, Zhao S, Li S, Chen Y. Improving functional properties of zein film via compositing with chitosan and cold plasma treatment. *Industrial Crops and Products*. (2019) 129, 318-326.
- [26] Romani V. P, Olsen B, Collares M. P, Oliveira J. R. M, Prentice-Hernández C, Martins V. G. Improvement of fish protein films properties for food packaging through glow discharge plasma application. *Food Hydrocolloids*. (2019) 87, 970-976.
- [27] Wu X, Liu Q, Luo Y, Murad M. S, Zhu L, Mu, G. Improved packing performance and structure-stability of casein edible films by dielectric barrier discharges (DBD) cold plasma. *Food Packaging and Shelf Life*. (2020) 24, 100471.
- [28] Lu P, Guo M, Xu Z, Wu M. Application of nanofibrillated cellulose on BOPP/LDPE film as oxygen barrier and antimicrobial coating based on cold plasma treatment. *Coatings*. (2018) 8(6), 207.
- [29] Li Y, Wu C, Bai Y. Liu S, Yuan C, Ding T, Hu Y. Effect of glow discharge plasma on surface modification of chitosan film. *International journal of Biological Macromolecules*. (2019) 138: 340-348.
- [30] Sheikhi Z, Mirmoghtadaie L, Khani M. R, Farhoodi M, Beikzadeh S, Abdolmaleki K, Kazemian-Bazkiaee, F., Shokri, B. Shojaee-Aliabadi S. Physicochemical characterization of argon plasma-treated starch film. *Journal of Agricultural Science and Technology*. (2020) 22(4), 999-1008.
- [31] Hernandez E. Edible coatings from lipids and resins. *Edible Coatings and Films to Improve Food*

Quality. (1994) 1: 279-304.

[32] Siracusa V. Food Packaging Permeability Behaviour: A Report. International Journal of Polymer Science. (2012) 1: 302029.

[33] Oberlintner A, Vesel A, Naumoska K, Likozar B, Novak U. Permanent hydrophobic coating of chitosan/cellulose nanocrystals composite film by cold plasma processing. Applied Surface Science. (2022) 153562.

[34] Zhang H, Xu Z, Shen J, Li X, Ding L, Ma, J, Lan Y, Xia W, Cheng C, Sun, Q, Zhang Z, Chu P.K. Effects and mechanism of atmospheric-pressure dielectric barrier discharge cold plasma on lactate dehydrogenase (LDH) enzyme. Scientific Reports. (2015) 5 (1): 10031.

Application of Cold Plasma Treatment to Produce Low Density Polyethylene/Myofibrillar Protein Bilayer Films Containing Green Tea Extract

Raziye Raeesi¹, Bahareh Shabanpour^{1*}, Mohammad Reza Khani², Parastoo Pourashouri¹, Samira Tajiknezhad³, Babak Shokri²

1- Department of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2- Department of Physics, Iran and Laser-Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Department of Physics, Faculty of Sciences, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

ABSTRACT

In this study, plasma treatment was used to surface modification of low-density polyethylene film, which was then coated with fish myofibril protein containing green tea extract and subjected to plasma treatment again. The properties of the bilayer films (including: contact angle, thickness, water solubility, mechanical and water vapor permeability) were measured before and after plasma treatment. The results showed that plasma treatment led to a significant decrease in the water vapor permeability of the films. Also, the water contact angle of the films increased significantly after plasma treatment from $55/73^{\circ} \pm 1/54$ to $85/3^{\circ} \pm 1/25$, indicating a decrease in the hydrophilicity of the films. However, all results were below 90° and thus, the surface is still hydrophilic. The results of the solubility analysis did not show any significant difference between the films treated and untreated with plasma (it decreased from $17.02 \pm 0.621\%$ to $12.74 \pm 0.205\%$). The mechanical properties of the films after plasma treatment did not show any significant difference, indicating that plasma treatment did not have a significant effect on the overall flexibility of the films. According to the results obtained, plasma treatment has a high potential in modifying the properties of the films, and its parameters should be adjusted according to the type of film to achieve the desired results.

KEYWORDS: Low density polyethylene, Bilayer film, Coating, Plasma treatment, Green tea extract, Active packaging

ARTICLE TYPE

Original Research

ARTICLE HISTORY

Received: 31 Aug 2025

Revised: 06 Nov 2025

Accepted: 11 Dec 2025

Online First: 15 Dec 2025

* Corresponding Author:

Email address:

Shabanpour@gau.ac.ir; b_shabanpour@yahoo.com

Tel: 09111754394

© Published by Tarbiat Modares University

ISSN: 2322-5513