

پیشرفت‌های اخیر در زمینه فیلم‌های نشانگر حساس به pH مبتنی بر رنگ‌های طبیعی برای نظارت هوشمند بر تازگی غذا: مطالعه مروری

محمدامین سعدی

کارشناس بهداشت مواد غذایی، دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل، آمل، ایران

چکیده

تقاضای غذای ایمن و تازه در سراسر جهان با توجه به پیشرفت تکنولوژی و علوم مختلف، رو به افزایش است. امروزه در مبحث مواد غذایی، بسته‌بندی مدرن و پیشرفته بخش زیادی از این تقاضا را بر عهده دارد و بر رقابت کسب‌وکارها بسیار مؤثر است. به عنوان یک روش جدید بسته‌بندی، بسته‌بندی فیلم دارای نشانگر حساس به pH مبتنی بر رنگدانه طبیعی را می‌توان برای نظارت هوشمندانه بر تازگی غذا و ارائه اطلاعات بصری با داشتن مزایایی مانند اندازه کوچک، هزینه کم و دقت بالا استفاده کرد. بر اساس ارزش و کاربرد رنگدانه طبیعی در بسته‌بندی نشانگر حساس به pH، این مقاله به بررسی انواع نشانگرهای رنگدانه طبیعی (مانند آنتوسیانین‌ها، کورکومین) و مواد ماتریس تشکیل فیلم می‌پردازد، و به روش تهیه فیلم مورد نظر و کاربردهای آن در مواد غذایی مختلف اشاره می‌کند. به منظور ارائه رنگدانه طبیعی و ارتقای بسته‌بندی فیلم نشانگر حساس به pH برای نظارت بر تازگی غذا، تحقیقات بیشتر برای غلبه بر محدودیت‌های فعلی مورد نیاز است.

واژگان کلیدی: بسته‌بندی، تازگی، فیلم، نشانگر، هوشمند، pH.

مقدمه

تازگی غذا یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر کیفیت و ایمنی غذا می باشد. تازگی غذا نه تنها قیمت کالاها را تعیین می کند، بلکه یک شاخص کلیدی است که بر قصد خرید مصرف کنندگان و سلامت مصرف کنندگان تأثیر می گذارد (Ghaani et al. ۲۰۱۶). در حال حاضر، بسته بندی مواد غذایی معمولی نقش بسزایی در حفاظت از توزیع عادی غذا و جداسازی آن از محیط خارجی داشته است (Fang et al. ۲۰۱۷). اطلاعات چاپ شده بر روی بسته بندی مواد غذایی، مانند تاریخ تولید، تاریخ انقضاء و جزئیات سازنده، راهی مناسب برای خرید محصولات برای مصرف کنندگان فراهم می کند (Becerril, Nerín, and Silva ۲۰۲۱). تازه بودن مواد غذایی توسط مصرف کنندگان بسته به تاریخ انقضاء روی بسته بندی ماده غذایی ارزیابی می شود و در نتیجه تغییرات عوامل محیطی در طول فرآیند نگهداری و حمل و نقل را نادیده می گیرند. بنابراین، وجود بسته بندی هوشمند مناسب، سریع و نشانگر برای نظارت بر تازگی مواد غذایی مهم و ضروری است.

در طول دو دهه گذشته، سیستم های بسته بندی فعال و هوشمند مبتنی بر تعامل محیط و محصول، توسعه یافته اند. اصل بسته بندی فعال این است که با افزودن مواد مؤثره مانند آنتی اکسیدان ها (Oudjedi et al. ۲۰۱۹)، اکسیژن و جاذب کننده های اتیلن (Atabey, ۲۰۱۲)؛ آزادکننده طعم یا عوامل جاذب (Wrona et al. ۲۰۲۱) به بسته بندی های معمولی، فرآیند زوال و افزایش ماندگاری و کیفیت غذا را افزایش دهد (Becerril, Nerín, and Silva ۲۰۲۱; Jamróz et al. ۲۰۱۹). هدف از بسته بندی هوشمند، انتقال اطلاعات مربوط به محصول به تولیدکنندگان، خرده فروشان و مصرف کنندگان است (Restuccia et al. ۲۰۱۰). به عنوان مثال، می تواند منعکس کننده کاهش تازگی غذا در طول زمان، تغییرات دما با محیط های مختلف و نمایش تغییرات در ترکیب گاز بسته بندی هوشمند باشد (Atabey, Sari, and Al-Obaidi ۲۰۱۲).

بسته بندی هوشمند نوع جدیدی از فناوری بسته بندی است که در ده سال گذشته در صنایع غذایی خارجی ظهور کرده است (Fang et al. ۲۰۱۷). طبق تعریف پروژه، بسته بندی هوشمند فناوری جدیدی است که می تواند به طور خودکار تغییرات محیطی داخلی و خارجی تجربه شده توسط مواد غذایی را نظارت، حس، ثبت و ردیابی کند و از طریق تغییرات فیزیکی قابل درک بصری از طریق برچسب های مرکب، چاپ شده یا چسبانده شده بر روی بسته بندی، اطلاعات ایمنی مواد غذایی را به مصرف کنندگان اطلاع داده و هشدار دهد (UI ۲۰۰۵). بسته بندی هوشمند عمدتاً به بسته بندی فعال و بسته بندی هوشمند تقسیم می شود که در میان آن ها بسته بندی هوشمند شامل موارد زیر است: (۱) حامل های داده شامل بارکدها، کدهای دو بعدی و RFID^۱ است. (۲) نشانگرها عمدتاً شامل نشانگرهای دما-زمان، نشانگرهای نشت بسته بندی و نشانگرهای تازگی است. (۳) سنسورها عمدتاً شامل سنسورهای هوازی، حسگرهای گاز، سنسورهای میکروبی و غیره هستند (Ghaani et al. ۲۰۱۶; Kerry, O'Grady, and Hogan ۲۰۰۶; Müller and Schmid ۲۰۱۹). تفاوت اصلی بین نشانگرها و حسگرها در این است که حسگرها می توانند تحلیلگر هدف در بسته را بر اساس سیگنال پاسخ تعیین کنند، در حالی که نشانگرها فقط می توانند وجود یا عدم وجود تحلیلگر هدف را تعیین کنند، یا از آن برای تجزیه و تحلیل نیمه کمی هدف استفاده کنند. اصل اساسی نشانگر تازگی غذا بر اساس واکنش نشانگر با متابولیت ها در زمان ماندگاری و فرآیند فساد مواد غذایی است، و به طور کلی تغییر رنگ قابل مشاهده توسط نشانگر بدون تخریب بسته بندی برای رسیدن به هدف نشان دادن کیفیت غذا حاصل می شود. مصرف کنندگان برای اطلاع از تازگی مواد غذایی در بسته بندی فقط باید رنگ نشانگر و کارت رنگ را با هم مقایسه کنند و نیازی به دستگاه های تشخیص خاصی ندارند. نشانگرها در اندیکاسیون های رنگ سنجی معمولاً از رنگ های واکنش پذیر یا رنگدانه های طبیعی تشکیل شده اند که به رنگ های مختلف از طریق محرک های فیزیکی شیمیایی مانند pH، دما، رطوبت، گاز و غیره پاسخ می دهند و در نتیجه تغییرات متفاوتی در طیف ایجاد می شود (Ghaani et al. ۲۰۱۶; De Meyer et al. ۲۰۱۴). Schaefer and Cheung (۲۰۱۸) در عمل، آن ها با رنگی مرجع و دستورالعمل های استفاده چاپ می شوند و به مصرف کنندگان اجازه می دهند ویژگی هایی مانند تازگی محصول را به صورت بصری قضاوت کنند.

^۱ Radio Frequency Identification

اخیراً، در بسیاری از مطالعات از فیلم‌های نشانگر مبتنی بر رنگ‌های طبیعی (مانند آنتوسیانین‌ها، کورکومین و کاروتنوئیدها) برای نظارت بر تازگی مواد غذایی از طریق سیستم بسته‌بندی هوشمند به دلیل غیرسمی بودن، سازگار با محیط‌زیست و هزینه کم استفاده کرده‌اند (Fang et al. ۲۰۱۷). این نشانگرهای طبیعی با توجه به تغییر شرایط فیزیولوژیکی مواد غذایی دچار تغییرات رنگی می‌شوند و در نتیجه کیفیت غذای بسته‌بندی شده را در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌دهند. برای مثال، چوی و همکاران (۲۰۱۷) بررسی کردند که فیلم نشانگر pH هوشمند مبتنی بر پوتیتو دکستروز آگار^۲ و عصاره‌های آنتوسیانین از سیب‌زمینی شیرین بنفش به گوشت خوک اعمال شده است، که نشان می‌دهد رنگ فیلم از قرمز به سبز تغییر می‌کند تا منعکس کننده زوال کیفیت گوشت خوک باشد (I. Choi et al. ۲۰۱۷). محققان فیلم‌های واکنش‌دهنده به رنگ طبیعی را برای نظارت بر زوال مواد غذایی ایجاد کرده‌اند. با این وجود، محدودیت‌ها و شکاف‌هایی در کاربرد فیلم بسته‌بندی هوشمند به دلیل ناپایداری فیلم‌های نشانگر که به عوامل محیطی در طول زمان پاسخ می‌دهند، وجود دارد. در این بررسی، ما بر روی فیلم‌های نشانگر حساس به pH ساخته شده با رنگدانه‌های طبیعی به عنوان نشانگر و روش‌های مختلف تشکیل فیلم با ماتریس‌های مختلف تشکیل فیلم، ترکیب شده با سایر فناوری‌های پیشرفته و کاربرد در زمینه‌های مختلف غذایی تمرکز می‌کنیم. در عین حال، کاستی‌های بسته‌بندی هوشمند در کاربردهای عملی مطرح و پیشنهادهای ارائه می‌شود.

فیلم‌های نشانگر

در حال حاضر سه نوع کاربرد بسته‌بندی هوشمند نشانگر در مواد غذایی وجود دارد: نشانگر زمان-دما، نشانگر نشی و نشانگر رنگ. نشانگر دما-زمان نشانگر تغییرات دما در بسته‌بندی مواد غذایی با گذشت زمان از طریق یک سری واکنش‌های فیزیوشیمیایی و واکنش‌های آنزیمی است، اما هزینه استفاده از این نوع بسته‌بندی بالا و به دلیل عوامل زیادی محدود است. نوع نشانگر نشی، یک کارت نشانگر ویژه برای تشخیص محتوای گازهای خاص مانند اکسیژن یا دی‌اکسید کربن در بسته‌بندی است که معمولاً در شیر و فرآورده‌های تخمیری آن استفاده می‌شود، اما در کاربردهای عملی، طی رشد میکروارگانیسم‌ها در داخل غذا نیز گازهای مشخصه‌ای مانند دی‌اکسید کربن تولید می‌شود. بنابراین روشی به اندازه کافی دقیق نیست. نوع نشانگر رنگ، نوع جدیدی از بسته‌بندی هوشمند است که با توجه به ویژگی‌هایی مانند اندازه کوچک، هزینه کم و پاسخ حساس، می‌تواند کیفیت و تازگی غذا را از طریق تغییر رنگ نشانگر داخلی بسته‌بندی مواد غذایی منعکس کند (Kerry, O'Grady, and Hogan ۲۰۰۶).

در نوع نشانگر رنگ، از اجزای رنگدانه حساس به pH به عنوان نشانگر استفاده می‌شود؛ از جمله رنگدانه‌های مصنوعی و رنگدانه‌های طبیعی و پلیمرهایی مانند پلی وینیل الکل^۳ یا ماکرومولکول‌های بیولوژیکی (نشاسته، کیتوزان و غیره) به عنوان نشانگر ثابت استفاده می‌شوند. عمل میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌های موجود در مواد غذایی در طول نگهداری باعث تولید یک سری متابولیت‌ها می‌شود. تجمع این متابولیت‌ها (مانند میزان ازت فرار کل^۴، آمونیاک، دی‌اکسید کربن) باعث تغییر pH غذا می‌شود، بنابراین با استفاده از واکنش رنگ توسط تغییر باز-اسید، برچسب‌های نشانگر ایجاد می‌گردد. تغییر رنگ روی برچسب نشانگر به سرعت به مصرف‌کنندگان کمک می‌کند تا تغییرات ایجاد شده در غذا را شناسایی کنند.

نشانگرهای طبیعی

در بیشتر گزارش‌های قبلی از برموتیمول آبی، کرزول قرمز، متیل قرمز، بروموکرزول بنفش، بروموکرزول سبز، فنل قرمز و سایر نشانگرهای مصنوعی pH به عنوان توسعه دهندگان رنگ استفاده شده است. اگرچه حساس هستند، اما ایمنی آن‌ها را نمی‌توان تضمین کرد. در فرآیند ذخیره‌سازی مواد غذایی و تماس با فیلم نشانگر، به راحتی پدیده مهاجرت نشانگر رخ می‌دهد. در حال حاضر، رنگدانه‌های طبیعی مواد غذایی مانند آنتوسیانین‌ها و کورکومین به طور گسترده‌ای به عنوان نشانگر در بسته‌بندی هوشمند مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. آنتوسیانین‌ها و کورکومین به عنوان جایگزین نسبتاً ایمن و سازگار با محیط زیست برای رنگ‌های مصنوعی شناخته شده‌اند. در

^۲ Potato Dextrose Agar = PDA

^۳ Polyvinyl Alcohol

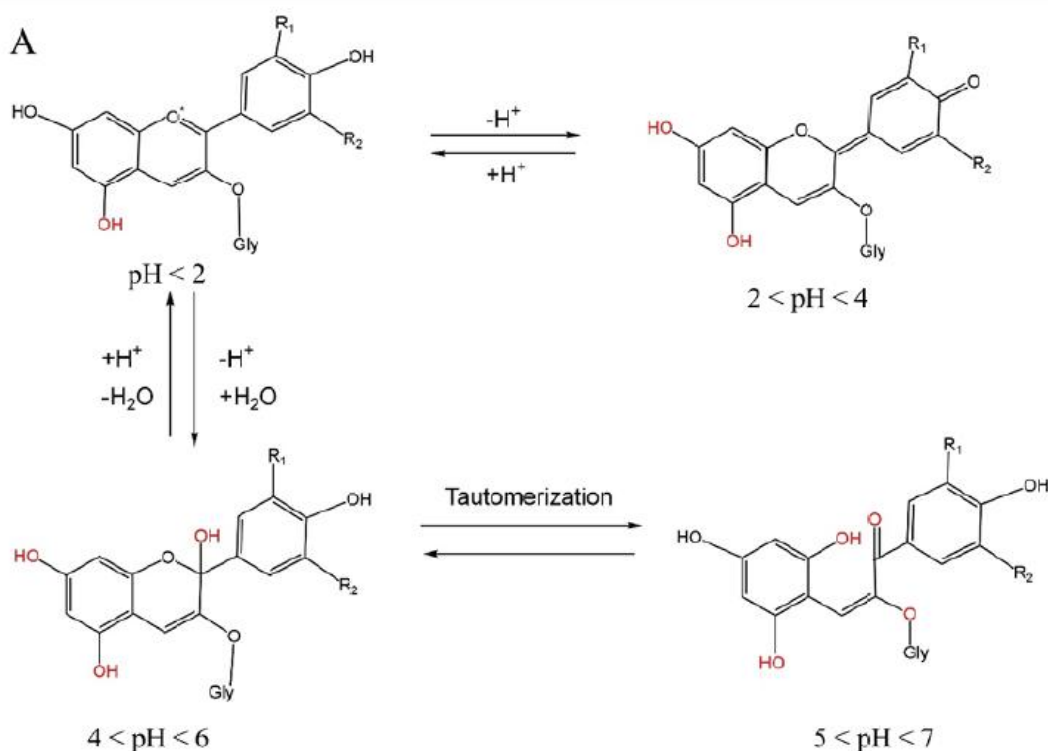
^۴ Total Volatile Nitrogen

مقایسه با سایر رنگ‌های نشانگر، آنتوسیانین‌ها و کورکومین به دلیل رنگ‌های متنوع، حساسیت خوب، طیف گسترده پاسخگویی به pH و استفاده غذایی فراوان، به طور گسترده در کاربردهای بسته‌بندی هوشمند مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Jiang et al. ۲۰۲۰). بنابراین، آنتوسیانین و کورکومین پتانسیل امیدوارکننده‌ای برای pH، دما یا نشانگر پاسخگوی گاز نشان داده‌اند. رنگ آن‌ها در دماهای مختلف، رطوبت و تولید گاز به طور قابل توجهی تغییر می‌کند (Lee et al. ۲۰۱۹).

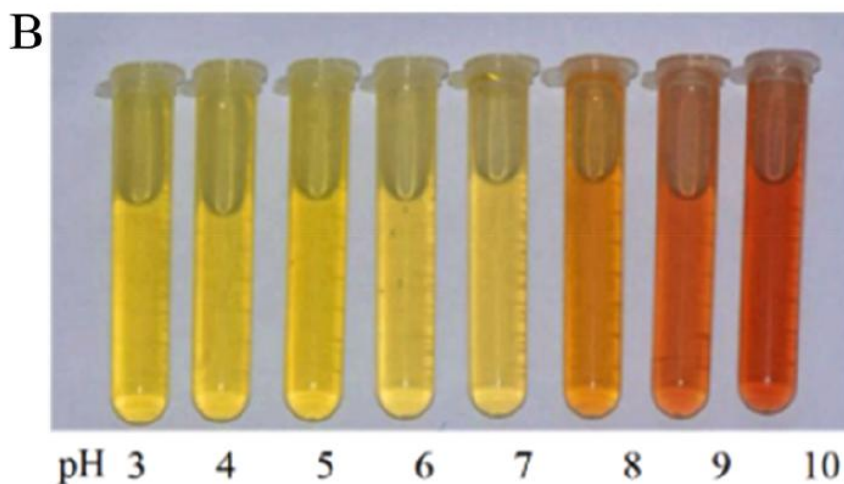
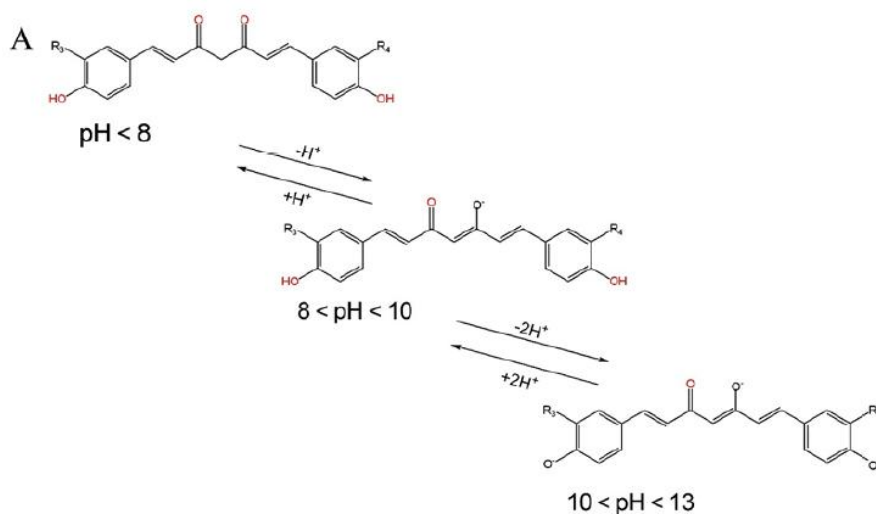
آنتوسیانین‌ها ترکیبات فنلی هستند که به فلاونوئیدها تعلق دارند و به طور گسترده در میوه‌های گیاهان یافت می‌شوند. گل‌ها، میوه‌ها و برگ‌های بسیاری از گیاهان، رنگی را نشان می‌دهند که عمدتاً توسط آنتوسیانین تولید می‌شود. آنتوسیانین‌ها به دلیل وجود مواد فنلی و مزدوج مانند رنگدانه شمعدانی، رنگدانه گل ذرت، رنگدانه سوئیفتلت، رنگدانه گل صد تومانی، رنگدانه صبح گلوری و رنگدانه گل خطمی تغییرات رنگی ایجاد می‌کنند (ZHANG et al. ۲۰۱۶). آن‌ها در حالت طبیعی خود به صورت گلیکوزیدهایی به نام آنتوسیانین‌ها بوده و تعداد کمی آنتوسیانین آزاد وجود دارد. دارای ویژگی‌های ایمنی، غیرسمی بودن، استخراج آسان و حلالیت خوب در آب هستند. مطالعات نشان داده است که آن‌ها دارای فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی و باکتریواستاتیک بوده و همچنین یک دسته از مواد حساس به گاز هستند که می‌توانند با گازهای فاسدکننده تولید شده در هنگام ذخیره‌سازی مواد غذایی واکنش دهند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ساختار آنتوسیانین‌ها در اثر گلیکوزیلاسیون آنتوسیانین‌ها ایجاد می‌شود و می‌توان آن‌ها را بر اساس جایگزین‌های معطر به شش گروه تقسیم کرد: سیانیدین، دلفینیدین، پلاروگونیدین، مالویدین، پتونیدین و پئونیدین. رنگ آنتوسیانین‌ها با افزایش مقدار pH تغییر می‌کند. تغییر رنگ آن‌ها به این دلیل است که ساختار غالب آنتوسیانین‌ها کاتیون فلاویلیوم قرمز است ($pH > 7$) که می‌تواند با افزایش مقدار pH به پایه کینوئیدی آبی ($pH 4-6$) یا بی‌رنگ کربنول دی‌پروتوناسیون شبه پایه و هیدراتاسیون ($pH 6-8$) تبدیل شود. در شرایط خنثی یا کمی قلیایی، کالکون زرد کم‌رنگ غالب است. در $pH 9-10$ ، یک پایه کینون تشکیل می‌شود و به رنگ آبی-بنفش ظاهر می‌گردد. هنگامی که $pH > 9$ ، آنتوسیانین‌ها در یک محیط قلیایی تجزیه می‌شوند، رنگ آن‌ها به تدریج به سبز-زرد تغییر می‌کند و با افزایش قلیایی، رنگ به تدریج تیره می‌گردد. مطالعاتی در مورد استفاده از آن‌ها به عنوان نشانگر رنگ برای نظارت بر تازگی مواد غذایی وجود دارد. ماسیل، یوشیدا و فرانکو (۲۰۱۲) فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی تهیه شده با مخلوطی از کیتوزان و آنتوسیانین را برای نظارت بر تغییرات pH بر اساس تغییرات دما را مورد مطالعه قرار دادند (MacIel, Yoshida, and Franco ۲۰۱۲). علاوه بر این، لیو و همکاران (۲۰۱۹) یک غشای رنگ‌سنجی جدید با حسگر pH گسترده (عصاره توت کا-کاراگینان-گوچی) را برای نظارت بر تازگی غذا طراحی کردند و نتایج نشان داد که فیلم نشانگر دارای اثر رنگی خوبی در نظارت بر تازگی شیر و میگوی جدید است (J. Liu et al. ۲۰۱۹). از مطالب فوق می‌توان دریافت که کاربرد آنتوسیانین‌ها در نشانگرهای بسته‌بندی هوشمند چشم‌انداز وسیعی دارد.

کورکومین، یک جزء طبیعی استخراج شده از زردچوبه و ریزوم (زمین ساقه) آن، یک رنگدانه دی‌کتون نسبتاً کمیاب در دنیای گیاهان است. به طور کلی، کورکومین یک پودر کریستالی زرد نارنجی و نامحلول در آب است که عمدتاً در تولید محصولات مانند سوسیس، محصولات گوشتی، سس ترش شده و رنگ‌های غذایی کنسرو شده استفاده می‌شود. مطالعات پزشکی نشان داده‌اند که کورکومین دارای فعالیت‌های بیولوژیکی ضدسرطان، ضدالتهاب، آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی است (Y. Liu et al. ۲۰۱۶). همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ساختار کورکومین با pH تغییر می‌کند که این تغییر خود باعث تغییر رنگ می‌شود. کورکومین به عنوان نشانگر برای آنالیت‌های قلیایی استفاده می‌شود، جایی که به دلیل تبدیل کتو-انول، ساختار دی‌کربونیل آن به رنگ قرمز تغییر می‌کند. در $pH < 8$ ، حلالیت آن بسیار کم است و محلول به رنگ زرد روشن است. در $pH > 8$ ، محلول به تدریج قرمز می‌شود و با افزایش قلیاییت، محلول در نهایت از قرمز به قهوه‌ای مایل به قرمز تبدیل می‌شود که دلیل آن تشکیل قطعات تخریب شده کورکومین یعنی اسید فرولیک و فرولولیل متان (آلدئیدها و استون) است. حلالیت زیاد کورکومین در اتانول، کلروفرم، دی‌متیل سولفوکسید و روغن عمدتاً به تغییرات در ساختار شیمیایی آن نسبت داده می‌شود. کورکومین، به عنوان یک نشانگر رنگ‌سنجی pH، در مقایسه با آنتوسیانین‌ها برای پیش تازگی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. ما، رن و وانگ (۲۰۱۷) کورکومین را در کاراگینان/پلی‌وینیل الکل برای تهیه فیلم‌های بسته‌بندی هوشمند برای نظارت بر تازگی غذا وارد کردند (Ma, Ren, and Wang ۲۰۱۷)، در حالی که موسو، سالگادو و مائوری (۲۰۱۷). با استفاده از ژلاتین به عنوان بستر جاسازی کورکومین برای تهیه فیلم خوراکی و نظارت بر تازگی غذا، مشخص کردند که با

تغییر pH از اسیدی به قلیایی، رنگ کورکومین به تدریج از زرد اولیه به قهوه‌ای مایل به قرمز تیره تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان از آن برای تشخیص مواد قلیایی تولید شده در حین نگهداری گوشت خام استفاده کرد تا تازه بودن غذا را نشان دهد (Musso, Salgado, and Mauri ۲۰۱۷). کوسوندی و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از کورکومین به عنوان یک نشانگر، حسگری را توسعه دادند که به ترکیبات اساسی فرار برای نظارت بر تغییرات کیفیت ماهی در طول ذخیره‌سازی پاسخ می‌دهد (Kuswandi et al. ۲۰۱۲).



شکل ۱: تغییرات ساختاری آنتوسیانین‌ها تحت pH مختلف (A)، رنگ محلول آنتوسیانین‌ها تحت pH مختلف (B)



شکل ۲: تغییرات ساختاری کورکومین تحت pH مختلف (A)، رنگ محلول کورکومین تحت pH مختلف (B)

مواد پلیمری فیلم نشانگر

برای فعال کردن نشانگر برای نمایش تغییرات رنگ در بسته‌بندی هوشمند، باید از یک ماتریس تشکیل فیلم به عنوان حامل نشانگر استفاده شود. انتخاب ماتریس تشکیل فیلم مناسب می‌تواند نشانگر را تثبیت و عمر نشانگرهای طبیعی مانند آنتوسیانین‌ها را طولانی‌تر کند. مواد زیست تخریب‌پذیر را می‌توان از مواد طبیعی مانند پروتئین‌ها، لیپیدها، گلیکان‌ها، پلی‌استرها و مشتقات آن‌ها به دست آورد (Alizadeh-Sani et al. ۲۰۲۱). علاوه بر این، پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر توسط واکنش‌های پلیمریزاسیون مولکولی کوچک از منابع بیولوژیکی مانند گیاهان و سوخت‌های فسیلی سنتز می‌شوند. در مقایسه با پلیمرهای مبتنی بر فسیل، پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر مانند پلی‌وینیل الکل، کیتوزان، آگار، کونجاک گلوکومانان، نشاسته و غیره به دلیل پایداری برای محیط‌زیست بهتر هستند. علاوه بر این، به دلیل ناپایداری نشانگرهای طبیعی، تکنیک‌های رایج رنگ‌دانه‌سازی و کپسوله‌سازی بین نشانگرهای طبیعی و پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر می‌تواند پایداری نشانگرهای طبیعی را افزایش دهد. به عنوان مثال، برهم‌کنش با آنتوسیانین‌ها و پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر می‌تواند باعث ایجاد رنگدانه و کپسوله شدن برای افزایش شدت رنگ و محافظت از کاتیون فلاویلیوم رنگی و همچنین ایجاد

یک مانع عملکردی بین آنتوسیانین‌ها و عوامل محیطی خارجی مانند نور، دما، آب، اکسیژن و ترکیبات واکنشی شود (Tan et al. ۲۰۲۱). نشانگرهای طبیعی مانند آنتوسیانین‌ها و پلیمرهای خنثی (مانند پلی‌وینیل الکل، آگار، نشاسته و کونجاک گلوکومانان) می‌توانند از طریق پیوندهای هیدروژنی برهم‌کنش داشته باشند. نشانگرهای طبیعی مانند آنتوسیانین‌ها و پلیمرهای باردار (مانند کیتوزان) می‌توانند از طریق فعل و انفعالات الکترواستاتیکی و پیوندهای هیدروژنی برهم‌کنش داشته باشند. از این رو، اجزای مختلف فیلم بر خواص فیلم‌های نشانگر تأثیر می‌گذارند.

پلی‌وینیل الکل تنها پلیمر مصنوعی است که می‌تواند توسط باکتری‌ها به عنوان منبع کربن و منبع انرژی استفاده شود و یک ماده پلیمری زیست تخریب‌پذیر است. سنتز پلی‌وینیل الکل، ساده، ایمن و غیرسمی و قابل تجزیه است. عملکرد سد گازی خوب است و فیلم تهیه شده توسط پلی‌وینیل الکل دارای توانایی مانع خوبی در برابر اکسیژن و سایر گازها پس از خشک شدن است. عملکرد تشکیل فیلم و زیست سازگاری به دلیل خواص مکانیکی برجسته، مقاومت کششی قوی، قیمت پایین و حلالیت خوب در آب نسبتاً خوب است (Zhan et al. ۲۰۱۴). با این حال، به دلیل وجود تعداد زیادی گروه هیدروکسیل آب‌دوست در پلی‌وینیل الکل، دارای ویژگی‌های جذب آب قوی و آب‌گریزی ضعیف است، بنابراین مستعد رطوبت در محیط است که باعث می‌شود محدودیت‌های خاصی در کاربرد داشته باشد. به منظور بهبود عملکرد آن، مطالعه شده است که پلی‌وینیل الکل مخلوط با برخی از ماکرومولکول‌های بیولوژیکی می‌تواند کاستی‌های آن مانند آب‌گریزی ضعیف و استحکام مکانیکی پایین را بهبود بخشد. پیرا، د آرودا و استفانی (۲۰۱۵) غشای نشانگر دما-زمان پلی‌وینیل الکل/کیتوزان را تهیه کردند و با افزودن مولکول‌های کیتوزان نیروی بین مولکولی را افزایش، حلالیت آب کل غشاء را کاهش، و به طور مؤثر خواص مکانیکی را بهبود بخشیدند (Pereira, de Arruda, and Stefani ۲۰۱۵). لیو و همکاران (۲۰۱۶) پلی‌وینیل الکل و نشاسته را برای تهیه غشاء مخلوط کردند و دو ماده فعال زیستی، آنتوسیانین و لیمونن را در خود جای دادند و نتایج نشان داد که غشای مخلوط شده پلی‌وینیل الکل/نشاسته نه تنها دارای اثر باکتریواستاتیک قابل توجهی است، بلکه می‌تواند به عنوان غشای نشانگر تازگی غذا برای نظارت بر تغییر کیفیت مواد غذایی در زمان ذخیره‌سازی استفاده شود. نشاسته و پلی‌وینیل الکل هر دو حاوی تعداد زیادی گروه هیدروکسیل، قطبیت قوی، ایجاد پیوند هیدروژنی آسان بین مولکول‌ها و زیست سازگاری خوب هستند (Y. Liu et al. ۲۰۱۶). علاوه بر این، این نوع غشاء را می‌توان به طور کامل تجزیه زیستی کرد و کاربرد آن در زمینه مواد غذایی چشم‌انداز وسیع‌تری خواهد داشت.

کیتوزان که به نام داستیل کیتین نیز شناخته می‌شود، یک پلیمر طبیعی است که از داستیلاسیون کیتین تشکیل می‌شود. کیتوزان یک پلی‌ساکارید مثبت نادر در طبیعت با زیست سازگاری خوب، زیست تخریب‌پذیری، خواص فیلم سازی و باکتریواستاتیک عالی است. بنابراین به طور گسترده در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود (Bilas et al. ۲۰۱۷). ماسیل، یوشیدا و فرانکو (۲۰۱۲) آنتوسیانین‌های استخراج شده از آب انار را با کیتوزان مخلوط کردند تا یک ماده بسته‌بندی هوشمند نشانگر بر اساس تغییرات دما تهیه کنند که با افزایش دما (۴۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد) رنگ فیلم نشانگر به تدریج از بنفش روشن به زرد روشن تغییر می‌کند (MacIel, Yoshida, and Franco ۲۰۱۲). با این حال، حلالیت عالی کیتوزان در آب در فرآیند کاربرد واقعی نامطلوب است، بنابراین بهبود مقاومت در برابر آب غشای کیتوزان و جلوگیری از انحلال آن در فرآیند فساد مواد غذایی، تمرکز تحقیقات فعلی است (Bilas et al. ۲۰۱۷). عوامل اتصال عرضی بیولوژیکی طبیعی استخراج شده از میوه گاردنیا، مانند تری پلی‌فسفات و جنیپین، به دلیل اثر اتصال عرضی خوب، ایمنی و غیرسمی بودن، به طور گسترده در غذا و دارو استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، ترکیبات فنلی استخراج شده از گونه‌های مختلف گیاهان می‌توانند با گروه‌های هیدروکسیل و گروه‌های آمینه آزاد در مولکول‌های کیتوزان برای بهبود آب‌گریزی خود کیتوزان از طریق نیروهای بین مولکولی برهم‌کنش کنند. خواص ضدباکتریایی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی فیلم کیتوزان نیز بهبود یافته است. این به این دلیل است که اسانس حاوی ترکیبات پلی‌فنلی بوده که فعالیت آنتی‌اکسیدانی فیلم کیتوزان را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، اسانس از طریق مکانیسم‌های ضد میکروبی مختلف از جمله تخریب دو لایه فسفولیپید در غشای سلولی، اختلال در سیستم‌های آنزیمی، آسیب مواد ژنتیکی باکتری و تشکیل اسید چرب هیدروپراکسیداز، سلول‌های میکروبی را تحت تأثیر قرار داد. هالاز و سوکا (۲۰۱۸) آنتوسیانین‌های استخراج شده از میوه شاه‌توت را با کیتوزان مخلوط کردند تا فیلم نشانگر تازگی حساس به pH را تهیه کنند و

دریافتند که مواد فعال موجود در میوه شاه توت می تواند به طور مؤثر آب گریزی کیتوزان و تحمل آب فیلم کیتوزان را بهبود بخشد (Halász and Csóka ۲۰۱۸). با این حال، پایداری این غشاء نشانگر در محیط های قلیایی نیاز به مطالعه و بررسی بیشتر دارد. آگار یک پلی ساکارید طبیعی است که از جلبک دریایی استخراج می شود. آگار یک ایزومر پیچیده است که از بقایای بتا-دی-گالاکتوزیل پیران و باقی مانده های آلفا-ال-گالاکتوزیل پیران با پیوند متناوب پیوندهای گلیکوزیدی بتا-(۱,۳) و پیوندهای گلیکوزیدی آلفا-(۳,۶) تشکیل می شود. آگار به دلیل تجدیدپذیری، زیست تخریب پذیری، خاصیت ژل شدن خوب و پایداری امولسیون عالی در غلظت های کم یک ماده پوشش دهنده با چشم انداز توسعه بالقوه است. آگار می تواند برخی از خواص فیلم نشانگر مانند خواص تشکیل فیلم، استحکام کششی، ازدیاد طول، نفوذپذیری آب را بهبود بخشد. این به این دلیل است که برهم کنش با رنگدانه طبیعی و آگار باعث ایجاد پیوندهای هیدروژنی برای بهبود خواص فیلم نشانگر مبتنی بر آگار می شود. فان و همکاران (۲۰۰۵) پوشش فیلم را با استفاده از آگار، نشاسته تاپیوکا، نشاسته برنج و سایر مواد خام تهیه کردند و دریافتند که فیلم پوشش آگار دارای ویژگی های یکنواخت تر و انعطاف پذیرتر است و مقاومت رطوبتی و خواص مکانیکی فیلم آگار به طور قابل توجهی بالاتر از سایر مواد پوشش دهنده است که کاربردهای بالقوه ای در بسته بندی مواد غذایی دارد (Phan et al. ۲۰۰۵).

نشاسته دسته ای از پلیمرهای پلی ساکارید طبیعی است که از تجمع مولکول های گلوکز، معمولاً از آمیلوز و پولولان تشکیل شده است و رایج ترین روش ذخیره سازی کربوهیدرات هاست. نشاسته در طبیعت غنی از منابع است و دارای مزایای ایمنی، غیرسمی بودن، تجزیه پذیری، تجدیدپذیری و زیست سازگاری خوب است که یک ماده خام ایده آل برای تشکیل فیلم در مواد غذایی است. با این حال، به دلیل آب گریزی ضعیف و استحکام مکانیکی کم، نشاسته در کاربردهای بسته بندی مواد غذایی محدود است. به منظور غلبه بر عیوب فوق، مشخص شد که نشاسته مخلوط شده با اصلاح کننده سدیم تری متافسفات می تواند مقاومت کششی مکانیکی آن را با اتصال عرضی شیمیایی افزایش دهد (Gao et al. ۲۰۱۴). این به دلیل این واقعیت است که برهم کنش با رنگدانه طبیعی و آگار باعث ایجاد پیوندهای هیدروژنی برای بهبود خواص فیلم نشانگر مبتنی بر آگار می شود.

روش تهیه فیلم نشانگر

تولید فیلم های پلیمری زیست تخریب پذیر می تواند بر اساس فرآیندهای خشک و مرطوب باشد. فرآیند مرطوب که به عنوان ریخته گری حلال نیز شناخته می شود، شامل حل کردن پلیمرها یا سایر مواد افزودنی در یک حلال سازگار و سپس ریخته گری و خشک کردن آن ها بر روی یک سطح صاف است (Mohamed, El-Sakhawy, and El-Sakhawy ۲۰۲۰). این روش ساده و راحت است و می تواند برای طیف گسترده ای از پلیمرهای زیستی اعمال شود، اما پردازش در مقیاس بزرگ چالش برانگیز است. علاوه بر این، تبخیر حلال ها در طول تشکیل فیلم به انتشار ترکیبات آلی فرار در اتمسفر کمک می کند، مگر اینکه حلال جذب و دوباره استفاده شود. برای تهیه عامل رنگ سنجی در فیلم های مبتنی بر پلیمر، در مطالعات اخیر از ریخته گری با حلال استفاده کرده اند که در آن رنگ نشانگر در یک حلال انتخابی حل شده و قبل از خشک کردن و ریخته گری با محلول پلیمری مخلوط می شود (Jiang et al. ۲۰۲۰). برای تشکیل یک فیلم نشانگر با خواص مکانیکی قوی، برهم کنش های بین مولکولی مانند پیوند هیدروژنی، کووالانسی، آب گریز و برهم کنش های الکترواستاتیکی برای ایجاد استحکام پیوستگی ذاتی مهم هستند. علاوه بر این، ترکیب پلیمری می تواند به طور قابل توجهی بر ویژگی های مواد از جمله بلورینگی، چگالی، تخلخل و انعطاف پذیری آن ها تأثیر بگذارد. افزودن مواد افزودنی به فرآیند تولید می تواند خواص فیلم را تغییر دهد. به عنوان مثال، افزودن برخی مواد بر افزایش انعطاف پذیری و قابلیت ارتجاعی فیلم تأثیر گذار است (Vieira et al. ۲۰۱۱).

در تهیه نشانگرهای نوع نانوالیاف از فناوری الکتروریسی که یک فناوری ریسندگی می باشد استفاده می شود که محلول پلیمری را بر روی دستگاه گیرنده رسوب می دهد تا تحت اثر میدان الکتریکی اعمال شده، الیاف تشکیل شود. فناوری الکتروریسی می تواند نانوالیاف را به سادگی، راحت، مؤثر و اقتصادی به دست آورد و در حال حاضر تنها روشی است که می تواند نانوالیاف پیوسته را تهیه کند. این فناوری به دلیل عملکرد برتر آن برای فیلتر کردن مواد (J. Choi et al. ۲۰۱۵)، حسگرهای الکترونیکی و مهندسی بافت بیولوژیکی استفاده شده است. در حال حاضر فناوری الکتروریسی معمولاً در زمینه نشانگرهای مواد غذایی مورد استفاده قرار نمی گیرد. وان در چورن و همکاران

(۲۰۱۰) رنگ نشانگر pH بنفش بروموکرزول را به محلول پلیمری اضافه کردند و حسگر pH نانوالیاف را با فناوری الکتروریسی توسعه دادند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که نشانگر pH توسعه‌یافته با این روش می‌تواند تغییرات pH را به‌طور پایدار و دقیق نشان دهد (Van Der Schueren et al. ۲۰۱۰). نشانگرهای الکتروریسی دارای مزایای قطر فیبر کوچک، تخلخل بالا و نفوذپذیری هوا می‌باشند و سرعت پاسخگویی سریع تری نسبت به نشانگرهای تهیه شده با روش‌های ریخته‌گری سنتی دارند و می‌توانند کیفیت غذا را به‌طور مؤثرتر و سریع‌تری منعکس کنند. با این حال، به دلیل نیازهای بالای فناوری الکتروریسی بر روی تجهیزات و فناوری عملیات، برای کنترل مناسب نیست و در مقایسه با فناوری سنتی، هزینه آن افزایش یافته است و نمی‌توان آن را در مقیاس بزرگ ارتقا داد. این اتفاق توسعه فناوری الکتروریسی را در زمینه نشانگرهای غذایی محدود می‌کند.

کاربرد فیلم‌های نشانگر در مواد غذایی تازه

بسته‌بندی هوشمند ساخته شده با استفاده از نشانگرهای طبیعی و بسترهای تشکیل دهنده فیلم تجزیه‌پذیر مناسب و روش‌های مختلف فیلم‌سازی، در نهایت در مواد غذایی تازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً غذاهای تازه شامل گوشت تازه، غذاهای دریایی، سبزیجات و میوه‌ها، محصولات لبنی و غیره می‌شوند.

فرآورده‌های گوشتی

با افزایش استانداردهای زندگی مردم، نیازهای کیفی مردم برای گوشت تازه نیز افزایش می‌یابد. به دلیل محتوای بالای آب و چربی غذاهای گوشتی خام (Ahmed et al. ۲۰۱۸; Dudnyk et al. ۲۰۱۸)، رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها بسیار آسان است و باعث فاسد شدن گوشت تازه می‌شود. فاسد شدن گوشت تازه نه تنها بو و بافت گوشت تازه را تغییر می‌دهد، بلکه محتوای غذایی آن را نیز تا حد زیادی از بین می‌برد. تغییر در pH عامل مهمی در فساد گوشت تازه است. ترکیبات حاوی گوگرد، آمین‌های فرار مانند تری‌متیل آمین، دی‌متیل آمین و آمونیاک حاصل از تجزیه میکروبی پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه و کربوهیدرات‌ها موادی هستند که در فرآورده‌های گوشتی تازه در فرآیند فساد تولید می‌شوند (Song, Canellas, and Nerin ۲۰۲۱). چنین متابولیت‌هایی باعث تغییرات قابل توجهی در pH در محیط بسته‌بندی گوشت تازه می‌شوند. بنابراین، می‌توان از تغییر pH برای نظارت بیشتر بر تازگی گوشت تازه در طول نگهداری استفاده کرد. در سال‌های اخیر محققان داخل و خارج از کشور تحقیقات زیادی در مورد کاربرد بسته‌بندی هوشمند نشان‌دهنده تازگی در گوشت تازه انجام داده‌اند. چوی و همکاران (۲۰۱۷) از مواد طبیعی تجزیه پذیر آگار و نشاسته سیب‌زمینی برای تثبیت آنتوسیانین‌های استخراج شده از سیب‌زمینی شیرین بنفش استفاده کردند و محلول عصاره آنتوسیانین و غشای نشاسته آنتوسیانین حاوی آگار/سیب‌زمینی تغییرات رنگی متفاوتی (از قرمز اولیه تا سبز) در محیط‌های با pH مختلف (۲ تا ۱۰) نشان دادند (I. Choi et al. ۲۰۱۷). موسو، سالگادو و ماوری (۲۰۱۷) از ژلاتین به عنوان بستری برای جاسازی کورکومین برای تهیه فیلم‌های خوراکی به منظور نظارت بر تازگی مواد غذایی استفاده کردند و دریافتند که با تغییر مقدار pH از اسیدی به قلیایی، برچسب به تدریج از زرد به قهوه‌ای مایل به قرمز تیره تغییر می‌کند (Musso, Salgado, and Mauri ۲۰۱۷). بنابراین می‌توان از آن برای شناسایی مواد اولیه و بی‌آمین تولید شده مانند میزان ازت فرار کل استفاده کرد.

محصولات آبی و غذاهای دریایی

ماهی، سخت پوستان و نرم‌تنان سرشار از مواد مغذی، روغن و پروتئین هستند. با این حال، به دلیل محتوای بالای اسیدهای چرب غیراشباع موجود در روغن آن، محصولات آبی بیشتر از گوشت خام معمولی مستعد فساد هستند (Jiang et al. ۲۰۲۰). در فرآیند فساد آبیان، تعداد زیادی میکروارگانیسم رشد می‌کنند و تکثیر می‌یابند. ابزار کلی تشخیص تازگی محصول، تشخیص تعداد کل کلنی‌های محصول است (Majdinasab et al. ۲۰۱۸). شایع‌ترین میکروارگانیسم فساد، سودوموناس است که با شناسایی متابولیت‌های تولیدمثل این باکتری می‌توان ماندگاری محصولات آبی تازه را پایش کرد (Kuswandi et al. ۲۰۱۲). در حال حاضر روش‌های ارزیابی

تازگی آبریان عمدتاً شامل ارزیابی حسی و آنالیز شیمیایی می‌باشد. ارزیابی حسی یک ارزیابی جامع از وضعیت رنگ، بو و غیره محصولات آبری است (Merz et al. ۲۰۲۰; Zhai et al. ۲۰۱۷). با این حال، هنگامی که بر اساس حواس مشخص می‌شود که محصول آبری خراب شده است، به این معنی است که سلول‌های داخلی آبری شروع به اتولیز آشکار کرده‌اند و این روش برای بسته‌بندی محصولات مناسب نیست. آنالیزهای شیمیایی برای تشخیص فساد شامل pH، رطوبت، ترکیبات فرار، محتوای پروتئین یا ترکیب، و اکسیداسیون لیپید است (Shi et al. ۲۰۲۱; Wu et al. ۲۰۲۱) و نیتروژن مبتنی بر نمک فرار به طور گسترده به عنوان یک شاخص اصلی برای ارزیابی تازگی محصولات در نظر گرفته می‌شود. میکروارگانیزم‌ها با تجزیه پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه و اسیدهای چرب موجود در محصولات آبی، نیتروژن فرار مبتنی بر نمک، ترکیبات حاوی گوگرد و سایر اجزای مولکولی ریز فرار را تولید می‌کنند که باعث تغییر در pH محیط می‌شوند و در بسته‌بندی هوشمند می‌توان به سرعت با توجه به پدیده تغییر رنگ نشانگرهای pH، تازگی محصولات را قضاوت کرد.

محصولات لبنی

محصولات لبنی (مانند شیر مایع، شیر غلیظ، پودر شیر، پنیر، ماست، خامه، کره و محصولات لبنی) بسیاری از مواد مغذی (مانند پروتئین، کلسیم، منیزیم، ویتامین‌ها) را که در رژیم غذایی روزانه ما ضروری هستند، فراهم می‌کنند (Givens ۲۰۱۸). از آنجایی که آن‌ها دارای مواد باارزش و مغذی هستند، در طول ذخیره‌سازی به میکروارگانیزم‌ها و آنزیم‌ها حساس می‌باشند (Poghossian, Geissler, and Schöning ۲۰۱۹). اما به دلیل خاص بودن محصولات لبنی، شرایط نگهداری آن‌ها با سایر مواد غذایی متفاوت است و مطالعات کمی در مورد رنگ‌سنجی نشانگر بسته‌بندی هوشمند انجام شده که در مرحله آزمایش هستند. برای تشخیص فساد شیر، بیشتر مطالعات اخیر بر روی بررسی pH ناشی از تخمیر میکروبی متمرکز شده‌اند (Moazami Goodarzi et al. ۲۰۲۰; Tripathy et al. ۲۰۱۹). با این حال، محصولات لبنی بیشتر در بسته‌بندی‌های مات قرار می‌گیرند تا از قرار گرفتن آن‌ها در معرض نور جلوگیری شود، که در عین حال بسته‌بندی مات بر مشاهده گسترش رنگ نشانگر نیز تأثیر می‌گذارد.

نتیجه‌گیری و آینده‌نگری

بسته‌بندی هوشمند نشانگر رنگ به عنوان نوع جدیدی از روش بسته‌بندی، نه تنها دارای مزایای اندازه کوچک، حساسیت بالا و هزینه کم است، بلکه یک روش بصری است که برای نظارت بر کیفیت مواد غذایی در نگهداری طولانی‌مدت یا حمل‌ونقل طولانی‌مدت مناسب است، و می‌تواند ضایعات مواد غذایی را تا حدی کاهش دهد. در کاربرد بسته‌بندی هوشمند، مواد و انواع نشانگر، ماتریس تشکیل فیلم، روش‌های تشکیل فیلم و شرایط نگهداری از عوامل مؤثر بر حساسیت فیلم نشانگر هستند.

با این حال، تا آنجا که به وضعیت فعلی بسته‌بندی هوشمند مربوط می‌شود، می‌توان به آینده امیدوار بود:

- (۱) به منظور شناسایی مواد مشخصه کاهش کیفیت غذا، بسته‌بندی هوشمند بصری از نشانگرهای جدید و ماتریس‌های تشکیل‌دهنده فیلم استفاده می‌کند که حفاظت و ایمنی بالایی دارند و تأثیر قابل توجهی بر طعم غذا نمی‌گذارند.
- (۲) مواد غذایی کهنه، آسیب خاصی به سلامت انسان وارد می‌کنند. بنابراین بهبود مستمر در دقت بر کیفیت و نظارت بر ایمنی بسته‌بندی‌های هوشمند بصری و کاهش میزان تشخیص نتایج مثبت یا منفی کاذب نیز، یکی از نقاط داغ تحقیقاتی است.
- (۳) بسته‌بندی هوشمند بصری محدود به نظارت بر تازگی غذا نیست، بلکه بر افزایش ماندگاری غذا، استریلیزاسیون، خوردگی و سایر مواد نگهداری محصولات غذایی نیز توجه داشته و می‌تواند تضمین قوی‌تری برای کیفیت مواد غذایی فراهم کند.
- (۴) در آینده استفاده از بسته‌بندی هوشمند بصری زمینه‌های زیادی را پوشش می‌دهد و کاربردهای زیادی در زمینه‌های پزشکی و بهداشتی، حفاظت از محیط‌زیست، صنعت نساجی و غیره خواهد داشت. تحقیقات بیشتری در مورد عملکرد مواد مورد نیاز است.

منابع

- Ahmed, Ishfaq, Hong Lin, Long Zou, Zhenxing Li, Aaron L. Brody, Ihsan Mabood Qazi, Liangtao Lv, et al. ۲۰۱۸. "An Overview of Smart Packaging Technologies for Monitoring Safety and Quality of Meat and Meat Products." *Packaging Technology and Science* ۳۱(۷): ۴۴۹-۷۱. doi:۱۰.۱۰۰۲/pts.۲۳۸۰.
- Alizadeh-Sani, Mahmood, Milad Tavassoli, David Julian McClements, and Hamed Hamishehkar. ۲۰۲۱. "Multifunctional Halochromic Packaging Materials: Saffron Petal Anthocyanin Loaded-Chitosan Nanofiber/Methyl Cellulose Matrices." *Food Hydrocolloids* ۱۱۱(May ۲۰۲۰): ۱۰۶۲۳۷. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.foodhyd.۲۰۲۰.۱۰۶۲۳۷.
- Atabey, Hasan, Hayati Sari, and Faisal N. Al-Obaidi. ۲۰۱۲. "Protonation Equilibria of Carminic Acid and Stability Constants of Its Complexes with Some Divalent Metal Ions in Aqueous Solution." *Journal of Solution Chemistry* ۴۱(۵): ۷۹۳-۸۰۳. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۹۵۳-۰۱۲-۹۸۳۰-۷.
- Becerril, Raquel, Cristina Nerín, and Filomena Silva. ۲۰۲۱. "Bring Some Colour to Your Package: Freshness Indicators Based on Anthocyanin Extracts." *Trends in Food Science and Technology* ۱۱۱(March): ۴۹۵-۵۰۵. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.tifs.۲۰۲۱.۰۲.۰۴۲.
- Bilas, Ram, K. Sriram, P. Uma Maheswari, and K. M.Meera Sheriffa Begum. ۲۰۱۷. "Highly Biocompatible Chitosan with Super Paramagnetic Calcium Ferrite (CaFe₂O₄) Nanoparticle for the Release of Ampicillin." *International Journal of Biological Macromolecules* ۹۷: ۵۱۳-۲۵. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.ijbiomac.۲۰۱۷.۰۱.۰۳۶.
- Choi, Inyoung, Jun Young Lee, Monique Lacroix, and Jaejoon Han. ۲۰۱۷. "Intelligent PH Indicator Film Composed of Agar/Potato Starch and Anthocyanin Extracts from Purple Sweet Potato." *Food Chemistry* ۲۱۸: ۱۲۲-۲۸. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.foodchem.۲۰۱۶.۰۹.۰۵۰.
- Choi, Jeongan, Byeong Joon Yang, Gwi Nam Bae, and Jae Hee Jung. ۲۰۱۵. "Herbal Extract Incorporated Nanofiber Fabricated by an Electrospinning Technique and Its Application to Antimicrobial Air Filtration." *ACS Applied Materials and Interfaces* ۷(۴۵): ۲۵۳۱۳-۲۰. doi:۱۰.۱۰۲۱/acsami.۵b۰۷۴۴۱.
- Dudnyk, Iuliia, Emma Rose Janeček, Joanne Vaucher-Joset, and Francesco Stellacci. ۲۰۱۸. "Edible Sensors for Meat and Seafood Freshness." *Sensors and Actuators, B: Chemical* ۲۵۹: ۱۱۰۸-۱۲. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.snb.۲۰۱۷.۱۲.۰۵۷.
- Fang, Zhongxiang, Yanyun Zhao, Robyn D. Warner, and Stuart K. Johnson. ۲۰۱۷. "Active and Intelligent Packaging in Meat Industry." *Trends in Food Science and Technology* ۶۱(۲): ۶۰-۷۱. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.tifs.۲۰۱۷.۰۱.۰۰۲.
- Gao, Fei, Dong Li, Chong Hao Bi, Zhi Huai Mao, and Benu Adhikari. ۲۰۱۴. "Preparation and Characterization of Starch Crosslinked with Sodium Trimetaphosphate and Hydrolyzed by Enzymes." *Carbohydrate Polymers* ۱۰۳(۱): ۳۱۰-۱۸. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.carbpol.۲۰۱۳.۱۲.۰۲۸.
- Ghaani, Masoud, Carlo A. Cozzolino, Giulia Castelli, and Stefano Farris. ۲۰۱۶. "An Overview of the Intelligent Packaging Technologies in the Food Sector." *Trends in Food Science and Technology* ۵۱: ۱-۱۱. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.tifs.۲۰۱۶.۰۲.۰۰۸.
- Givens, D. I. ۲۰۱۸. "Review: Dairy Foods, Red Meat and Processed Meat in the Diet: Implications for Health at Key Life Stages." *Animal* ۱۲(۸): ۱۷۰۹-۲۱. doi:۱۰.۱۰۱۷/S1۷۵۱۷۳۱۱۱۸۰۰۰۶۴۲.
- Halász, Katalin, and Levente Csóka. ۲۰۱۸. "Black Chokeberry (Aronia Melanocarpa) Pomace Extract Immobilized in Chitosan for Colorimetric PH Indicator Film Application." *Food Packaging and Shelf Life* ۱۶(September ۲۰۱۷): ۱۸۵-۹۳. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.fpsl.۲۰۱۸.۰۳.۰۰۲.
- Jamróz, Ewelina, P. Kulawik, Paulina Guzik, and I. Duda. ۲۰۱۹. "The Verification of Intelligent Properties of Furcellaran Films with Plant Extracts on the Stored Fresh Atlantic Mackerel during Storage at ۲ °C." *Food Hydrocolloids* ۹۷(July): ۱۰۵۲۱۱. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.foodhyd.۲۰۱۹.۱۰۵۲۱۱.
- Jiang, Guangyang, Xiaoyan Hou, Xuedan Zeng, Can Zhang, Hejun Wu, Guanghui Shen, Shanshan Li, et al. ۲۰۲۰. "Preparation and Characterization of Indicator Films from Carboxymethyl-Cellulose/Starch and Purple Sweet Potato (Ipomoea Batatas (L.) Lam) Anthocyanins for Monitoring Fish Freshness." *International Journal of Biological Macromolecules* ۱۴۳: ۳۵۹-۷۲. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.ijbiomac.۲۰۱۹.۱۲.۰۲۴.
- Kerry, J. P., M. N. O'Grady, and S. A. Hogan. ۲۰۰۶. "Past, Current and Potential Utilisation of Active and Intelligent Packaging Systems for Meat and Muscle-Based Products: A Review." *Meat Science* ۷۴(۱):

- ۱۱۳-۳۰. doi:10.1016/j.meatsci.2006.04.044.
- Kuswandi, Bambang, Jayus, Anggi Restyana, Aminah Abdullah, Lee Yook Heng, and Musa Ahmad. ۲۰۱۲. "A Novel Colorimetric Food Package Label for Fish Spoilage Based on Polyaniline Film." *Food Control* ۲۵(۱): ۱۸۴-۱۸۹. doi:10.1016/j.foodcont.2011.10.00۸.
- Lee, Kaeun, Seunghye Baek, Dowan Kim, and Jongchul Seo. ۲۰۱۹. "A Freshness Indicator for Monitoring Chicken-Breast Spoilage Using a Tyvek® Sheet and RGB Color Analysis." *Food Packaging and Shelf Life* ۱۹(July ۲۰۱۸): ۴۰-۴۶. doi:10.1016/j.fpsl.2018.11.016.
- Liu, Jingrong, Hualin Wang, Min Guo, Linlin Li, Minmin Chen, Suwei Jiang, Xingjiang Li, and Shaotong Jiang. ۲۰۱۹. "Extract from Lycium Ruthenicum Murr. Incorporating κ -Carrageenan Colorimetric Film with a Wide PH-Sensing Range for Food Freshness Monitoring." *Food Hydrocolloids* ۹۴(March): ۱-۱۰. doi:10.1016/j.foodhyd.2019.03.00۸.
- Liu, Yujia, Yanxue Cai, Xueying Jiang, Jinping Wu, and Xueyi Le. ۲۰۱۶. ۵۲ *Food Hydrocolloids Molecular Interactions, Characterization and Antimicrobial Activity of Curcumin-Chitosan Blend Films*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.foodhyd.2016.08.00۵.
- Ma, Qianyun, Yimei Ren, and Lijuan Wang. ۲۰۱۷. "Investigation of Antioxidant Activity and Release Kinetics of Curcumin from Tara Gum/ Polyvinyl Alcohol Active Film." *Food Hydrocolloids* ۷۰: ۲۸۶-۲۹۲. doi:10.1016/j.foodhyd.2017.04.01۸.
- MacIel, Vinicius B.V., Cristiana M.P. Yoshida, and Telma T. Franco. ۲۰۱۲. "Development of a Prototype of a Colourimetric Temperature Indicator for Monitoring Food Quality." *Journal of Food Engineering* ۱۱۱(۱): ۲۱-۲۷. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.01.03۷.
- Majdinasab, Marjan, Seyed Mohammad Hashem Hosseini, Marziyeh Sepidname, Manizheh Negahdarifar, and Peiwu Li. ۲۰۱۸. "Development of a Novel Colorimetric Sensor Based on Alginate Beads for Monitoring Rainbow Trout Spoilage." *Journal of Food Science and Technology* ۵۵(۵): ۱۶۹۵-۱۷۰۴. doi:10.1007/s131۹۷-۰۱۸-۳۰۸۲-۵.
- Merz, Barbara, Cristiane Capello, Gabriel Coelho Leandro, Denise Esteves Moritz, Alcilene Rodrigues Monteiro, and Germán Ayala Valencia. ۲۰۲۰. "A Novel Colorimetric Indicator Film Based on Chitosan, Polyvinyl Alcohol and Anthocyanins from Jambolan (Syzygium Cumini) Fruit for Monitoring Shrimp Freshness." *International Journal of Biological Macromolecules* ۱۵۳: ۶۲۵-۳۲. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.03.04۸.
- De Meyer, Thierry, Karen Hemelsoet, Veronique Van Speybroeck, and Karen De Clerck. ۲۰۱۴. "Substituent Effects on Absorption Spectra of PH Indicators: An Experimental and Computational Study of Sulfonphthaleine Dyes." *Dyes and Pigments* ۱۰۲: ۲۴۱-۵۰. doi:10.1016/j.dyepig.2013.10.04۸.
- Moazami Goodarzi, Mohsen, Mehran Moradi, Hossein Tajik, Mehrdad Forough, Parya Ezati, and Bambang Kuswandi. ۲۰۲۰. "Development of an Easy-to-Use Colorimetric PH Label with Starch and Carrot Anthocyanins for Milk Shelf Life Assessment." *International Journal of Biological Macromolecules* ۱۵۳: ۲۴۰-۴۷. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.03.01۴.
- Mohamed, Salah A.A., Mohamed El-Sakhawy, and Mohamed Abdel Monem El-Sakhawy. ۲۰۲۰. "Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review." *Carbohydrate Polymers* ۲۳۸: ۱۱۶۱۷۸. doi:10.1016/j.carbpol.2020.1161۷۸.
- Müller, Patricia, and Markus Schmid. ۲۰۱۹. "Intelligent Packaging in the Food Sector: A Brief Overview." *Foods* ۸(۱). doi:10.3390/foods۸۰۱۰۰۱۶.
- Musso, Yanina S., Pablo R. Salgado, and Adriana N. Mauri. ۲۰۱۷. "Smart Edible Films Based on Gelatin and Curcumin." *Food Hydrocolloids* ۶۶: ۸-۱۵. doi:10.1016/j.foodhyd.2016.11.00۷.
- Oudjedi, K., S. Manso, C. Nerin, N. Hassissen, and F. Zaidi. ۲۰۱۹. "New Active Antioxidant Multilayer Food Packaging Films Containing Algerian Sage and Bay Leaves Extracts and Their Application for Oxidative Stability of Fried Potatoes." *Food Control* ۹۸: ۲۱۶-۲۶. doi:10.1016/j.foodcont.2018.11.01۸.
- Pereira, Valdir Aniceto, Iza Natália Queiroz de Arruda, and Ricardo Stefani. ۲۰۱۵. "Active Chitosan/PVA Films with Anthocyanins from Brassica Oleraceae (Red Cabbage) as Time-Temperature Indicators for Application in Intelligent Food Packaging." *Food Hydrocolloids* ۴۳: ۱۸۰-۱۸۸. doi:10.1016/j.foodhyd.2014.05.01۴.
- Phan, The D., F. Debeaufort, D. Luu, and A. Voilley. ۲۰۰۵. "Functional Properties of Edible Agar-Based and

- Starch-Based Films for Food Quality Preservation.” *Journal of Agricultural and Food Chemistry* ۵۳(۴): ۹۷۳–۸۱. doi:۱۰.۱۰۲۱/jf.۰۴۰۳۰۹s.
- Poghossian, Arshak, Hanno Geissler, and Michael J. Schöning. ۲۰۱۹. “Rapid Methods and Sensors for Milk Quality Monitoring and Spoilage Detection.” *Biosensors and Bioelectronics* ۱۴۰(April): ۱۱۱۲۷۲. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.bios.۲۰۱۹.۰۴.۰۴۰.
- Restuccia, Donatella, U. Gianfranco Spizzirri, Ortensia I. Parisi, Giuseppe Cirillo, Manuela Curcio, Francesca Iemma, Francesco Puoci, Giuliana Vinci, and Nevio Picci. ۲۰۱۰. “New EU Regulation Aspects and Global Market of Active and Intelligent Packaging for Food Industry Applications.” *Food Control* ۲۱(۱۱): ۱۴۲۵–۳۵. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.foodcont.۲۰۱۰.۰۴.۰۲۸.
- Schaefer, Dirk, and Wai M. Cheung. ۲۰۱۸. “Smart Packaging: Opportunities and Challenges.” *Procedia CIRP* ۷۲(March): ۱۰۲۲–۲۷. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.procir.۲۰۱۸.۰۳.۲۴۰.
- Van Der Schueren, Lien, Tybo Mollet, Özgür Ceylan, and Karen De Clerck. ۲۰۱۰. “The Development of Polyamide ۶,۶ Nanofibres with a PH-Sensitive Function by Electrospinning.” *European Polymer Journal* ۴۶(۱۲): ۲۲۲۹–۳۹. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.eurpolymj.۲۰۱۰.۰۹.۰۱۶.
- Shi, Ce, Jiaran Zhang, Zhixin Jia, Xinting Yang, and Zhongyun Zhou. ۲۰۲۱. “Intelligent PH Indicator Films Containing Anthocyanins Extracted from Blueberry Peel for Monitoring Tilapia Fillet Freshness.” *Journal of the Science of Food and Agriculture* ۱۰۱(۵): ۱۸۰۰–۱۸۱۱. doi:۱۰.۱۰۰۲/jsfa.۱۰۷۹۴.
- Song, Xuechao, Elena Canellas, and Cristina Nerin. ۲۰۲۱. “Screening of Volatile Decay Markers of Minced Pork by Headspace-Solid Phase Microextraction–Gas Chromatography–Mass Spectrometry and Chemometrics.” *Food Chemistry* ۳۴۲: ۱۲۸۳–۴۱. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.foodchem.۲۰۲۰.۱۲۸۳۴۱.
- Tan, Chen, Meigui Huang, Jing Wang, and Baoguo Sun. ۲۰۲۱. “Biopolyelectrolyte Complex (BioPEC)-Based Carriers for Anthocyanin Delivery.” *Food Hydrocolloids for Health* ۱(October): ۱۰۰۰۳۷. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.fhfh.۲۰۲۱.۱۰۰۰۳۷.
- Tripathy, Suryasata, Manne Shanmukh Reddy, Siva Rama Krishna Vanjari, Soumya Jana, and Shiv Govind Singh. ۲۰۱۹. “A Step towards Miniaturized Milk Adulteration Detection System: Smartphone-Based Accurate PH Sensing Using Electrospun Halochromic Nanofibers.” *Food Analytical Methods* ۱۲: ۶۱۲–۲۴.
- Ul, A. ۲۰۰۵. “R : Concise Reviews / Hypotheses in Food Science Intelligent Packaging : T Package Devices.” ۷۰(۱): ۱–۱۰.
- Vieira, Melissa Gurgel Adeodato, Mariana Altenhofen Da Silva, Lucielen Oliveira Dos Santos, and Marisa Masumi Beppu. ۲۰۱۱. “Natural-Based Plasticizers and Biopolymer Films: A Review.” *European Polymer Journal* ۴۷(۳): ۲۵۴–۶۳. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.eurpolymj.۲۰۱۰.۱۲.۰۱۱.
- Wrona, Magdalena, Filomena Silva, Jesús Salafranca, Cristina Nerín, María José Alfonso, and Miguel Ángel Caballero. ۲۰۲۱. “Design of New Natural Antioxidant Active Packaging: Screening Flowsheet from Pure Essential Oils and Vegetable Oils to Ex Vivo Testing in Meat Samples.” *Food Control* ۱۲۰: ۱–۱۷. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.foodcont.۲۰۲۰.۱۰۷۵۳۶.
- Wu, Li Ting, I. Lin Tsai, Yi Cheng Ho, Yu Hao Hang, Chi Lin, Min Lang Tsai, and Fwu Long Mi. ۲۰۲۱. “Active and Intelligent Gellan Gum-Based Packaging Films for Controlling Anthocyanins Release and Monitoring Food Freshness.” *Carbohydrate Polymers* ۲۵۴(October ۲۰۲۰): ۱۱۷۴۱۰. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.carbpol.۲۰۲۰.۱۱۷۴۱۰.
- Zhai, Xiaodong, Jiyong Shi, Xiaobo Zou, Sheng Wang, Caiping Jiang, Junjun Zhang, Xiaowei Huang, Wen Zhang, and Mel Holmes. ۲۰۱۷. “Novel Colorimetric Films Based on Starch/Polyvinyl Alcohol Incorporated with Roselle Anthocyanins for Fish Freshness Monitoring.” *Food Hydrocolloids* ۶۹: ۳۰۸–۱۷. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.foodhyd.۲۰۱۷.۰۲.۰۱۴.
- Zhan, Jia-yu, Guo-feng Tian, Zhan-peng Wu, Sheng-li Qi, and De-zhen Wu. ۲۰۱۴. “Preparation of Polyimide/BaTiO₃/Ag Nanocomposite Films via in Situ Technique and Study of Their Dielectric Behavior.” *Chinese Journal of Polymer Science* ۳۲: ۴۲۴–۳۱.
- ZHANG, Shi lin, Peng DENG, Yu chao XU, Shan wu LÜ, and Jian jun WANG. ۲۰۱۶. “Quantification and Analysis of Anthocyanin and Flavonoids Compositions, and Antioxidant Activities in Onions with Three Different Colors.” *Journal of Integrative Agriculture* ۱۵(۹): ۲۱۷۵–۸۱. doi:۱۰.۱۰۱۶/S۲۰۹۵-۳۱۱۹(۱۶)۶۱۳۸۵-۰.

Recent advances in pH-sensitive indicator films based on natural colorants for smart monitoring of food freshness: a review

Mohammad Amin Saadi

Food hygiene expert, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran

Abstract

The demand for safe and fresh food around the world is increasing due to the advancement of various technologies and Sciences. Today, in the field of food, modern and advanced packaging is responsible for a large part of this demand and is very effective in the competition of businesses. As a new method of packaging, film packaging with a pH-sensitive indicator based on natural pigment can be used to intelligently monitor food freshness and provide visual information with benefits such as small size, low cost and high accuracy. Based on the value and application of natural pigment in pH-sensitive marker packaging, this article examines the types of natural pigment markers (such as anthocyanins, curcumin) and film-forming matrix materials, and refers to the method of preparing the desired film and its applications in various foods. In order to provide natural pigment and enhance the packaging of pH-sensitive marker film to monitor food freshness, further research is needed to overcome current constraints.

Keywords: Films, Indicator, Intelligent, Novelty, Packaging, pH.