دانشکده صنایع غذایی

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته
علوم و صنایع غذایی

آنالیز انتقال حرارت و جرم و پیش بینی تغییرات بافتی در طی سرخ کردن خلال‌های سیب زمینی

پژوهش و نگارش:
حسن صباغی

اساتید راهنما:
دکتر امان محمد ضیائی‌فر
دکتر علیرضا صادقی ماهونک

اساتید مشاور:
دکتر مهدی کاشانی‌نژاد
دکتر حبیب اللّه میرزایی

تابستان ۱۳۹۲

تعهدنامه پژوهشی

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه‌های تحصیلی دانشجویان دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان مبین بخشی از فعالیت‌های علمی- پژوهشی بوده و همچنین با استفاده از اعتبارات دانشگاه انجام می‌شود؛ بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

۱- قبل از چاپ پایان نامه خود، مراتب را قبلا به طور کتبی به مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه اطلاع داده و کسب اجازه نمایند.
۲- قبل از چاپ پایان نامه در قالب مقاله، همایش، اختراع و اکتشاف و سایر موارد، ذکر نام دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان الزامی است.
۳- انتشار نتایج پایان نامه باید با اطلاع و کسب اجازه از استاد راهنما صورت گیرد.

اینجانب **حسن صباغی** دانشجوی رشته **علوم و صنایع غذایی** مقطع **کارشناسی‌ارشد** تعهدات فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده و به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی و امضاء

سپاس بیکران بر همدلی و همراهی و همگامی مادر دلسوز و مهربانم

که سجده ی ایثارش گل محبت را در وجودم پروراند و

دامان گهربارش لحظه های مهربانی را به من آموخت.

تقدیم به مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب رحمت است و به شکر اندرش مزید نعمت.

بر خود واجب می‌دانم از زحمات مادر و پدر عزیزم که در تمام مراحل زندگی مرا با مهر و محبت خودشان یاری نموده‌اند نهایت تشکر و قدردانی را نمایم.

از زحمات اساتید راهنمای ارجمند دکتر امان محمد ضیائی فرد و دکتر علیرضا صادقی ماهونک که مرا در تمامی مراحل این پایان نامه یاری نمودند، کمال امتنان را دارم.

همچنین از اساتید مشاور گرامی دکتر مهدی کاشانی نژاد و دکتر حبیب الله میرزایی نهایت تشکر را دارم.

برای همه اساتید بزرگوارم در هیئت علمی گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به پاس زحمات ایشان در علم آموزی و اندوخته‌ی سوادم، توفیقات روزافزون از خداوند منان خواستارم.

چکیده

سرخ کردن عمیق از مهمترین عملیات واحد مورد استفاده در صنعت غذا می‌باشد. به دلیل افزایش تقاضا برای مواد غذایی سالم، صنعت خلال و چیپس سیب زمینی پارامترهای کیفی عمده‌ای را نظیر بافت، رنگ و محتوی روغن برای محصولات خود در نظر گرفته است. در طی فرآیند سرخ کردن انتقال همزمان حرارت (جابه‌جایی و هدایتی) و جرم (خروج آب از ماده غذایی و نفوذ روغن به آن) اتفاق می‌افتد. پارامترهای عمده فرآیند که بر جنبه‌های کیفی محصول موثر هستند، دمای سرخ کردن و مدت آن می‌باشند. بنابراین، هدف این پژوهش، در مرحله اول مطالعه وابستگی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (h)، جذب روغن، مدول ظاهری (مدول سکانت به عنوان شاخص بافتی) و پارامترهای رنگی (L, a, b) به دما و زمان فرآیند بود. در مرحله دوم، مدل سنتیکی تجربی مناسب برای توصیف تغییرات در طی فرآیند انتخاب شد. بدین منظور، خلال‌های سیب زمینی (به ابعاد mm^3 ۵۰×۵×۵) در سه دمای مختلف (۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ °C) به مدت ۴ دقیقه سرخ شدند. دمای محصول یک میلی‌متر زیر سطح و در مرکز خلال توسط ترموکوپل نوع T و دیتالاگر ثبت شد. جرم (محتوی رطوبت و روغن) و بافت محصول به ترتیب با فاصله زمانی ۶۰ و ۳۰ ثانیه اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای سرخ کردن ثابت سنتیکی برای انتقال رطوبت افزایش یافته و برای انتقال روغن کاهش می‌یابد. ضریب انتقال حرارت با استفاده از دو روش براساس دمای مرکزی (بدون نیاز به دانستن محل ترموکوپل) و دمای سطحی محصول تخمین زده شد. بدلیل اینکه در مدت زمان طولانی دمای روغن تاثیری بر دمای ثبت شده در مرکز محصول ندارد، این روش بر خلاف روش سطحی نشان داد که با افزایش دمای روغن ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. با این حال روش سطحی با ارتباط ضریب انتقال حرارت به نرخ کاهش آب محصول منطقی‌تر به نظر می‌رسد. مدول سکانت و چقرمگی در طی سرخ کردن بخصوص در ۳۰ ثانیه ابتدایی کاهش (به صورت نمایی) یافت. در زمان یکسان، مدول سکانت و چقرمگی برای خلال‌های سرخ شده در دمای کمتر (۱۴۵ °C)، میزان کمتری (نرمی بیشتر) بدست آمد. تغییر رنگ در دماهای بالا شدیدتر بود. در نهایت، با این نتایج تئوری دمای بالا و زمان کوتاه برای کاهش محتوی روغن محصول منطقی به نظر می‌رسد.

واژگان کلیدی: سرخ کردن، خلال سیب زمینی سرخ شده، انتقال حرارت، مدول سکانت، رنگ، مدل سنتیکی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه و کلیات

۱-۱- فرآیند سرخ کردن ۲

۱-۲- روغن مناسب سرخ کردن ۶

۱-۳- حفظ کیفیت روغن در حین سرخ کردن ۸

۱-۴- **انتقال حرارت در سرخ کردن** ۱۲

۱-۵- انتقال جرم در طی سرخ کردن ۱۴

۱-۶- مدل سازی فرآیند سرخ کردن ۱۸

۱-۷- فرآیند تولید خلال سیب زمینی سرخ شده ۱۹

۱-۸- بافت خلال سیب زمینی سرخ شده ۲۰

۱-۹- رنگ مواد غذایی سرخ شده ۲۲

۱-۱۰- آکریل آمید ۲۳

۱-۱۱- اهداف پژوهش ۲۴

۱-۱۲- فرضیات پژوهش ۲۴

فصل دوم: پیشینه تحقیق

۲-۱- مطالعات حرارتی بر روی فرآیند سرخ کردن ۲۶

۲-۲- بررسی جذب روغن و کاهش آب محصولات سرخ شده ۳۰

۲-۳- مطالعات بافت سنجی روی خلال سیب زمینی سرخ شده ۳۴

۲-۴- مطالعات رنگ سنجی روی خلال سیب زمینی سرخ شده ۳۷

۲-۵- جمع‌بندی پیشینه تحقیق ۳۸

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل سوم: مواد و روش‌ها

۳-۱- آماده‌سازی خلال‌های سیب زمینی ۴۰

۳-۲- عملیات آنزیم بری ۴۰

۳-۳- بررسی انتقال جرم در حین سرخ کردن ۴۰

۳-۳-۱- عملیات سرخ کردن ۴۰

۳-۳-۲- اندازه‌گیری رطوبت محصول ۴۱

۳-۳-۳- اندازه‌گیری روغن جذب شده ۴۱

۳-۳-۴- تخمین پارامترهای انتقال جرم ۴۲

۳-۳-۵- بررسی سنتیک کاهش آب ۴۴

۳-۳-۶- بررسی سنتیک جذب روغن ۴۶

۳-۴- بررسی انتقال حرارت در حین سرخ کردن ۴۷

۳-۴-۱- ثبت تغییرات دمای محصول در حین سرخ کردن ۴۷

۳-۴-۲- تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی با دمای مرکزی ۴۸

۳-۴-۳- تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی با دمای سطحی ۴۹

۳-۴-۴- بررسی تغییرات ضریب انتقال حرارت هدایتی محصول ۵۱

۳-۵- بررسی تغییرات بافت در طی سرخ کردن ۵۱

۳-۵-۱- ثبت پارامترهای بافت با دستگاه بافت سنج ۵۱

۳-۵-۲- بررسی تغییرات مدول ظاهری الاستیسیته ۵۲

۳-۵-۳- برازش مدل سنتیکی روی داده‌های تجربی مدول سکانت ۵۳

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۳-۵-۴- بررسی تغیرات چقرمگی بافت خلال سیب زمینی ۵۴

۳-۶- بررسی تغییرات رنگ خلال سیب زمینی طی سرخ کردن ۵۵

۳-۶-۱- ثبت پارامترهای رنگی با دستگاه لاویباند ۵۵

۳-۶-۲- بررسی سنتیک تغییر پارامترهای رنگی ۵۵

۳-۶-۳- بررسی سنتیک تغییر رنگ ۵۶

۳-۷- آنالیز آماری ۵۷

فصل چهارم: نتایج و بحث

۴-۱- نتایج بررسی انتقال جرم در حین سرخ کردن ۶۰

۴-۱-۱- تغییرات رطوبت و روغن محصول در حین سرخ کردن ۶۰

۴-۱-۲- پارامترهای انتقال جرم ۶۱

۴-۱-۳- سنتیک خروج آب از محصول ۶۲

۴-۱-۴- سنتیک جذب روغن محصول ۶۳

۴-۲- نتایج بررسی انتقال حرارت در حین سرخ کردن ۶۸

۴-۲-۱- تغییرات دمای محصول حین سرخ کردن ۶۸

۴-۲-۲- میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از دمای مرکزی ۷۰

۴-۲-۳- میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از دمای سطحی ۷۱

۴-۲-۴- تغییرات هدایت حرارتی محصول ۷۵

۴-۳- نتایج بافت سنجی محصول ۷۶

۴-۳-۱- تغییرات مدول ظاهری الاستیسیته ۷۸

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۴-۳-۲- تغییرات چقرمگی بافت خلال سیب زمینی ۸۱

۴-۴- نتایج سنتیک تغییرات رنگ محصول ۸۲

۴-۴-۱- فاکتور روشنایی (L) ۸۲

۴-۴-۲- فاکتور قرمزی (a) ۸۳

۴-۴-۳- فاکتور زردی (b) ۸۴

۴-۴-۴- سنتیک تغییر رنگ کلی محصول (ΔE) ۸۶

۴-۵- نتایج تجزیه و تحلیل آماری ۸۷

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری ۹۰

۵-۲- پیشنهادات پژوهشی ۹۲

۵-۲- پیشنهادات اجرائی ۹۳

فهرست منابع ۹۶

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱- میانگین محتوی روغن در برخی مواد غذایی سرخ‌شده به روش عمیق ۱۸
جدول ۳-۱- ویژگی‌های حرارتی سیب زمینی ۵۰
جدول ۴-۱- پارامترهای انتقال جرم به همراه انحراف معیار برای دماهای مختلف روغن ۶۲
جدول ۴-۲- اطلاعات تابع نمایی برازش شده برای تغییرات محتوی روغن در طی زمان ۶۴
جدول ۴-۳- پارامترهای انتقال حرارت به همراه انحراف معیار برای دماهای مختلف روغن ۷۱
جدول ۴-۴- پارامترهای تابع برازش شده روی داده‌های تجربی جزء حرارتی تبخیر ۷۴
جدول ۴-۵- اطلاعات برازش تابع روی تغییرات مدول سکانت در طی زمان ۷۹
جدول ۴-۶- اطلاعات برازش مدل سنتیکی روی پارامترهای رنگی در دماهای مختلف ۸۵
جدول ۴-۷- اطلاعات برازش مدل سنتیکی روی تغییر رنگ با زمان در دماهای مختلف ۸۷
جدول ۴-۸- میانگین محتوی رطوبت از محصول به همراه انحراف معیار (آلفا= ۰/۰۱) ۸۸
جدول ۴-۹- میانگین محتوی روغن محصول به همراه انحراف معیار (آلفا= ۰/۰۱) ۸۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- تشکیل پوسته و جذب روغن در طی سرخ کردن خلال سیب زمینی ۳
شکل ۱-۲- طرحی از کنترل دو مرحله ای فرآیند سرخ کردن و نقاط بحرانی مهم ۵
شکل ۱-۳- ارتباط بین زاویه تماسی و قابلیت نفوذ مایع به بستر جامد ۱۱
شکل ۱-۴- منحنی بلومنتال (۱۹۹۱) به همراه تاثیر فیلتراسیون و فرآیند غشایی بر کیفیت روغن ۱۲
شکل ۱-۵- فرآیند تولید خلال سیب زمینی سرخ شده ۲۰
شکل ۱-۶- تاثیر تیمار حرارتی بر بافت سیب زمینی..... ۲۱
شکل ۲-۱- روش آزمایشگاهی اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی ۲۷
شکل ۲-۲- تصویر قطره روغن قبل (الف) و بعد از پردازش تصویر..... ۳۲
شکل ۳-۱- نحوه اتصال کندانسورهای سه دستگاه سوکسله..... ۴۲
شکل ۳-۲- تجهیزات ثبت تغییرات دمایی خلال سیب زمینی در طی سرخ کردن ۴۷
شکل ۳-۳- آزمون فشار به صورت نفوذی برای خلال سیب زمینی ۵۲
شکل ۳-۴- محاسبه مدول سکانت (S. M)..... ۵۳
شکل ۳-۵- منحنی تنش-کرنش تا نقطه پارگی و محاسبه چقرمگی با سطح زیر نمودار ۵۴
شکل ۳-۶- صفحه رنگی مخصوص کالیبراسیون و نحوه قرار گیری نمونه در دستگاه لاویباند..... ۵۵
شکل ۴-۱- تغییرات محتوی رطوبت و روغن طی سرخ کردن..... ۶۰
شکل ۴-۲- نمودار غلظت بدون بُعد (رطوبت) در برابر زمان سرخ کردن ۶۱
شکل ۴-۳- رگرسیون خطی رطوبت بدون بُعد و رابطه ثابت سنتیک کاهش آب با عکس دما ۶۳
شکل ۴-۴- منحنی‌های تابع نمایی برازش شده روی داده‌های تجربی جذب روغن ۶۴
شکل ۴-۵- تاثیر دمای سرخ کردن روی میزان تعادلی روغن و ثابت سنتیک جذب روغن ۶۵
شکل ۴-۶- ارتباط خطی بین ثابت‌های سنتیک کاهش آب و جذب روغن..... ۶۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۷- توپوگرافی روغن جذب شده به عنوان تابعی از زمان و محتوی رطوبت محصول ۶۸
شکل ۴-۸- تغییرات دمای سطحی و مرکزی محصول در طی سرخ کردن در سه دمای مختلف ۷۰
شکل ۴-۹- تغییرات لگاریتم دمای بدون بعد در برابر زمان در دماهای مختلف روغن ۷۱
شکل ۴-۱۰- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در حین سرخ کردن ۷۲
شکل ۴-۱۱- ارتباط بین ضریب انتقال حرارت جابجایی و نرخ کاهش آب ۷۳
شکل ۴-۱۲- منحنی برازش شده روی تغییرات جزء حرارتی تبخیر آب محصول طی فرآیند ۷۴
شکل ۴-۱۳- تغییرات هدایت حرارتی محصول طی سرخ کردن براساس معادله آندرسن و اسپل ... ۷۵
شکل ۴-۱۴- تغییرات تنش در برابر کرنش برای نمونه‌های آزمایشی در ۲۴۰ ثانیه ۷۷
شکل ۴-۱۵- تغییرات مدول سکانت برای محصول در دماهای مختلف حین سرخ کردن ۷۹
شکل ۴-۱۶- توابع برازش شده روی داده‌های تجربی مدول سکانت در دماهای مختلف ۷۹
شکل ۴-۱۷- تاثیر دمای سرخ کردن روی میزان تعادلی مدول سکانت و ثابت سنتیک تغییر آن ۸۰
شکل ۴-۱۸- توپوگرافی تغییرات مدول سکانت در برابر زمان و دمای سرخ کردن ۸۰
شکل ۴-۱۹- تغییرت چقرمگی در طی سرخ کردن در دماهای مختلف ۸۱
شکل ۴-۲۰- تغییرات پارامتر روشنایی در برابر زمان در دماهای مختلف سرخ کردن ۸۳
شکل ۴-۲۱- تغییرات پارامتر قرمزی در برابر زمان در دماهای مختلف سرخ کردن ۸۴
شکل ۴-۲۲- تغییرات پارامتر زردی در برابر زمان در دماهای مختلف سرخ کردن ۸۵
شکل ۴-۲۳- منحنی برازش شده روی داده‌های سنتیک تغییر رنگ (ΔE) طی سرخ کردن ۸۶
شکل ۴-۲۴- تأثیر دمای سرخ کردن روی میزان تعادلی تغییر رنگ و ثابت سنتیک آن ۸۷

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱- مقدمه و کلیات

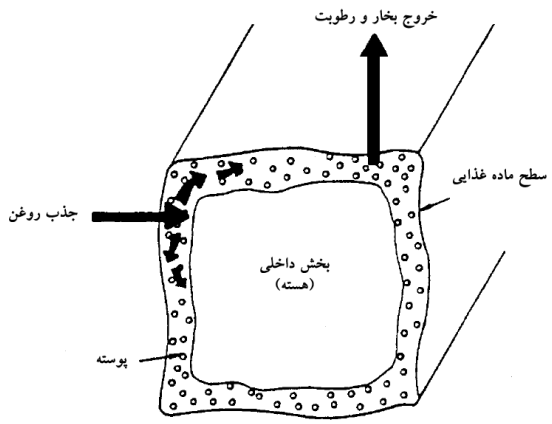
۱-۱- فرایند سرخ کردن

سرخ کردن[1] از رایج‌ترین عملیات واحد در صنایع غذایی است که به صورت فرآوری محصول و پخت در روغن داغ می‌باشد. این فرآیند در دنیا سالانه بیش از ۲۰ میلیون تن روغن سرخ‌کردنی را مصرف می‌کند (گِرتز، ۲۰۰۴). ویژگی‌های مطلوب مواد غذایی سرخ‌شده از جمله طعم، رنگ، بافت و ظاهر موجب مطلوبیت این محصولات در بین مصرف‌کنندگان شده است. به طور کلی انواع روش‌های سرخ کردن مواد غذایی شامل سرخ کردن عمیق[2] به معنی پختن غذا بصورت غوطه ورسازی آن در چربی یا روغن داغ و سرخ کردن سطحی[3] به شکل پختن غذا در روغن یا چربی کم عمق در یک تابه معمولی می‌باشد. فرآیند سرخ‌کردن از فرآیندهای پیچیده به دلیل انتقال همزمان حرارت و جرم است (داتا، ۲۰۰۷) و کوتاه بودن زمان پخت در این فرآیند موجب بروز خواص حسی منحصر به فرد در ماده غذایی، از جمله عطر و طعم و رنگ می‌شود. در واقع سرخ‌کردن یک فرآیند آب‌زدایی[4] است که در روغنی با دمای بالا (حدود ۱۶۰ تا۱۸۰ درجه سانتیگراد) انجام می‌گیرد اما با این حال، درجه حرارت داخل ماده غذایی از ۱۰۰ درجه سانتیگراد بالاتر نمی‌رود (ساگوی و همکاران، ۱۹۹۸). سرخ کردن شامل چهار مرحله حرارت دهی اولیه (انتقال حرارت جابه جایی طبیعی و عدم تبخیر)، جوشش سطحی (تشکیل پوسته و انتقال حرارت جابجایی اجباری)، مرحله نرخ کاهشی (افزایش ضخامت پوسته، طولانی‌ترین مرحله) و نقطه پایان حباب می‌باشد (فارکاس و همکاران، ۱۹۹۶a). این چهار مرحله می‌تواند به صورت دوفاز عدم جوشش (شامل حرارت دهی اولیه و نقطه پایان حباب) و فاز جوشش (شامل جوشش سطحی و مرحله نرخ کاهشی) بیان شود (سروگا و بودژاکی، ۲۰۰۵).

بسیاری از ویژگی‌های مطلوب غذاهای سرخ‌شده از شکل‌گیری یک ساختار مرکب مشتق شده‌است که این ساختار به صورت خشک، متخلخل، دارای لایه چرب بیرونی یا پوسته[5] و قسمت داخلی مرطوب و پخته یا هسته[6] می‌باشد (شکل ۱-۱). پوسته حاصل چندین تغییر عمده در سلول‌ها

[1] Frying
[2] Deep frying
[3] Shallow frying
[4] Dehydration
[5] Crust
[6] Core

در سطوح زیر سلولی و لایه‌های بیرونی محصول است. این تغییرات فیزیکی و شیمیایی شامل آسیب فیزیکی در هنگام بریدن و تولید قطعات برش داده شده محصول و ایجاد یک سطح زبر و خروج محتویات سلولی، ژلاتینه شدن[1] نشاسته و کاهش آب محصول، واسرشتی[2] پروتئین‌ها، شکسته شدن تراکم سلولی، تبخیر آب و دهیدراته شدن سریع بافت و در نهایت جذب روغن است (پارکاش و گریتز، ۲۰۰۴). سرخ کردن همچنین وسیله‌ای برای حفظ غذا نیز می‌باشد، زیرا حرارت میکروارگانیسم‌ها را از بین برده، آنزیم‌ها را غیر فعال ساخته و فعالیت آب سطحی را کاهش می‌دهد. کیفیت مواد غذایی سرخ کردنی تا حد زیادی تابع روغن مصرفی است. اگر روغن آسیب دیده باشد بر روی طعم، بافت و به طور کلی ماده غذایی تاثیر می‌گذارد. فرآیند سرخ کردن بسیار سریع است و زمانی که به درستی انجام گیرد، سطح بیرونی محصول داغ تر بوده و مرکز آن نیز پخته می‌باشد. هرچقدر روغن در طی فرآیند دچار آسیب بیشتری شود ترکیبات فعال در سطح[3] بیشتری تشکیل شده و ارتباط ماده غذایی و روغن افزایش یافته و این امر موجب خشک شدن بیش از حد ماده غذایی و تیرگی محصول می‌شود (دوبارگانز و همکاران، ۲۰۰۰).



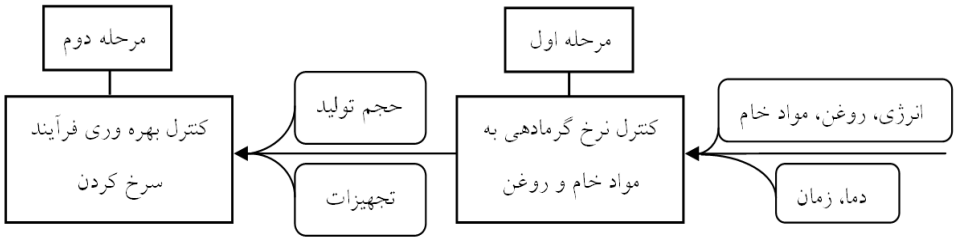
شکل ۱-۱- تشکیل پوسته و جذب روغن در طی سرخ کردن خلال سیب زمینی (گویلایومین، ۱۹۸۸)

[1] Gelatinization
[2] Denaturation
[3] Surfactant

در طبیعت فرآیندهای مختلف به دو صورت پایا و ناپایا وجود دارند. در حالت پایا شرایط فرآیند با زمان تغییر نمی‌کند اما در حالت ناپایا شرایط فرآیند به زمان بستگی دارد. حالت ناپایا در طبیعت بیشتر رخ داده و نیاز به اقدامات کنترلی به منظور حفظ شاخصه‌های محصول می‌باشد (نیرانجان و همکاران، ۲۰۰۸). سرخ کردن یک فرآیند ناپایا است و علاوه بر این از نظر محیط حرارتی فرآیندی دینامیک می‌باشد. در اشکال دیگر پخت مواد غذایی محیط حرارتی مانند هوای داغ، آب داغ یا بخار تغییر نمی‌کند، در حالی که روغن سرخ کردنی از محیطی به شکل تری‌گلیسرید خالص به محیطی حاوی هزاران ترکیب مختلف تبدیل می‌شود که حاصل واکنش بین روغن، غذا، حرارت و اکسیژن می‌باشد. عوامل زیادی مانند ماهیت چربی مصرفی، درجه حرارت فرآیند، سرعت چرخه جبرانی روغن[1] در سرخ‌کن، اجزاء غذا و غیره کنترل تغییرات شیمیایی بوجود آمده و خطر سمیت مربوطه را تعیین می کنند. در بسیاری از صنایع مرتبط با فرآیند سرخ کردن مداوم، کارایی سیستم سرخ کن به طور مستقیم با کارایی سیستم گرمایش روغن مرتبط است. کنترل موثر با هدف بهره‌مندی از محصولی با کیفیت مناسب و همزمان با آن کاهش انرژی مصرفی نیازمند دانش و آشنایی با خصوصیات و ارتباط بین این دو سیستم است (ویو و همکاران، ۲۰۱۳). تحقیقات نشان داده است که تصمیم گیری در مورد نحوه کنترل فرآیند با استفاده از فرضیات منطق فازی[2] شرایط را برای درک هرچه بیشتر فرآیند توسط انسان فراهم می‌کند. علت این امر این است که در جهان واقعیات، بسیاری از مفاهیم را آدمی به صورت فازی (به معنای غیر دقیق، ناواضح و مبهم) درک می‌کند و به کار می‌بندد. بنابراین مدل سازی[3] فرآیند سرخ کردن بخصوص مدل سازی و آنالیز حرارتی، به عنوان نقطه بحرانی مهم، که با هدف نزدیک شدن هرچه بیشتر به شیوه‌های تفکر و تعلم خود انسان در چارچوب منطق فازی انجام می‌شود، تاحد زیادی در کنترل بهتر و بیشتر فرآیند به متخصصین صنعت غذا می‌تواند کمک کند. بر این اساس کنترل فازی دو مرحله‌ای برای فرآیند سرخ‌کردن پیشنهاد شده است (شکل ۱-۲). این امر موجب کنترل اتوماتیک فرآیند در قالب عبارات کیفی مانند بهره‌وری کم، رنگ روشن‌تر و قوام خوب و غیره در سیستم‌های رایانه‌ای می‌شود. بنابراین رایانه‌ها می‌توانند مسائل و مشکلات بسیار پیچیده فرآیند را با همان سهولت و شیوایی بررسی و حل کنند که ذهن انسان قادر به ادراک و اخذ تصمیمات

[1] Turnover
[2] Fuzzy logic
[3] Modeling

سریع و مناسب است. این سیستم‌ها در کنترل نقاط بحرانی با توجه به اهمیت آن‌ها در سیستم کنترل تولید می‌توانند مفید باشند(رایوتایکی، ۲۰۰۳). انرژی مصرفی در طی سرخ کردن از دیدگاه مهندسی و اقتصادی فرآیند اهمیت زیادی دارد. از نظر مصرف کننده نیز سلامت، ظاهر و خصوصیات حسی محصول نهایی بسیار مهم می‌باشد. بنابراین هدف اصلی یک سیستم کنترل باید حفظ حداکثری مواد مغذی و سلامت محصول همزمان با بهینه سازی مصرف انرژی باشد (رایوتایکی، ۲۰۰۲). در واقع فهم انتقال حرارت و جرم در طی سرخ کردن می‌تواند برای بهینه سازی هر چه بیشتر فرآیند مفید باشد (فرید و چن، ۱۹۹۸).



شکل ۱-۲- طرحی از کنترل دو مرحله ای فرآیند سرخ کردن و نقاط بحرانی مهم

اصلاحات فرآیند می‌تواند تا حد زیادی از خطرات تهدید کننده سلامت و افت کیفیت محصول نهایی پیشگیری کند. به عنوان مثال در سرخ کردن تحت خلاء[1] به دلیل کاهش فشار، نقطه جوش روغن و آب در ماده غذایی هر دو کاهش یافته و این امر می‌تواند محتوی روغن محصولات سرخ شده را کاهش داده و رنگ و طعم طبیعی محصول را به دلیل پایین بودن دما و اکسیژن در حین فرآیند حفظ کرده و در نهایت اثرات تخریبی روی کیفیت روغن کاهش می‌یابد (فان و همکاران، a,b ۲۰۰۵ و گارایو و موریرا، ۲۰۰۲ و شایو و همکاران، ۲۰۰۵). در روشی جدید به نام سرخ کردن با هوای داغ[2] با تماس مستقیم بین امولسیون حاصل از پخش قطرات روغن در هوای داغ در محفظه سرخ کن، محصول با سرعت ثابت از محفظه عبور کرده تا تماس یکنواختی بین دوفاز بوجود آید. محصول در این حالت آب زدایی شده و پوسته معمول محصولات سرخ شده درآن تشکیل می‌شود. میزان روغن

[1] Vacuum frying
[2] Hot air frying

مصرف شده در این روش به میزان معنی داری از روش معمول سرخ کردن عمیق کمتر است در نتیجه محصولی با حداقل محتوی روغن تولید می‌شود. امروزه تجهیزات طراحی شده بر اساس این روش سرخ کردن با هدف دستیابی به محصولات سرخ شده با حداقل روغن موجود می‌باشند (آندرس و همکاران، ۲۰۱۲). اولین شاخصه کیفی ماده غذایی، ایمنی اجزای سازنده آن است و این امر از طریق آنالیز احتمال خطر و کنترل نقاط بحرانی در فرآیند سرخ کردن قابل انجام است (کواگلیا و بوکارلی، ۲۰۰۱) و رسیدن به این هدف نیازمند آشنایی با ضرایب انتقال حرارت و در نظر گرفتن اثرات تبخیر آب از محصول و سایر جزئیات فرآیند می‌باشد (آلویز و همکاران، ۲۰۰۹). آکریل آمید از ترکیبات حاصل از واکنش بین اسیدآمینه آسپارژین و قندهای احیاء کننده در حین واکنش مایلارد است و کنترل دما و زمان در حین سرخ کردن تاثیر معنی داری بر کاهش تشکیل آکریل آمید دارد (رومانی و همکاران، ۲۰۰۹).

۱-۲- روغن مناسب سرخ کردن

ارتباط مستقیمی بین کیفیت غذای سرخ شده و کیفیت روغن وجود دارد و فهم این ارتباط یکی از موارد اصلی برای رسیدن به فرآیند مطلوب است. با تجزیه شدن روغن، کیفیت غذایی که در آن سرخ می‌شود نیز تغییر می‌کند. وقتی روغن حرارت داده شده و از مرحله شروع سرخ کردن به مرحله دورریزی می‌رسد، کیفیت آن تغییر کرده و قابلیت روغن برای تولید غذای دارای کیفیت خوب نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. تغییرات بوجود آمده در کیفیت غذا، منعکس کننده تغییرات شیمیایی چربی مصرف شده برای سرخ کردن است. اثبات شده است که جذب روغن خلال‌ها و چیپس‌های سیب زمینی سرخ شده در دماهای پایین نسبت به دماهای بالاتر بیشتر می‌باشد (کیتا و همکاران، ۲۰۰۷) اگرچه این امر به عوامل دیگری مانند زمان فرآیند و نوع روغن نیز ارتباط داده شده است و در برخی مطالعات نیز دماهای بالا موجب افزایش روغن محصول شده یا حتی تاثیری بر آن نداشته است (دانا و ساگوی، ۲۰۰۶).

روغن در طول عمر مفید سرخ کردن خود باید بتواند یک پوشش سطحی اشتها بر انگیز، به رنگ قهوه‌ای طلایی و ظاهری غیر چرب بر روی غذا بوجود آورد، طعم نامطبوع در غذا ایجاد نکند، عمر سرخ کردن طولانی (مقاوم در برابر دود کردن و فساد شیمیایی) داشته باشد که نتیجه آن اقتصادی بودن

فرآیند است و در نهایت در برابر تشکیل پلیمر و کف کردن مقاوم باشد که نتیجه آن تمیز ماندن تجهیزات است. به طور کلی تغییرات حاصل در چربی یا روغن در هنگام سرخ‌کردن، توسط چهار فرآیند اصلی هیدرولیز چربی، اکسیداسیون چربی و سپس پلیمریزه شدن یا تشکیل ترکیبات حلقوی[1]، پلیمریزاسیون چربی و تشکیل اتصال‌های جدید کربن-کربن در شرایطی که اکسیژن وجود ندارد و در نهایت انتقال جرم از غذا به روغن یا چربی یا آلودگی به ترکیبات قطبی رخ می‌دهد. بنابراین انتخاب روغنی با نسبت‌های مناسب اسیدهای چرب اشباع شده و تک غیر اشباع و چند غیر اشباع اهمیت زیادی دارد (کواگلیا و همکاران، ۱۹۹۸). این امر پتانسیل خطر تشکیل پراکسیدها یا هیدروپراکسیدها را در طی سرخ کردن کاهش می‌دهد. به عنوان مثال هنگامی که روغن زیتون برای سرخ کردن غوطه‌وری استفاده می‌شود، بسیاری از خواص مطلوب خود را حفظ کرده و تخریب آن بسیار کمتر از سایر روغن‌های متداول برای پخت وپز می‌باشد و این امر در جهت حفظ سلامت محصول سرخ شده اهمیت فراوانی خواهد داشت (کاسال و همکاران، ۲۰۱۰). هیدرولیز واکنش چربی‌ها و روغن‌ها با آب است و اکسیداسیون واکنش شیمیایی ماده با اکسیژن همراه با آزاد شدن حرارت می‌باشد. این دو واکنش اصلی در تخریب چربی‌ها و روغن‌ها بسیار اهمیت دارند. در این میان نقش اکسیداسیون در بوجود آمدن فساد بیشتر از هیدرولیز است. واکنش‌های اکسیداسیون ناشی از اسیدهای چرب می‌تواند با حضور آنتی اکسیدان‌های طبیعی موجود در روغن تا حدی کنترل شوند. روغن های سرخ کردنی دارای یک سیستم پیچیده از آنتی اکسیدان‌های طبیعی و یا مخلوطی از آنتی اکسیدان های طبیعی و مصنوعی هستند. کل میزان آنتی اکسیدان‌ها شاخصی از مقاومت روغن در برابر شوک اکسیداتیو در هنگام سرخ کردن است (چاتزیلازارو و همکاران، ۲۰۰۶). در واقع پراکسیداسیون لیپیدی اگر کنترل نشود نه تنها موجب کاهش محتوی اسیدهای چرب ضروری و ویتامین‌ها می‌شود بلکه می‌تواند ترکیبات خطرناکی را تولید کند که منجر به سرطان یا اختلال در سلامتی می‌شوند. واکنش پراکسیداسیون در اسیدهای چرب اشباع نشده منجر به تولید ترکیبات مضر از جمله مشتقات کلسترول اکسید شده می‌شود که توکوفرول و ویتامین E اثرمحافظتی قوی در برابر آن دارند (اریکسون، ۲۰۰۲). توکوفرول‌ها و ترکیبات فنولیک از مهمترین ترکیبات به عنوان آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی روغن‌های گیاهی هستند که به عنوان افزودنی نیز برای افزایش مقاومت اکسیداسیونی روغن استفاده می‌شوند. روغن‌های گیاهی خام همچنین دارای ترکیبات مختلفی مانند استرول‌ها، کارتنوئیدها و فسفولیپیدها

[1] Cyclation