

نشانگرهای زمان - دما به عنوان بسته‌بندی‌های هوشمند در

صنایع غذایی: انواع، مکانیسم عمل و کاربردها

هادی الماسی^{۱*}، نیما قدیری علمداری^۲، نجمه سهرابی^۳

۱- دانشیار، ۲ و ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶)

چکیده

امروزه با افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان و تمایل آنها به تهیه و مصرف محصولات غذایی سالم، توجه تولیدکنندگان به استفاده از روش‌های نوین بسته‌بندی را افزایش داده است. بسته‌بندی هوشمند یکی از انواع بسته‌بندی‌های نوین است که با جمع‌آوری و ارائه اطلاعات از محیط داخل و بیرون ماده غذایی، نسبت به کیفیت و قابلیت مصرف محصول بسته‌بندی شده هشدار می‌دهد. نشانگرهای زمان-دما یکی از انواع بسته‌بندی‌های هوشمند محسوب می‌شوند که در مواردی که نگهداری محصول به شرایط دمایی خاصی نیاز دارد مورد استفاده قرار می‌گیرند. حمل و نقل، نگهداری و عرضه محصولاتی مانند فرآورده‌های گوشتی و محصولات لبنی به حفظ زنجیره سرما نیازمند است و نشانگرهای زمان-دما قادر هستند نسبت به رعایت یا عدم رعایت این شرایط در طی نگهداری و عرضه محصول هشدار دهند. نشانگرهای زمان-دما انواع مختلفی دارند و هرکدام از آنها با ساز و کارهای عمل متفاوت نسبت به پایش شرایط نگهداری و ارائه اطلاعات، اقدام می‌کنند. در این مقاله مروری، انواع نشانگرهای زمان-دما معرفی شده و ساز و کار عمل آنها و همچنین کاربردهای آنها به عنوان بسته‌بندی هوشمند در محصولات غذایی مختلف تشریح شده است.

واژه‌های کلیدی: بسته‌بندی هوشمند، نشانگر زمان-دما، ساز و کار عمل، انبارمانی ماده غذایی، حساسیت تغییر رنگ

۱- مقدمه

باشند. ویژگی بارز بسته‌بندی‌های هوشمند، توانایی ایجاد ارتباط با مصرف‌کننده و مخابره اطلاعات مربوط به محصول بسته‌بندی شده به مصرف‌کننده است. خصوصیتی که دیگر بسته‌بندی‌ها فاقد آن هستند [۱]. بسته‌بندی‌های هوشمند براساس نحوه عملکرد و نوع اطلاعاتی که ارائه می‌دهند، به انواع مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. مهمترین انواع بسته‌بندی هوشمند در صنایع غذایی عبارت از نشان‌گرهای رشد میکروبی، نشان‌گرهای زمان-دما، نشان‌گرهای میزان تازگی مواد غذایی و انواع حسگرهای تشخیص ترکیبات شیمیایی مختلف مانند ترکیبات سمی و بیماری‌زا هستند [۲،۳].

هدف اصلی این مقاله، مرور انواع نشانگرهای زمان-دما به عنوان یکی از مهمترین انواع بسته‌بندی هوشمند در صنایع غذایی است. در این مقاله، طبقه‌بندی نشانگرهای زمان-دما براساس ساز و کار عمل و نحوه عملکرد آنها در تشخیص میزان تازگی و مدت زمان انبارمانی محصول غذایی مورد بررسی قرار گرفته است و به جدیدترین دستاوردها در زمینه توسعه

امروزه اعتماد مصرف‌کنندگان به محصولات غذایی و رقابت تولیدکنندگان برای به دست آوردن سهم بیشتر از بازار مصرف، باعث شده است که در کنار نوآوری در محصولات، توجه به استفاده از بسته‌بندی‌های نوین نیز بیش از پیش افزایش یابد. مصرف‌کنندگان داشتن اطلاعات درباره ترکیبات به کار رفته در محصول، شرایط کیفی و شرایط تهیه و نگهداری را جزء حقوق خود می‌دانند. ارائه نوعی بسته‌بندی که بتواند اطلاعات بیشتری در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهد و تعامل بیشتری بین ماده غذایی و مصرف‌کننده برقرار کند، می‌تواند پاسخگوی این نیاز مصرف‌کنندگان باشد.

بسته‌بندی‌های هوشمند به انواعی از بسته‌بندی‌ها اطلاق می‌شود که توانایی ایجاد ارتباط با مصرف‌کننده از طریق شناسایی، حس، ثبت، ردیابی، مخابره کردن اطلاعاتی در خصوص کیفیت و شرایط تازگی یا فساد محصول به مصرف‌کننده را داشته

برگشت‌ناپذیر هستند و نتیجه را در قالب تغییرات قابل مشاهده اعم از تغییر در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی حسگر مانند تغییر شکل یا تغییر در رنگ آن نشان می‌دهند [۵].

در برخی موارد، هدف از به‌کارگیری نشان‌گرهای زمان-دما، برای نظارت بر دما و زمان در طول مدت نگهداری و توزیع نیست. یکی از پرکاربردترین روش‌های افزایش ایمنی و سلامت محصولات غذایی استفاده از دماهای بالا برای از بین بردن میکروارگانیزم‌های مختلف عامل فساد است. ترکیب دما و زمان‌های مختلف برای از بین بردن یا بی‌اثر کردن این موجودات تحت فرایندهای مختلف مانند پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون انجام می‌شود. در کنار مزیت‌های یاد شده در رابطه با افزایش ایمنی و سلامتی محصولات با استفاده از تیمار حرارتی، کاهش ارزش غذایی و از بین رفتن ترکیبات مفید که نسبت به حرارت حساس هستند از جمله معایب فرایندهای حرارتی محسوب می‌شوند. بنابراین استفاده از نشان‌گرهای زمان-دما برای تعیین کفایت فرایند حرارتی، می‌تواند یکی دیگر از کاربردهای این فناوری در کنار کاربرد آنها در بسته‌بندی مواد غذایی باشد [۷].

به‌طور کلی، خصوصیات نشان‌گر زمان-دمای ایده‌آل عبارتند از:

- (۱) در مقابل تغییرات زمان و دما بسیار حساس باشد و واکنش نشان دهد.
- (۲) پاسخ آن به راحتی قابل اندازه‌گیری و برگشت‌ناپذیر باشد.
- (۳) واکنش نشان داده شده قابل تعمیم به میزان افت کیفیت و مدت ماندگاری محصول باشد.
- (۴) واکنش ارائه شده توسط نشان‌گر قابل اطمینان باشد و همواره در شرایط دمایی یکسان پاسخ ارائه شده یکسان باشد.
- (۵) به‌کارگیری و استفاده از آن ارزان و ساده باشد.
- (۶) انعطاف‌پذیر باشد به‌طوری‌که بتوان در پیکربندی‌ها و بسته‌بندی‌های مختلف برای محدوده‌های دمایی مختلف (دمای انجماد، خنک کردن و اتاق) به‌کار گرفت.
- (۷) دوره پاسخ مفید داشته باشد. به‌طوری‌که از چند روز تا بیشتر از یک سال نیز واکنش مناسب و قابل اعتمادی ارائه دهد.
- (۸) تا حد امکان در اندازه‌های کوچک قابل تهیه و استفاده باشد. این مزیت، به‌کارگیری سهل آنها در انواع بسته‌بندی‌ها را ممکن می‌کند.
- (۹) بعد از فعال شدن، مدت ماندگاری بالایی داشته باشد و از طرف دیگر فعال‌سازی آن راحت باشد و با کمترین حد آستانه فعال شود.

بسته‌بندی‌های هوشمند بر پایه نشانگرهای زمان-دما پرداخته شده است.

۲- نشان‌گرهای زمان-دما

دما یکی از عوامل بسیار مهم و تأثیرگذار در کیفیت محصولات غذایی مختلف در طول مدت نگهداری است. بعد از اعمال فرایندهای مختلف برای تهیه فرآورده‌های غذایی گوناگون و بسته‌بندی آنها، دمای نگهداری با توجه به ویژگی‌های محصول غذایی متفاوت است. از مرحله تولید تا مصرف فرآورده‌های غذایی، عدم کنترل و اعمال دماهای نامناسب باعث کوتاه شدن زمان نگهداری ایمن و سالم ماده غذایی می‌شود. محصولاتی که توزیع و نگهداری آنها مستلزم تأمین دماهای پایین هستند، از جمله موادی هستند که تنظیم و حفظ دمای مناسب در کنترل فساد آنها بسیار مهم هستند. بنابراین نظارت و پایش دمای نگهداری از ضروری‌ترین نیازهای مدیریت مدت انبارمانی مؤثر مواد غذایی محسوب می‌شود. یکی از راه‌های مؤثر و مقرون به صرفه برای پایش و نظارت بر دمای نگهداری مواد غذایی، به‌کارگیری و استفاده از نشان‌گرهای زمان-دما^۱ است [۴،۵].

زمان و دمای نامساعد در افت خصوصیات کیفی فرآورده‌های غذایی بسیار تأثیرگذار است. اطلاعاتی که در رابطه با دوام و بقای ایمنی و سلامت مواد غذایی روی برچسب‌های آنها درج می‌شود مانند تاریخ انقضاء، تضمینی برای سالم و ایمن بودن محصول در طول این دوره نگهداری نیست. چرا که تاریخ انقضاء نگهداری محصول در هنگام توزیع و نگهداری را در شرایط مطلوب پیش‌بینی می‌کند و براساس این شرایط مطلوب تاریخ انقضاء درج می‌گردد. بنابراین در صورت عدم رعایت شرایط بهینه پیش‌بینی شده، عملاً تاریخ انقضاء کارایی و صحت خود را از دست خواهد داد. برای دستیابی به ایمنی و سلامت کامل محصولات در زنجیره تأمین غذا، نظارت بر دما در تمامی مراحل توزیع و نگهداری تا رسیدن به دست مصرف‌کننده و ثبت تغییرات دمایی امری ضروری است. این امر در قالب بسته‌بندی‌های هوشمند با نشان‌گرهای زمان-دما انجام می‌گیرد. به بیان عمومی‌تر، به این نوع بسته‌بندی‌ها نظارت بر دما از مزرعه تا چنگال گفته می‌شود [۶].

نشان‌گرهای زمان-دما، قادر به اندازه‌گیری دما و زمان و تغییرات وابسته به آنها هستند و تاریخچه‌ای از دما و زمان را به‌طور کامل یا جزئی منعکس می‌کنند. این نشان‌گرها براساس تغییرات مکانیکی، شیمیایی، آنزیمی و میکروبیولوژیکی که

^۱ TTI

از این نشان‌گر در بسته‌بندی‌های مواد دارویی و مواد غذایی برای کنترل عدم اعمال دماهای نامناسب در طول مدت توزیع و نگهداری استفاده می‌شود. اگر بخواهیم ساختار این نشان‌گر را دقیق‌تر بررسی کنیم، دو قسمت مجزا در ساختار آنها مشاهده می‌شود. در یکی از بخش‌ها محلول آنزیمی به همراه ترکیب رنگی قرار دارد که به تغییرات pH حساس است. در بخش دیگر، سوبسترای لیپیدی آنزیم حضور دارد. به جزء متیل میریستات از ترکیبات دیگری نظیر گلیسرین، تری کاپرونات، تری پلارگولین، تری بوتیرین به‌عنوان سوبسترای آنزیمی استفاده می‌شود. برای اینکه بتوان طیف وسیعی از دماها را پوشش داد از ترکیب آنزیم-سوبسترای مختلف و در غلظت‌های مختلف استفاده می‌شود. با اعمال فشار به عامل جدا کننده این دو بخش و از بین رفتن آن، آنزیم و سوبسترا در مجاورت هم قرار می‌گیرند و واکنش آغاز می‌شود. با انجام واکنش آنزیمی تولید اسید چرب آغاز می‌شود که نتیجه آن کاهش در pH و تغییر در رنگ نشانگر است [۶].

اخیراً شرکت هواپیمایی بریتانیا با مشارکت شرکت VITSAB اقدام به طراحی برچسب هوشمندی با عنوان «Flight 17 Smart Label» کرده‌اند شکل (۲). این برچسب‌ها برای مواد غذایی فسادپذیر که در دماهای خنک نگهداری می‌شوند، به کار می‌روند. در صورت قرارگیری محصول در دمای نامناسب، محتویات داخل برچسب با انجام واکنش آنزیمی باعث ایجاد تغییر رنگ می‌گردد. رنگ سبز برچسب حاکی از تازگی و عدم تأثیر قابل توجه زمان و دمای نامناسب بر روی محصول است. اما ظهور رنگ زرد در برچسب نشان‌دهنده اعمال زمان و دمای نامناسب و احتمال خطر در مصرف آن است [۶].



شکل (۲): شکل ظاهری نشان‌گر زمان - دمای Flight 17 Smart Label [۶]

۱۰) تنها عامل محرک برای ارائه واکنش و پاسخ در نشان‌گر، دما باشد. بنابراین دیگر عوامل مانند نور، رطوبت نسبی، انواع گازهای محیطی و آلودگی‌ها نباید بر واکنش نشان‌گر تأثیری داشته باشند.

۱۱) در مقابل تنش‌های مکانیکی (تنش‌های ناخواسته‌ای که در حین حمل و نقل وارد می‌شوند) مقاوم باشد و واکنش نشان‌گر تحت تأثیر این تنش‌ها قرار نگیرد.

۱۲) سمی نباشد و در طول مدت نگهداری محصول در صورت تماس نشان‌گر با مواد مختلف تا حد امکان از نظر ایمنی و سلامتی مشکلی ایجاد نکند.

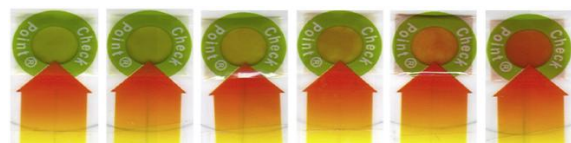
۱۳) پاسخی که نشان‌گر ارائه می‌دهد، باید قابل مشاهده و قابل فهم باشد. تا حد امکان پاسخ به‌صورتی باشد که بتوان توسط تجهیزات الکترونیکی برای سهولت و سرعت بیشتر دریافت اطلاعات آنالیز کرد.

در ادامه، به انواع نشانگرهای زمان-دما که برای تشخیص تاریخچه دمای نگهداری محصولات غذایی طراحی و تولید شده‌اند اشاره شده و به تشریح ساز و کار عمل آنها پرداخته می‌شود.

۳- طبقه‌بندی انواع نشان‌گرهای زمان - دما

۳-۱- نشان‌گرهای زمان - دمای آنزیمی

یکی از نشان‌گرهای زمان-دمای آنزیمی که به شکل تجاری وارد بازار شده است، نشان‌گرهای زمان-دمای "CheckPoint® TTI" ساخت شرکت Malmo در کشور سوئد است. تغییر رنگ این نشان‌گر، براساس تغییر pH و نتیجه هیدرولیز کنترل شده آنزیم لیپاز میکروبی است (لیپاز به‌دست آمده از رایزوپوس اوریزا^۱). طی این واکنش، از ترکیبی لیپیدی (متیل میریستات^۲) به‌عنوان سوبسترا استفاده می‌شود. زمانی که نشان‌گر تحت تأثیر عامل خارجی (تغییر دما) فعال می‌شود حفاظ مکانیکی بین آنزیم و سوبسترا از بین می‌رود و آنزیم و سوبسترا در تماس با هم قرار می‌گیرند. هنگامی که هنوز واکنشی بین آنزیم و سوبسترا انجام نگرفته، رنگ نشان‌گر سبز است. اما با گذر زمان و بسته به شدت واکنش، رنگ نشان‌گر ابتدا به‌صورت زرد - نارنجی و در نهایت به رنگ قرمز در می‌آید، شکل (۱) [۵].



شکل (۱): تغییرات رنگی نشان‌گر زمان-دمای CheckPoint® [۵]

^۱ Rhizopus oryzae

^۲ Methyl myristate

قابل رؤیت است، پس از مدت زمان معینی که فساد در محصول بسته‌بندی شده به خاطر اعمال دماهای نامناسب ایجاد می‌شود، رنگ برچسب تغییر می‌یابد و بارکد قابل مشاهده نخواهد بود. حتی در اثر تغییر رنگ، بارکد توسط دستگاه‌هایی که در فروشگاه‌ها برای خواندن بارکد به کار می‌روند، قابل خواندن نخواهد بود. بنابراین فروش محصول معیوب در این مرحله متوقف می‌شود [۶].



شکل (۳): تغییر رنگ نشان‌گر زمان - دما Cryolog's eO® [۶]



شکل (۴): نحوه تغییر رنگ نشان‌گر زمان - دما Cryolog's TRACEO®

نمونه‌ای از نشانگرهای زمان - دمای میکروبی که براساس باکتری لاکتوباسیلوس ساکای طراحی شده در شکل (۵) نشان داده شده است. با گذر زمان، افزایش دما و فعال شدن باکتری‌ها، تغییر رنگ از صورتی به زرد اتفاق افتاده است. استفاده از این نشانگر نشان داد که در تمامی دماهای آزمایش شده، تغییر رنگ تحت تأثیر میزان رشد باکتری‌ها قرار می‌گیرد. نقطه پایان^۳ (مدت

۲-۳- نشانگرهای زمان - دمای میکروبی

دما مهم‌ترین عامل در رشد و تکثیر انواع میکرو ارگانیسم‌ها در غذاهای مختلف است. برخی از میکرو ارگانیسم‌های رشد یافته در مواد غذایی مختلف، سودمند و به بیان دیگر ضروری هستند. یکی از این مواد غذایی، ماست است که بدون فعالیت میکرو ارگانیسم‌های مشخص (استرپتوکوکوس ترموفیلوس^۱ و لاکتوباسیلوس بولگاریکوس^۲) تولید آن ممکن نیست. اما در برخی موارد، رشد و تکثیر میکرو ارگانیسم‌ها مفید و سودمند نیست و با حضور آنها در مواد غذایی مشکلاتی نظیر تولید انواع سموم و ایجاد مسمومیت‌ها و تغییرات نامناسب در مزه و طعم به وجود می‌آید. بنابراین، حفظ و کنترل دقیق دمای نگهداری مواد غذایی می‌تواند در کنترل تعداد میکرو ارگانیسم‌ها تأثیر به‌سزایی داشته باشد [۶]. یکی از نشانگرهای زمان - دمای به کار گرفته شده برای مشخص کردن رشد میکرو ارگانیسم‌ها نشان‌گر Cryolog است. این نشانگرها در دو نوع سامانه TRACEO® و eO® به کار رفته‌اند شکل‌های (۳) و (۴). عوامل فعال‌کننده این نشانگرها میکرو ارگانیسم‌هایی هستند که در غذاها رشد و تکثیر می‌یابند [۵،۶].

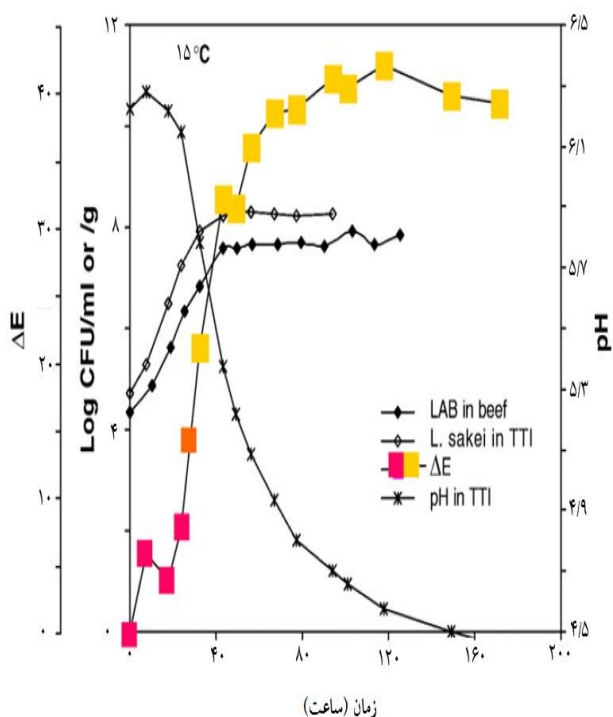
در انواع eO® از گونه‌های باکتری‌های اسید لاکتیک (مانند لاکتوباسیلوس ساکای) استفاده می‌شود شکل (۳). طراحی‌های به کار رفته در این نوع نشانگر، به صورت گلبرگ‌های گل هستند که در طول مدت نگهداری با اعمال دمای نامناسب و شروع فعالیت باکتری‌ها تغییر رنگ می‌دهند. باکتری‌های لاکتیک اسید در داخل برچسب تلقیح و سپس منجمد می‌شوند. با قرار گرفتن بسته‌بندی در دماهای بالاتر، باکتری‌ها از حالت انجماد خارج می‌شوند و بسته به شرایط دما و زمان رشد می‌کنند. در واقع میزان دما و زمان قرارگیری در آن نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان رشد باکتری‌ها خواهد داشت. بعد از فعال شدن، باکتری‌ها از منبع کربنی که در داخل برچسب قرار گرفته، استفاده و شروع به تولید اسید لاکتیک می‌کنند. نتیجه تولید اسید لاکتیک مطمئناً با کاهش در pH همراه خواهد بود. در نهایت کاهش pH منجر به تغییر رنگ در ترکیبات رنگی حساس به pH به کار رفته در برچسب می‌شود [۸،۹].

نشانگرهای TRACEO® نیز به صورت برچسب برای بسته‌بندی‌های مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همانند گروه قبلی، در این گروه نیز از گونه‌های خاص باکتری‌ها اسید لاکتیک و تغییر رنگ ایجاد شده در نتیجه فعالیت آنها در این برچسب‌های هوشمند بهره می‌گیرند. همان‌طور که در شکل (۴)

¹ Streptococcus thermophilus

² Lactobacillus bulgaricus

³ Endpoint



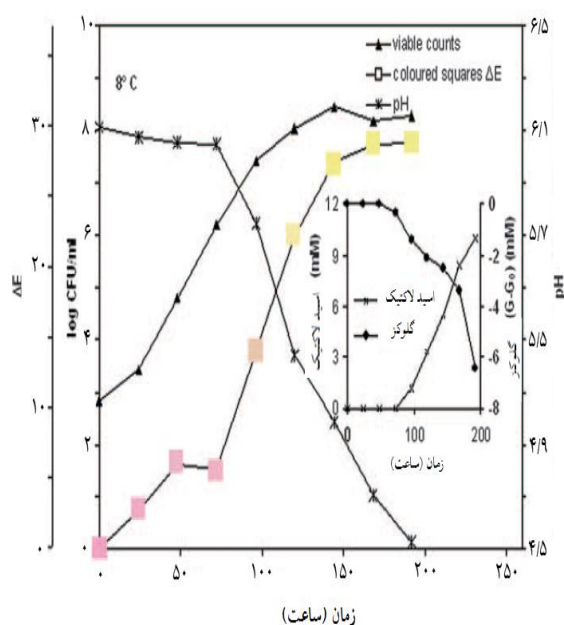
شکل (۶): نشانگر زمان-دمای میکروبی (لاکتوباسیلوس ساکی) برای گوشت قیمه شده در شرایط بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده [۱۰]

۳-۳- نشانگرهای زمان-دمای پلیمری

نشانگرهای زمان-دمای تجاری Freshness Monitor[®] و Fresh-Check[®] محصول شرکت Technology Lifeline (Morris Plains, NJ) براساس واکنش‌های پلیمریزاسیون پایه جامد^۱ وابسته به دما کار می‌کنند. پلیمرهای به‌شدت رنگی که از طریق واکنش ۴،۱- پلیمریزاسیون کریستال‌های دی‌استیلن آمونیوم^۲ (R-C=C-C=C-R) تولید می‌شوند که عامل ایجاد تغییر رنگ و به بیان دیگر، مشخص شدن اعمال دمای نامناسب به محصول هستند. این نشانگرها به‌صورت خود به خودی فعال می‌شوند، بنابراین باید در دماهای پایین نگهداری شوند.

نشانگرهای Freshness Monitor[®] متشکل از تکه کاغذ چند لایه‌ای است که در جلوی آن نواری با پوششی از لایه‌ای نازک و بدون رنگ از جنس مونومرهای دی‌استیلن و دو بارکد قرار دارد که به‌ترتیب برای شناسایی محصول و مدل نشانگر است. نشانگرهای Fresh-Check[®] به‌صورت برچسب‌های کوچک، ارزان و چسبناک روی محصولات مستعد فساد برای تعیین مدت انبارمانی آنها استفاده می‌شود شکل (۷). ساختار این نشانگرها به‌صورتی است که پلیمر حساس به دما و زمان در مرکز و اطراف آن، توسط حلقه مرجع (برای مقایسه و شناسایی رنگ ایجاد شده

زمانی که بعد از آن تغییر قابل تشخیصی در رنگ نهایی مشاهده نمی‌شود) بسته به دمای اعمال شده، به‌شدت تغییر می‌کند. زمانی که دمای نگهداری از صفر به ۱۶ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرد، نقطه پایان از ۲۷ روز به ۲/۵ روز کاهش یافت. از طرف دیگر، میزان تلقیح نیز بر نقطه پایان تأثیرگذار بود. به‌طوری که در دمای هشت درجه سانتی‌گراد نقطه پایان برای میزان تلقیح ۱۰^۶ و ۱۰^۱ کلنی در میلی‌لیتر به‌ترتیب شش و دو روز بود. بنابراین می‌توان از نقطه پایان این نشانگر در دماهای مشخص، با تلقیح تعداد مناسب باکتری برای تعیین مدت ماندگاری در طول توزیع و نگهداری استفاده کرد [۸].



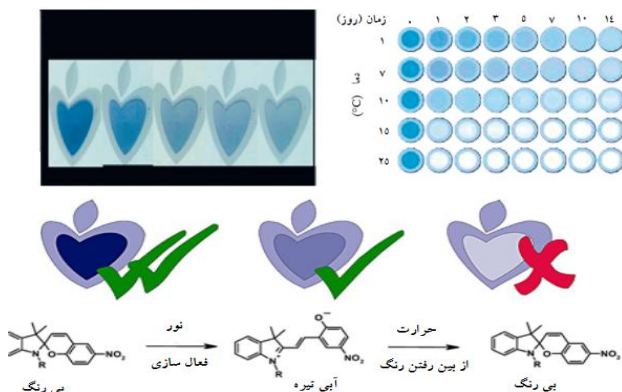
شکل (۵): ساز و کار عمل نشانگر زمان-دمای میکروبی (لاکتوباسیلوس ساکی) [۸]

مطالعه مشابهی درباره نشانگرهای زمان-دمای میکروبی بر پایه باکتری لاکتوباسیلوس ساکی انجام گرفت. محققان در این بررسی، گوشت قیمه شده را که در بسته‌بندی‌های با اتمسفر اصلاح‌شده قرار داده بودند به نشانگر زمان-دمای میکروبی مجهز و به تعیین مدت انبارمانی نمونه‌ها اقدام کردند شکل (۶). نتایج این تحقیق مشخص کرد که در دماهای مورد آزمون (۱۵، ۱۰، پنج و صفر درجه سانتی‌گراد)، نقطه پایانی نشانگر با عمر مفید و خصوصیات حسی محصول ارتباط بسیار نزدیکی دارد. بنابراین از این نشانگر می‌توان به‌عنوان ابزاری قابل اعتماد برای سنجش کیفیت و مدت انبارمانی گوشت قیمه شده که در شرایط بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده نگهداری می‌شود، استفاده نمود [۱۰].

^۱ Solid-state polymerization reactions
^۲ Disubstituted diacetylene crystals

۴-۳- نشانگرهای زمان - دمای فتوکرومیکی

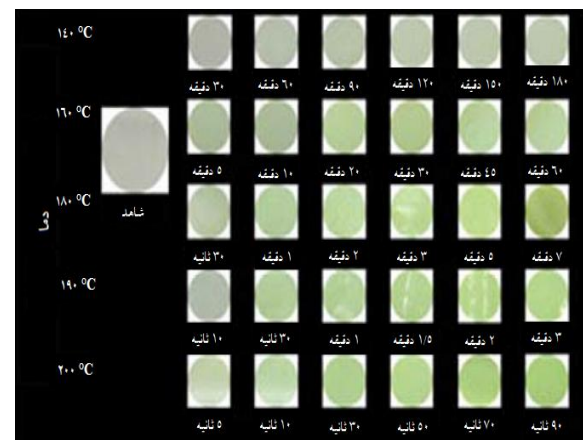
نشانگرهای زمان-دمای فتوکرومیکی^۱ به صورت برچسب و جوهرهای چاپ در داخل و یا خارج بسته‌بندی‌های محصولات فسادپذیر منجمد یا نگهداری شده در شرایط سرد و خنک به کار می‌روند. یکی از محصولات تجاری شده این نشانگرها با نام تجاری OnVu™ (Ciba Specialty Chemicals and Freshpoint) در بازار Basel, Switzerland; Patent No. WO/ 2006/048412 موجود است شکل (۹). این تکنولوژی برای کنترل و تعیین مدت ماندگاری محصولاتی نظیر انواع گوشت‌های فرآوری شده، ماهی، محصولات لبنی و غذاهای آماده مصرف به کار می‌رود. رنگ‌دانه‌ها و ترکیبات رنگی فتوکرومیکی به کار رفته در ساختار این نشانگرها در برابر نوسانات دمایی حساس‌اند و در صورت قرارگیری در شرایط نامناسب دمایی با ایجاد تغییر در رنگ، شرایط بد محیط نگهداری محصول را اعلام می‌کنند. همانند نشانگرهای زمان-دمای پلیمری، رنگ مرجع به صورت حلقه محیطی و ناحیه مرکزی به عنوان منطقه حساس به نوسانات دمایی عمل می‌کنند. فعال‌سازی این نشانگرها تنها در صورت قرارگیری در معرض نور فرابنفش صورت می‌گیرد. برای فعال‌سازی آنها می‌توان از لامپ‌های LED^۲ استفاده کرد. زمانی که این نشانگرها در معرض نور قرار می‌گیرند، رنگ ناحیه حساس مرکزی به صورت تیره ظاهر می‌شود و با گذر زمان و قرارگیری در معرض دماهای نامناسب از شدت رنگ کاسته می‌شود و روشن‌تر می‌گردد. زمانی که رنگ ناحیه مرکزی همانند رنگ حلقه کناری شد، مشخص می‌کند که محصول به انتهای مدت انبارمانی خود رسیده و غیرقابل استفاده است شکل (۹). ساز و کار فعال شدن و تغییر رنگ نشانگرهای فتوکرومیکی در شکل (۹) نشان داده شده است [۶، ۱۲، ۱۳].



در مرکز و تعیین قابلیت مصرف محصول) قرار دارد. زمانی که دمای بسته‌بندی به حد آستانه نشانگر برسد، پلیمریزاسیون رخ می‌دهد و تغییر رنگ به صورت تدریجی و برگشت‌ناپذیر در مرکز نشانگر شروع می‌شود. سرعت تغییر رنگ به تغییرات دمای اعمال شده وابسته است. به طوری که هر چه میزان دمای اعمال شده از حد آستانه بیشتر باشد، سرعت تغییر رنگ بیشتر افزایش می‌یابد. این حالت در دماهای پایین برعکس است یعنی زمانی که نرخ افزایش دما کم باشد، سرعت تغییر رنگ نیز کم خواهد بود. با مقایسه تغییر رنگ ایجاد شده به صورت چشمی یا توسط دستگاه‌های رنگ‌سنج با حلقه رنگی مرجع، می‌توان قابلیت مصرف فرآورده را تعیین کرد. زمانی که رنگ منطقه مرکزی تیره‌تر از حلقه رنگی اطراف باشد، محصول قابل مصرف نخواهد بود [۶، ۱۱].



از نشانگرهای زمان-دمای پلیمری، برای ثبت تغییرات دمایی در دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز استفاده می‌شود. این نشانگرها بیشتر برای تشخیص کفایت فرایند حرارتی در تجهیزات و مراحل حرارت‌دهی محصولات غذایی مختلف در خط تولید مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل (۸) نمونه‌ای از نشانگرهای زمان-دمای پلیمری مخصوص دماهای بالا را نشان می‌دهد.



شکل (۸): نشانگر زمان-دمای پلیمری برای محصولات فرآوری شده در دمای بالا [۱۱]

^۱ Photochromic

^۲ Light-Emitting Diode

۳-۵- نشانگرهای زمان - دمای نفوذ مولکولی

نشانه‌های زمان - دمای نفوذ مولکولی به شکل برچسب‌های ورقه‌ای مسطح به بازار عرضه می‌شوند. یکی از محصولات تجاری این نشانگرها با نام تجاری Monitor Mark™ (St. Paul, MN) ۳ M عرضه شده است شکل (۱۰). این نشانگرها با تغییرات قابل مشاهده در ساختار ظاهری خود، به مصرف‌کننده اطلاعات ایمنی و سلامتی کافی درباره مصرف و یا عدم مصرف محصول ارائه می‌دهند. ساز و کار عمل این نشانگرها به صورت نفوذ مولکولی وابسته به دمای استرهای رنگی اسیدهای چرب از طریق مجرای متخلخل در صورت قرارگیری در دماهای بالا است. زمانی که نشانگر در دماهای بالا قرار می‌گیرد، ترکیبات آبی‌رنگ در مخزنی که یک سرفتیله به آن وصل است، ذوب می‌شوند و توسط نفوذ مولکولی به سمت دیگر فتیله انتشار می‌یابند. این نشانگرها قبل از به کارگیری، باید حداقل به مدت دو ساعت در دماهای انجماد و یخچال نگهداری شوند تا برای استفاده آماده شوند [۶].



شکل (۱۰): نشانگر زمان - دمای نفوذ مولکولی MonitorMark™ [۶]

نشانه‌های زمان - دمای Freshness Check™ که توسط شرکت ۳M به بازار عرضه شده، یکی دیگر از انواع نشانگرهای زمان - دمای نفوذ مولکولی است شکل (۱۱). این دسته از نشانگرها براساس نفوذ مولکولی پلیمرهای ویژه کار می‌کنند. مواد ویسکوالاستیک از طریق انتشار مولکولی که سرعت انتشار آن تحت تأثیر دما است، در ماتریکس متخلخل مهاجرت می‌کنند. نتیجه این مهاجرت تغییر در رنگ (از روشن به خاکستری و سیاه) است. همانند نشانگرهای قبلی زمانی که رنگ منطقه مرکزی و حلقه رنگی مرجع یکسان باشد، مدت انبارمانی محصول سر آمده و به معنی عدم قابلیت مصرف فرآورده است [۶].



شکل (۱۱): نشانگر زمان - دمای نفوذ مولکولی Freshness Check™ [۶]

۳-۶- نشانگرهای زمان - دمای مایلاردی

این گروه از نشانگرها هنوز به صورت تجاری وارد بازار نشده‌اند. اقدامات مطالعاتی و پژوهشی در این زمینه انجام گرفته که با نتایج خوبی همراه بوده است. اساس کار این نشانگرها بر پایه واکنش مایلارد^۱ بوده که بین قندهای احیاکننده و اسیدهای آمینه رخ می‌دهد. ابتدا این دو ماده واکنش‌گر در بخش‌های جدا از هم به وسیله موانع فیزیکی قرار گرفته‌اند. با از بین رفتن مانع فیزیکی بین طرفین واکنش مایلارد (قندها و اسیدهای آمینه) و انجام واکنش، ترکیبات رنگی ملانوییدین به وجود می‌آید. بسته به زمان و دمای واکنش، رنگ به وجود آمده، طیف وسیعی از رنگ‌ها از آبی روشن، آبی، آبی متمایل به سبز و قهوه‌ای تغییر می‌کند و در نهایت به قهوه‌ای تیره می‌رسد شکل (۱۲). زایلوز و گلیسین می‌توانند به ترتیب به عنوان ترکیب قندی و اسیدآمینه در این واکنش شرکت کنند. همانند نشانگرهای دیگر، سرعت تغییر رنگ در این نشانگر نیز وابسته به میزان تغییر دما است. یکی از مزیت‌های این نشانگرها، عدم نیاز آنها به نگهداری در دماهای پایین قبل از استفاده است. زیرا ترکیبات شرکت‌کننده در واکنش در بخش‌های مجزا که توسط مانع فیزیکی جدا شده‌اند، نگهداری می‌شوند [۱۴، ۱۵].



شکل (۱۲): تغییرات رنگی نشانگر زمان - دمای مایلاردی [۱۵]

۳-۴- تعمیم پاسخ نشانگر زمان - دما به کیفیت و مدت انبارمانی محصول

مطالعات و پژوهش‌های علمی مختلفی درباره به کارگیری و استفاده از نشانگرهای زمان - دما انجام گرفته است. اما برای به کارگیری آنها به صورت تجاری و در مقیاس صنعتی به اصلاحاتی نیاز است تا خصوصیات اقتصادی و فنی مناسب برای صنعتی‌سازی، مقرون به صرفه بودن، قابلیت تولید انبوه و غیره را

^۱ Millard reaction

توزیع و به فروش می‌رسد. سامانه FIFO به تولیدکنندگان این امکان را می‌دهد زمانی که محصولات با کیفیت یکسان تولید می‌شوند، با کیفیت یکسان نیز عرضه شوند و به فروش برسند. بنابراین باید این نکته مد نظر قرار بگیرد که با تأمین شرایط بهینه در تمامی مراحل تهیه و توزیع، کیفیت محصول تا حد زیادی تأثیرپذیر از زمان نگهداری است [۵]. یکی دیگر از مزایای به‌کارگیری نشانگرهای زمان-دما، مشخص کردن محصولات با کمترین قابلیت انبارمانی و به فروش رساندن سریع‌تر آنها است. از این سامانه با عنوان LSFO^۲ یاد می‌شود. از محاسن به‌کارگیری این روش می‌توان به کاهش محصولات عودت داده شده (به دلیل افت کیفیت و اتمام مدت انبارمانی محصول) و به حداقل رساندن نارضایتی‌های مصرف‌کنندگان (به دلیل داشتن کیفیت پایین محصول و غیرقابل پذیرش بودن آن) اشاره کرد. برای کنترل و مدیریت بهتر مدت انبارمانی از سامانه سوم که حالت بهبود یافته سامانه LSFO است استفاده می‌شود. این سامانه با عنوان SLDS^۳ شناخته می‌شود که براساس محاسبه در تغییرات کیفیت اولیه محصول، به تعیین مناسب‌ترین زمان فروش اقدام می‌کند [۵]. حصول اطمینان از عرضه محصولی ایمن و با کیفیت از طریق به‌کارگیری نشانگرهای زمان-دما همواره ملزم به مطالعه بیشتر و دقیق‌تر این نشانگرها برای طراحی و گسترش آنها در زمینه‌های مختلف و برای مواد غذایی متفاوت است. گسترش و کاربرد این تکنولوژی توسط پروژه تحقیقاتی چند ملیتی در اروپا با عنوان «گسترش و مدل‌سازی سامانه‌های تضمینی و سنجش ایمنی بر پایه نشانگرهای زمان-دما^۴» و «سامانه SMAS^۵ برای محصولات گوشتی نگهداری شده در شرایط سرد» تدوین شده است. امروزه با به‌کارگیری این پروژه در تولید و عرضه انواع گوشت و فرآورده‌های آن و دیگر محصولاتی که در شرایط خنک توزیع می‌شوند، از عرضه مناسب و حفظ کیفیت قابل قبول محصول در زمان رسیدن به‌دست مصرف‌کننده اطمینان حاصل می‌شود [۵].

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش روز افزون تقاضا برای سامانه‌های بسته‌بندی پیشرفته‌تر و کارآمدتر، تولیدکنندگان برای حفظ سهم خود در بازارهای داخلی و خارجی نیازمند به ارائه سامانه‌های بسته‌بندی جدیدتر هستند. علاوه بر، مصرف‌کنندگان، ارگان‌های نظارتی نیز با اعمال قوانین سخت‌گیرانه‌تر در مورد ایمنی و سلامتی مواد

دارا باشند. به‌عنوان مثال، در پژوهش‌ها عمدتاً نشانگر زمان-دما مورد مطالعه برای یک نوع محصول و یا تنوع پایین محصول بررسی می‌گردد. درحالی که باید طراحی و شرایط به‌کارگیری نشانگر طوری باشد که بتوان امکان استفاده از آن را برای طیف گسترده‌ای از محصولات فراهم نمود. معمولاً در مطالعات بین تغییرات دما و زمان و افت خصوصیات کیفی در طول مدت نگهداری، روابطی برقرار است که با تعمیم این روابط طیف گسترده‌تر و برای محصولات بیشتر می‌توان استفاده از این نشانگرها را وسعت داد.

مدل‌های کینتیکی به تولیدکنندگان نشانگرهای زمان-دما این امکان را می‌دهد که بدون انجام آزمون‌های وقت‌گیر و هزینه‌بر، مناسب‌ترین نشانگر را برای محصول مورد نظر خود انتخاب کنند. از طرفی با اتکا به این روش می‌توان مدت انبارمانی محصولات را با سطح اطمینان بالاتری مورد ارزیابی و سنجش قرار داد. مدل‌های به‌دست آمده در شرایط غیر هم‌دما و دارای نوسان مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا قدرت پیش‌بینی آنها برای زنجیره تأمین محصولات، قابل اطمینان‌تر شود و با هم‌خوانی بیشتری همراه باشد. خصوصیات و ویژگی‌های نشانگرهای زمان-دما باید به‌صورتی باشد که همبستگی پاسخ‌های ارائه شده توسط آنها با افت کیفیت و مدت انبارمانی محصول تا حد امکان بالا باشد. به‌عنوان مثال، سرعت پاسخ نشانگر، به دما و تغییرات آن وابسته باشد، انرژی فعال‌سازی نشانگر در محدوده انرژی فعال‌سازی لازم برای افت کیفیت محصول باشد، مدت زمان ارائه پاسخ از سوی نشانگر حداقل با مدت انبارمانی محصول در دمای مرجع برابر باشد و کینتیک پاسخ نشانگر از سوی سازنده آن تضمین شده باشد [۵].

۵- به‌کارگیری نشانگرهای زمان-دما در مدیریت مدت انبارمانی محصولات غذایی

همان‌طور که در بخش قبلی بحث شد، اطلاعات دریافتی از نشانگر زمان-دما تبدیل به مدت انبارمانی و توصیف کیفیت محصول بسته‌بندی شده می‌شود. با به‌کارگیری این نشانگرها می‌توان با توجه به مدت انبارمانی محصول غذایی، توزیع و فروش آن را مدیریت نمود. یکی از متداول‌ترین و مهم‌ترین قوانینی که در عرضه و فروش محصولات تولیدی کارخانه‌های صنایع غذایی رعایت و به‌کار گرفته می‌شود، سامانه FIFO^۱ است. در این سامانه، اولین محصول تولید شده (محصولی که تاریخ تولید آن زودتر از دیگر محصولات است) باید اولین محصولی باشد که حمل و نقل،

^۲ Least Shelf Life Out

^۳ Shelf Life Decision System

^۴ Development and Modelling of a TTI Based Safety Monitoring and Assurance System

^۵ Safety Monitoring and Assurance System

^۱ First In First Out

- [8] H. Vaikousi, C. G. Biliaderis, and K. P. Koutsoumanis, "Development of a microbial time/temperature indicator prototype for monitoring the microbiological quality of chilled foods. *Applied and Environmental Microbiology*," vol. 74, no. 10, pp. 3242 - 3250, 2008.
- [9] M. Ellouze and J. Augustin, "Applicability of biological time temperature integrators as quality and safety indicators for meat products. *International Journal of Food Microbiology*," vol. 138, no. 1, pp. 119 - 129, 2010.
- [10] H. Vaikousi, C. Biliaderis, and K. P. Koutsoumanis, "Applicability of a microbial Time Temperature Indicator (TTI) for monitoring spoilage of modified atmosphere packed minced meat," *International Journal of Food Microbiology*, pp. 272 - 278, 2009.
- [11] B. S. Lee and H. S. Shin, "Polymer-based time temperature indicator for high temperature processed food products. *Food Science and Biotechnology*," vol. 21, no. 5, pp. 1483 - 1487, 2012.
- [12] J. Kreyenschmidt, H. Christiansen, A. Hübner, V. Raab, and B. A. Petersen, "novel photochromic time-temperature indicator to support cold chain management. *International Journal of Food Science and Technology*," vol. 45, no. 2, pp. 208-215, 2010.
- [13] N. Mai, H. Audorff, W. Reichstein, D. Haarer, G. Olafsdottir, S. G. Bogason, J. Kreyenschmidt, and S. Arason, "Performance of a photochromic time - temperature indicator under simulated fresh fish supply chain conditions. *International Journal of Food Science and Technology*," vol. 46, no. 2, pp. 297-304, 2011.
- [14] T. Yamamoto and K. Isshiki, "Development of the indicator using Maillard reaction to warn against the temperature rise of the chilled food. *Japanese Journal of Food Chemistry and Safety*," vol. 19, no. 2, pp. 84-87, 2012.
- [15] H. Rokugawa and H. Fujikawa, "Evaluation of a new Maillard reaction type time-temperature integrator at various temperatures, *Food Control*," vol. 57, pp. 355-361, 2015.
- [16] K. L. Yam, P. T. Takhistov, and J. Miltz, "Intelligent packaging: concepts and applications, *Journal of Food Science*," vol. 70, no. 1, p. 110, 2005.
- [17] B. Kuswandi, Y. Wicaksono, A. Abdullah, L. Y. Heng, and M. Ahmad, "Smart packaging: sensors for monitoring of food quality and safety, *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*," vol. 5, no. 3, pp. 137-143.
- [18] K. Biji, C. Ravishankar, C. Mohan, and T. S. Gopal, "Smart packaging systems for food applications: a review *Journal of Food Science and Technology*," vol. 52, no. 10, pp. 6125 - 6135.
- [19] T. Tsironi, M. Giannoglou, E. Platakou, and P. Taoukis, "Evaluation of Time Temperature Integrators for shelf-life monitoring of frozen seafood under real cold chain conditions. *Food Packaging and Shelf Life*," vol. 10, pp. 46 -53.
- [20] P. Subramaniam and P. Wareing, "The Stability and Shelf Life of Food, Wood Head Publishing," 2016.
- [21] J. H. Han, "Innovations in food packaging, Academic Press," 2005.
- [22] A. Arias - Mendez, C. Vilas, A. A. Alonso, and E. Balsa, "Development of a microbial time/temperature indicator prototype for monitoring the microbiological quality of chilled foods. *Applied and Environmental Microbiology*," vol. 74, no. 10, pp. 3242 - 3250, 2008.
- [9] M. Ellouze and J. Augustin, "Applicability of biological time temperature integrators as quality and safety indicators for meat products. *International Journal of Food Microbiology*," vol. 138, no. 1, pp. 119 - 129, 2010.
- [10] H. Vaikousi, C. Biliaderis, and K. P. Koutsoumanis, "Applicability of a microbial Time Temperature Indicator (TTI) for monitoring spoilage of modified atmosphere packed minced meat," *International Journal of Food Microbiology*, pp. 272 - 278, 2009.
- [11] B. S. Lee and H. S. Shin, "Polymer-based time temperature indicator for high temperature processed food products. *Food Science and Biotechnology*," vol. 21, no. 5, pp. 1483 - 1487, 2012.
- [12] J. Kreyenschmidt, H. Christiansen, A. Hübner, V. Raab, and B. A. Petersen, "novel photochromic time-temperature indicator to support cold chain management. *International Journal of Food Science and Technology*," vol. 45, no. 2, pp. 208-215, 2010.
- [13] N. Mai, H. Audorff, W. Reichstein, D. Haarer, G. Olafsdottir, S. G. Bogason, J. Kreyenschmidt, and S. Arason, "Performance of a photochromic time - temperature indicator under simulated fresh fish supply chain conditions. *International Journal of Food Science and Technology*," vol. 46, no. 2, pp. 297-304, 2011.
- [14] T. Yamamoto and K. Isshiki, "Development of the indicator using Maillard reaction to warn against the temperature rise of the chilled food. *Japanese Journal of Food Chemistry and Safety*," vol. 19, no. 2, pp. 84-87, 2012.
- [15] H. Rokugawa and H. Fujikawa, "Evaluation of a new Maillard reaction type time-temperature integrator at various temperatures, *Food Control*," vol. 57, pp. 355-361, 2015.
- [16] K. L. Yam, P. T. Takhistov, and J. Miltz, "Intelligent packaging: concepts and applications, *Journal of Food Science*," vol. 70, no. 1, p. 110, 2005.
- [17] B. Kuswandi, Y. Wicaksono, A. Abdullah, L. Y. Heng, and M. Ahmad, "Smart packaging: sensors for monitoring of food quality and safety, *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*," vol. 5, no. 3, pp. 137-143.
- [18] K. Biji, C. Ravishankar, C. Mohan, and T. S. Gopal, "Smart packaging systems for food applications: a review *Journal of Food Science and Technology*," vol. 52, no. 10, pp. 6125 - 6135.
- [19] T. Tsironi, M. Giannoglou, E. Platakou, and P. Taoukis, "Evaluation of Time Temperature Integrators for shelf-life monitoring of frozen seafood under real cold chain conditions. *Food Packaging and Shelf Life*," vol. 10, pp. 46 -53.
- [20] P. Subramaniam and P. Wareing, "The Stability and Shelf Life of Food, Wood Head Publishing," 2016.
- [21] J. H. Han, "Innovations in food packaging, Academic Press," 2005.
- [22] A. Arias - Mendez, C. Vilas, A. A. Alonso, and E. Balsa, "Time-temperature integrators as predictive temperature sensors. *Food Control*," vol. 44, p. 258, 2015.

۷- مراجع

- [1] K. L. Yam, P. T. Takhistov, and J. Miltz, "Intelligent packaging: concepts and applications. *Journal of Food Science*," vol. 70, no. 1, p. 110, 2005.
- [2] B. Kuswandi, Y. Wicaksono, A. Abdullah, L. Y. Heng, and M. Ahmad, "Smart packaging: sensors for monitoring of food quality and safety. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*," vol. 5, no. 3, pp. 137 - 143.
- [3] K. Biji, C. Ravishankar, C. Mohan, and T. S. Gopal, "Smart packaging systems for food applications: a review. *Journal of Food Science and Technology*," vol. 52, no. 10, pp. 6125 - 6135.
- [4] T. Tsironi, M. Giannoglou, E. Platakou, and P. Taoukis, "Evaluation of Time Temperature Integrators for shelf-life monitoring of frozen seafood under real cold chain conditions. *Food Packaging and Shelf Life*," vol. 10, pp. 46 - 53.
- [5] P. Subramaniam and P. Wareing, "The Stability and Shelf Life of Food, Wood head Publishing," 2016.
- [6] J. H. Han, "Innovations in food packaging, Academic Press," 2005.
- [7] A. Arias - Mendez, C. Vilas, A. A. Alonso, and E. Balsa - Canto, "Time-temperature integrators as predictive temperature sensors. *Food Control*," vol. 44, p. 258, 2015.

- [28] J. Kreyenschmidt, H. Christiansen, A. Hübner, and V. Raab, "Petersen, B. A novel photochromic time temperature indicator to support cold chain management. International Journal of Food Science and Technology," vol. 45, no. 2, pp. 208-215, 2010.
- [29] N. Mai, H. Audorff, W. Reichstein, D. Haarer, G. Olafsdottir, S. G. Bogason, J. Kreyenschmidt, and S. Arason, "Performance of a photochromic time-temperature indicator under simulated fresh fish supply chain conditions. International Journal of Food Science and Technology," vol. 46, no. 2, pp. 297-304, 2011.
- [30] T. Yamamoto and K. Isshiki, "Development of the indicator using Maillard reaction to warn against the temperature rise of the chilled food. Japanese Journal of Food Chemistry and Safety," vol. 19, no. 2, pp. 84-87, 2012.
- [31] H. Rokugawa and H. Fujikawa, "Evaluation of a new Maillard reaction type time-temperature integrator at various temperatures. Food Control," vol. 57, pp. 355-361, 2015.
- [23] "Time-temperature integrators as predictive temperature sensors. Food Control," vol. 44, pp. 258-266, 2015.
- [24] H. Vaikousi, C. G. Biliaderis, and K. P. Koutsoumanis, "Development of a microbial time/temperature indicator prototype for monitoring the microbiological quality of chilled foods. Applied and Environmental Microbiology," vol. 74, no. 10, pp. 3242-3250, 2008.
- [25] M. Ellouze and J. Augustin, "Applicability of biological time temperature integrators as quality and safety indicators for meat products. International Journal of Food Microbiology," vol. 138, no. 1, pp. 119-129, 2010.
- [26] H. Vaikousi, C. G. Biliaderis, and K. P. Koutsoumanis, "Applicability of a microbial Time Temperature Indicator (TTI) for monitoring spoilage of modified atmosphere packed minced meat," International Journal of Food Microbiology, pp. 272-278, 2009.
- [27] B. S. Lee and H. S. Shin, "Polymer-based time-temperature indicator for high temperature processed food products. Food Science and Biotechnology," vol. 21, no. 5, pp. 1483-1487, 2012.