



کاربرد فناوری مادون قرمز در صنایع غذایی

دنیا حسینی

دانشجوی مقطع کارشناسی، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و دامپروری، مجتمع آموزش عالی تربت جام، تربت جام، استان خراسان رضوی، ایران

حسن صباغی

استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و دامپروری، مجتمع آموزش عالی تربت جام، تربت جام، استان خراسان رضوی، ایران

چکیده

حرارت‌دهی با استفاده از امواج مادون قرمز یکی از روش‌های نوین در صنایع غذایی است که به واسطه مزایای خود، از جمله افزایش زمان ماندگاری مواد غذایی و حفظ کیفیت حسی و تغذیه‌ای، روز به روز گسترش بیشتری می‌یابد. در این روش، انرژی حرارتی به صورت الکترومغناطیسی منتقل و توسط مواد غذایی جذب می‌شود، که این امر سبب تولید حرارت می‌گردد. کاربردهای این فناوری شامل خشک‌کردن، پختن، کباب کردن، بلانچ کردن، پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون است. حرارت‌دهی مادون قرمز به دلیل ویژگی‌هایی نظیر راندمان بالا، زمان فرآیند کوتاه، و نفوذ مستقیم حرارت در محصول، به طرز مؤثری می‌تواند جایگزین یا مکمل روش‌های سنتی باشد. امواج مادون قرمز در سه دسته نزدیک، میانه و دور تقسیم‌بندی می‌شوند و اغلب از مادون قرمز دور در فرآیندهای غذایی استفاده می‌شود؛ زیرا بیشتر ترکیبات غذایی انرژی تابشی این طیف را جذب می‌کنند. به طور کلی، استفاده از فناوری حرارت‌دهی مادون قرمز باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی در فرآیندهای غذایی و سرعت‌بخشیدن به آن‌ها می‌شود.

واژگان کلیدی: مادون قرمز، صنایع غذایی، کیفیت، حرارت دهی، فرآیندهای غذایی

مقدمه

در سال های اخیر حرارت دهی بوسیله امواج مادون قرمز از روش های نوینی است که پیشرفت زیادی در صنایع غذایی داشته است و در آینده نیز با توجه به مزایای آن در افزایش زمان ماندگاری مواد غذایی همراه با حفظ کیفیت حسی و تغذیه ای، گسترش زیادی خواهد یافت. در این روش، انرژی حرارتی بصورت الکترومغناطیسی انتقال می یابد و به وسیله ماده غذایی جذب می شود و حرارت ایجاد می شود. از جمله کاربردهای این فناوری می توان خشک کردن، پختن، کباب کردن، بلانچ کردن، پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون محصولات غذایی را نام برد. با توجه به مشکلات حرارت دهی مرسوم و کاربردهای زیاد حرارت دهی مادون قرمز در صنایع غذایی انتظار می رود که این فناوری بتواند جایگزین یا مکمل مناسبی برای فرایندهای حرارتی مرسوم باشد. امروزه امواج مادون قرمز به عنوان یکی از منابع نوین تولید گرما جایگاه خاصی در صنعت غذا پیدا کرده است. فناوری حرارت دهی با مادون قرمز حجم زیادی از انرژی را در زمان کوتاهی به محیط یا ماده مورد فراوری منتقل می نماید. حرارت دهی مادون قرمز یک فناوری کارآمد بوده و ویژگی های شاخص آن شامل راندمان حرارت دهی بالا، کوتاه بودن زمان فرآیند و سرعت حرارت دهی سریع، حرارت دهی یکنواخت، نرخ انتقال حرارت بالا، مصرف انرژی کم و نفوذ مستقیم حرارت در محصول می باشد که سبب بهبود کیفیت محصول شده و باعث می گردد فرآورده تولید شده با این روش از کیفیتی بالاتر نسبت به فرآورده تولید شده با روش های سنتی برخوردار باشد. این فناوری در صنایع غذایی کاربردهایی زیادی داشته و از این میان می توان به خشک کردن، پخت، سرخ کردن، آنزیم بری، پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون اشاره نمود. در این مقاله به بررسی کاربردهای مختلف این فناوری در صنعت غذا پرداخته شده است. حرارت دهی مادون قرمز به عنوان یک فناوری جدید حرارت دهی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. محدوده کاربرد حرارت دهی مادون قرمز در صنایع غذایی گسترده است و در مجموع استفاده از این فناوری باعث کاهش هزینه های اقتصادی فرایندهای غذایی می شود و در برخی موارد فرایند را نیز سرعت می بخشد (Dos Santos, 2013).

امواج مادون قرمز در علم فیزیک به قسمتی از طیف پرتوهای الکترومغناطیسی گفته می شود که دامنه طول موج آنها از بالای سرخ مرئی آغاز و تا امواج ماکروویو را در بر می گیرد. امواج این طیف در سه دسته تقسیم بندی می شوند که شامل مادون قرمز نزدیک (NIR)، مادون قرمز میانه (MIR) و مادون قرمز دور (FIR) که محدوده طول موج تقریبی آنها به ترتیب ۷۸ - ۴/۱، ۴/۱ - ۳ و ۳ - ۱۰۰۰ میکرومتر است (Krishnamurthy et al., 2008). در کل، جهت انجام فرایند های غذایی، از میان این سه طیف مادون قرمز، بیشتر از FIR استفاده می شود زیرا بیشتر ترکیبات غذایی، انرژی تابشی طبقه FIR را جذب می کنند (Delfiya et al., 2022).

در سال های اخیر، بسیاری از روش های خشک کردن با تشعشعات مادون قرمز (IR) و روش های خشک کردن با کمک IR، مانند IR-هوای گرم، IR-خلأ، IR-میکروویو و خشک کن IR با ارتعاش گزارش شده است. این روش ها به دلیل رفتار سریع خشک کردن و زمان فراروری کمتر به دلیل نرخ بالای خشک کردن، مصرف انرژی کمتر، کنترل بهتر بر دما، محصولات با کیفیت عالی، اثرات زیست محیطی کمتر و همچنین قابلیت ترکیب آسان با سایر روش های گرمایش، محبوب شده اند. ترکیب تشعشعات IR با سایر روش های خشک کردن بسیار امیدوارکننده است، زیرا نه تنها نرخ خشک کردن را بهبود می بخشد بلکه کیفیت مواد غذایی را نیز حفظ می کند. خشک کردن با IR و روش های کمک دار IR به عنوان یک روش خشک کردن پتانسیل دار برای بسیاری از محصولات غذایی شناخته شده است. انتقال حرارت معمولاً به یکی از سه روش هدایت، جابجایی یا تشعشعی انجام می شود. در روش حرارت دهی رایج که از احتراق سوخت ها یا از مقاومت های الکتریکی استفاده می شود، معمولاً حرارت در اطراف ماده ای که قرار است گرم شود فراهم می شود تا با تماس با ماده به درون بافت نفوذ کند اما در روش حرارت دهی با امواج مادون قرمز، انرژی بصورت الکترومغناطیسی انتقال می یابد () و به وسیله ماده غذایی جذب می شود. در سال های اخیر، تلاش های تحقیقاتی موثر و گسترده ای در حوزه کاربرد حرارت دهی IR انجام شده است. از جمله کاربردهای آن می توان خشک کردن، پختن، کباب کردن، بلانچ کردن، پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون محصولات غذایی را نام برد (Delfiya et al., 2022).

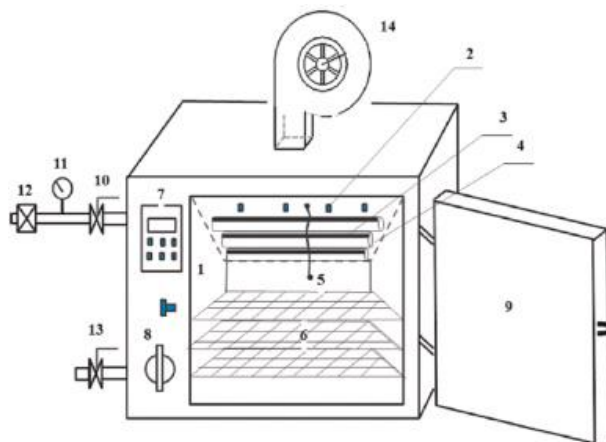
مکانیسم تشعشع مادون قرمز

تشعشع مادون قرمز (IR) نوعی از امواج الکترومغناطیسی است که از یک منبع حرارتی منتشر می‌شود و برای انتشار آن به هیچ محیطی نیاز ندارد. این نوع تشعشع در محدوده خارجی نور قرمز مرئی قرار دارد و طول موج آن از ۰.۷۵ تا ۱۰۰۰ میکرومتر متغیر است. IR به سه دسته مختلف تقسیم می‌شود: نزدیک به مادون قرمز (NIR)، میانه مادون قرمز (MIR) و دور مادون قرمز (FIR). با این حال، دامنه‌های طول موج برای این دسته‌ها هنوز یکسان نشده است. به طور کلی، طول موج‌های ۰.۷۵-۲ میکرومتر، ۲-۴ میکرومتر و ۴-۱۰۰۰ میکرومتر به ترتیب به نوارهای نزدیک به مادون قرمز، میانه مادون قرمز و دور مادون قرمز تعلق دارند (Jain & Pathare, ۲۰۰۴).

در مورد خشک کردن با NIR، بارزگار، زاره و استروشاین (۲۰۱۵) ویژگی‌های خشک کردن نخود سبز را تحت تشعشع نزدیک به مادون قرمز (۲.۵-۰.۶ میکرومتر) بررسی کردند. زمان خشک کردن هوای گرم ترکیب شده با خشک کردن مادون قرمز تا ۷۳.۱٪ نسبت به خشک کردن با هوای گرم به تنهایی کاهش یافت. علایی و امیری چایجان (۲۰۱۵) خشک کردن و کیوم نزدیک به مادون قرمز (۲.۵-۰.۷ میکرومتر) دانه‌های انار را انجام دادند. دمای بالاتر و فشار و کیوم پایین‌تر موجب افزایش نرخ خشک کردن، جمع‌شدگی و تغییر رنگ شد. خشک کردن با NIR همچنین در خشک کردن لیمو (Salehi & Kashaninejad, ۲۰۱۸b)، ملون (Aktaş, ۲۰۱۶)، کدو حلواپی (Şevik, Amini, & Khanlari, ۲۰۱۶)، قارچ دکمه‌ای (Salehi, ۲۰۱۶)، کاشانینجاده و جافاریانلاری (Kashaninejad, & Jafarianlari, ۲۰۱۶) و کیوی (Özdemir, Aktaş, Şevik, & Khanlari, ۲۰۱۷) استفاده شده است.

ویژگی‌های خشک کردن گلابی تحت خشک کردن MIR (۳-۲.۴ میکرومتر) توسط (Antal, Tarek-Tilistyák, Cziáky, ۲۰۱۷) افزایش شد. زمان کل خشک کردن تا ۴۲.۹٪ نسبت به خشک کردن انجمادی کاهش یافت. ژو و همکاران (۲۰۱۹) همچنین خشک کردن MIR (۳ میکرومتر) تفاله هلو را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که زمان خشک کردن تا ۳۳.۳٪ نسبت به خشک کردن با هوای گرم کاهش یافته است. خشک کردن MIR همچنین در خشک کردن قرص‌های جویدنی قارچ (Wang, ۲۰۱۴)، کوردیپس میلترایس (Zhang, Fang, & Xu, ۲۰۱۴)، کدو اسفنجی (Zhang et al., ۲۰۲۰) استفاده شده است.

کاهش قابل توجهی از زمان خشک کردن تحت خشک کردن FIR (۵-۴ میکرومتر) در مطالعه سنویراتنه گزارش شده است (Senevirathne et al., ۲۰۱۰)، هرچند که مقدار آن ارائه نشده است. ناتاکاراناکوله، جیبون و سوپونونارایت (۲۰۱۰) از تشعشع FIR (۷-۱۰۰۰ میکرومتر) برای کمک به خشک کردن با هوای گرم و خشک کردن با حرارت هات استفاده کردند. استفاده از تشعشع FIR نه تنها نرخ خشک کردن را افزایش می‌دهد، بلکه به حفظ کیفیت بالای مواد غذایی نیز کمک می‌کند. هیتر IR معمولاً به دو نوع تقسیم می‌شود: هیتر برقی (IR معمولی، شکل ۱) و هیتر گازسوز (CIR، شکل ۱). در هیتر برقی، تابش با عبور جریان الکتریکی از یک مقاومت تولید می‌شود. در حالی که در هیتر گازسوز، emitter CIR با استفاده از گاز طبیعی یا پروپان برای تولید احتراق بر روی سطح مشعل تغذیه می‌شود. به طور کلی، emitter CIR از نظر انرژی کارآمدتر از emitterهای IR معمولی است زیرا به طور مستقیم گاز طبیعی را به انرژی تابشی تبدیل می‌کند (Pawar, ۲۰۱۷).



شکل ۱- خشک کن مادون قرمز معمولی: (۱) محفظه خشک کردن؛ (۲) فن گریز از مرکز؛ (۳) لوله های شیشه ای کوارتز مادون قرمز؛ (۴) ترموکوپل های K؛ (۵) سینی توری؛ (۶) واحد مدیریت هوا؛ (۷) رطوبت سنج؛ (۸) کنترل کننده دما؛ (۹) درب (Roknul, Zhang, ۲۰۱۴). (Mujumdar, & Wang, ۲۰۱۴)

تابش مادون قرمز نوعی انتقال حرارت بدون تماس است و انتشار امواج الکترومغناطیسی به یک محیط نیاز ندارد، بنابراین می تواند در محیط خلاء نیز انتشار یابد. انرژی مادون قرمز که توسط منبع حرارتی منتشر می شود، به سطح گرم شونده تابیده شده و به طور مستقیم به لایه های درونی ماده نفوذ می کند. این انرژی مادون قرمز توسط مولکول ها در لایه های مختلف ماده جذب می شود که باعث افزایش سطح انرژی ارتعاشی مولکول ها می شود و نوساناتی ایجاد می کند که حرارت تولید کرده و دما را افزایش می دهد. این یکی از مهم ترین مزایای تابش مادون قرمز است، زیرا از اتلاف انرژی جلوگیری کرده و به طور قابل توجهی کیفیت اصلی محصول را حفظ می کند. از آن جا که انرژی تابش مادون قرمز به طور مستقیم توسط مولکول های ماده جذب می شود و چگالی انرژی تابش مادون قرمز بسیار بالاست، دمای سطح به سرعت افزایش می یابد که این سرعت بسیار بیشتر از انتقال حرارت به روش های هدایت و همرفت است. عمق نفوذ تابش بستگی به ویژگی های نمونه (برای مثال، محتوای رطوبت) و طول موج تابش دارد. عمق نفوذ و مدل آن در مرجع (Pawar & Pratape, ۲۰۱۷) معرفی شده است.

پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون

استفاده از پرتو مادون قرمز برای اهداف پاستوریزاسیون سطحی، پتانسیل تبدیل شدن به یک روش صنعتی را دارد. قرار دادن یک محصول غذایی در معرض منبع حرارتی IR منجر به افزایش دمای سطحی شده که برای غیرفعال کردن میکروارگانیسم های بیماری زای مدنظر موثر است. اشعه ی مادون قرمز عوامل بیماری زا را از طریق آسیب به اجزا درون سلولی مانند DNA، RNA، ریبوزوم، غشاء سلولی و پروتئین های سلولی غیر فعال می کند. در مطالعات متعددی از پرتو مادون قرمز به منظور پاستوریزاسیون مواد غذایی استفاده شده است. به عنوان مثال می توان به پاستوریزه کردن سطحی پنیر دلمه، صدف، نودل ژاپنی، پاستوریزه کردن ثانویه خمیر ماهی آب پز شده، استریلیزه کردن سطح گندم، ضد عفونی اسپورهای قارچی در مواد کشاورزی و پاستوریزه کردن سوسیس بوقلمون و هات داگ آلوده به مونوسیتوزها اشاره کرد. مونوسیتوزها گونه ای از باکتری های بیماری زا هستند که می توانند در یخچال و در کنار سایر اقدامات نگهداری مواد غذایی نیز زنده بمانند و حتی رشد کنند. این باکتری منجر به بروز بیماری لیستریوز می شود که علائم خفیف آن شامل تب، درد عضلانی، حالت تهوع، استفراغ و اسهال بوده و اگر شکل شدیدتر لیستریوز ایجاد شود، علائمی همچون سردرد، سفتی گردن، گیجی، از دست دادن تعادل و تشنج بروز پیدا می کند. حتی این باکتری در افراد بسیار جوان، افراد مسن و افرادی با سیستم ایمنی ضعیف می تواند منجر به مرگ شود (Senevirathne, ۲۰۱۰).

خشک کردن و کاهش آب

حرارت IR در فناوری خشک کردن استفاده می شود و کار و تحقیقات گسترده ای روی آن انجام شده است. در صنعت غذا انتظار می رود که استفاده از خشک کن IR جهت نشان دادن یک فرایند جدید برای تولید غذاهای خشک شده با کیفیت بالا و قیمت پایین کاربرد بیشتری پیدا کند (این کاربرد تکنولوژی اشعه IR برای غذاهای آبگیری شده دارای مزایای متعددی است که شامل کاهش زمان خشک کردن، منبع انرژی جایگزین، افزایش بهره وری انرژی، دمای یک دست در محصول در طول خشک کردن، کیفیت بهتر محصول تولید شده، درجه بالای پارامترهای کنترل فرایند و صرفه جویی در فضا به همراه تمیزی محیط کار عملیات خشک کردن در سال های اخیر موفقیت های چشمگیری جهت خشک کردن میوه و سبزیجات داشته است. خشک کردن جلبکهای دریایی، سبزیجات، تکه های ماهی و ماکارونی نیز در تونلهای خشک کن IR انجام شده است. خشک کردن IR در آنالیز غذا جهت اندازه گیری محتوای آب در محصولات غذایی کاربرد پیدا کرده است. به طور کلی مواد جامد در یک سطح نازک، اشعه IR را جذب می کنند. با این حال، اشعه به اعماق مواد متخلخل مرطوب نفوذ کرده و این انتقال بسنگی به محتوای رطوبتی دارد (Nachaisin, 2016). محاسبات تئوریک نشان می دهد که خشک کردن IR متناوب با انرژی ورودی m_2 10، معادل خشک کردن همرفتی است که در آن ضریب انتقال حرارت m_2 200 باشد.

موسوی و همکارانش (1395)، در تحقیقات خود اثر دما و روش خشک کردن بر پارامترهای سینتیکی برگه خرمالو به ضخامت 5 میلی متر را بررسی کردند. طبق نتایج به دست آمده بهترین مدل جهت برازش داده های خشک کردن هوای داغ در هر سه سطح دمایی، مدل ونگ و سینگ بود. برای داده های مربوط به خشک کردن توسط مادون قرمز در دو سطح دمایی 50 و 60 درجه سانتی گراد، مدل لگاریتمی و در دمای 70 درجه سانتی گراد، مدل دوجمله ای برازش مناسبی را نشان دادند. این مدل ها دارای بالاترین ضریب تبیین و کمترین مجذور میانگین مربعات خطا، کای مربع و مجموع مربعات خطا، نسبت به سایر مدل ها بودند.

در پژوهش دهقانی خیای (1399) اثر روش های مختلف خشک کردن (هوای داغ 45 درجه سانتی گراد و سرعت هوای 1 متر بر ثانیه، مایکروویو 540 وات، مادون قرمز 600 وات، هوای داغ 45 درجه سانتی گراد- مایکروویو 540 وات، هوای داغ 45 درجه سانتی گراد- مادون قرمز 600 وات و هوای داغ 45 درجه سانتی گراد- مایکروویو 540 وات- مادون قرمز 600 وات) بر خواص کیفی سیب زمینی (ضریب انتشار مؤثر رطوبت، بازجذب آب، چروکیدگی، رنگ و انرژی مصرفی) بررسی شدند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت مربوط به روش های ترکیبی هوای داغ- مایکروویو و هوای داغ- مایکروویو- مادون قرمز می باشد. همچنین روش هوای داغ- مایکروویو بیشترین میزان بازجذب آب و روش هوای داغ- مایکروویو- مادون قرمز کمترین میزان چروکیدگی را به خود اختصاص داد. از طرفی در بین روش های مختلف خشک کردن، سیب زمینی های خشک شده با روش هوای داغ- مادون قرمز رنگ بهتری نسبت به سایر نمونه ها داشتند. به طوری که در این روش نسبت به روش های دیگر میزان تغییرات رنگ (ΔE) و میزان رنگ سبز تا قرمز (a) در پایین ترین مقدار و میزان روشنایی (L) و میزان رنگ آبی تا زرد (b) در بالاترین مقدار قرار داشتند. همچنین کمترین انرژی مصرفی در بین روش های خشک کردن مربوط به مایکروویو 540 وات بود.

خشک کردن با مادون قرمز به طور مؤثری در محصولات غذایی مختلفی مانند هویج، سیب زمینی، قارچ و بادمجان به کار رفته است. با این حال، خشک کردن به تنهایی با مادون قرمز برای محصولات غذایی حساس به حرارت مناسب نیست، به همین دلیل معمولاً از روش های خشک کردن ترکیبی برای افزایش کارایی و کیفیت استفاده می شود. ترکیب تابش مادون قرمز با سایر روش های خشک کردن در جدول 1 خلاصه شده است.

جدول ۱- ترکیب حرارت دهی مادن قرمز با سایر روش های خشک کردن (دهقانی خیای ۱۳۹۹)

روش	محصولات غذایی
هوای داغ	برنج، چغندر، ماهی مرکب رنده شده، شلتوک، لونگان، فلفل سبز، توت مورتا، قارچ، سیب زمینی شیرین، کدو اسفنجی، نخود سبز، کیوی
خشک کردن وکیوم	انار، سیب زمینی، انگور، گوجی، لیمو، کدو تنبل، قارچ دکمه ای، گریپ فروت
ماکروویو	تمشک، فلفل سبز
پمپ هوای داغ	لونگان، سیب زمینی چینی، هویج بزرگ
فریزد رایر	موز، کوردیپس میلیتاریس، گلابی
ماکروویو و وکیوم	رزبری

از جدول ۱ مشخص است که تابش مادون قرمز به طور معمول برای کمک به خشک کردن با هوای داغ استفاده می شود. اگرچه گزارش های محدودی در مورد مقایسه خشک کردن با مادون قرمز به تنهایی و خشک کردن ترکیبی وجود دارد، اما برخی تحقیقات انجام شده است. به عنوان مثال، بوالوانگ، تیر وانیکا و تیر وانیکا (۲۰۱۳) روش های خشک کردن با هوای داغ (AD)، خشک کردن با مادون قرمز (IR) و خشک کردن ترکیبی مادون قرمز و هوای داغ (IR-AD) را بر روی برنج مقایسه کردند. آن ها دریافتند که زمان خشک کردن IR-AD کمی بیشتر از IR به تنهایی بود. هر دو قدرت خشک کردن IR در ۱۰۰۰ وات و ۱۵۰۰ وات میزان مصرف انرژی کمتری نسبت به IR-AD و AD نشان دادند، زیرا انرژی مادون قرمز می تواند به داخل ماده نفوذ کرده و به طور مستقیم به حرارت تبدیل شود و به این ترتیب، از روش خشک کردن با هوای داغ کارآمدتر است.

Antal و همکاران (۲۰۱۷) خشک کردن گلابی را با استفاده از خشک کردن انجمادی با مادون قرمز میکروویو (MIR-FD)، خشک کردن با مادون قرمز میکروویو (MIR) و خشک کردن انجمادی (FD) مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند که خشک کردن MIR سریع ترین روش بود و تنها ۲۰ دقیقه در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد طول کشید. در مقابل، خشک کردن MIR-FD بسیار کندتر بود و ۱۰۸۰ دقیقه تحت شرایط MIR (۴۰ درجه سانتی گراد) -FD طول کشید، اگرچه زمان خشک کردن را تا ۴۲.۹٪ در مقایسه با FD به تنهایی کاهش داد. این موضوع قابل درک است، زیرا خشک کردن FD به عنوان روشی با نرخ خشک کردن پایین شناخته می شود. در نتیجه، مصرف انرژی خاص خشک کردن MIR-FD به طور قابل توجهی بیشتر از خشک کردن MIR بود. با این حال، کیفیت غذایی خشک کردن MIR-FD بسیار نزدیک به نمونه های FD بود و به این ترتیب، بسیار بهتر از خشک کردن MIR بود. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که ترکیب تابش مادون قرمز با سایر روش های خشک کردن بسیار امیدوارکننده است، زیرا نه تنها نرخ خشک کردن را افزایش می دهد بلکه کیفیت غذا را نیز حفظ می کند.

غیر فعال سازی آنزیم ها

حرارت دهی IR می تواند بطور موثری برای غیر فعال سازی آنزیم ها استفاده شود. لیپوکسیژناز به عنوان آنزیم مسئول زوال سوپا، ۹۵/۵٪ آن در عرض ۶۰ ثانیه بوسیله اشعه IR غیر فعال می شود (واکنش های آنزیمی خاص شامل واکنش لیپازها، و آلفا آمیلازها در دمای ۳۰ تا ۴۰ درجه بوسیله اشعه IR تاثیر پذیرفته بودند). اشعه FIR به مدت ۶ دقیقه منجر به کاهش ۶۰٪ فعالیت لیپاز می شود در حالیکه روش هدایت حرارتی منجر به کاهش ۷۰٪ می شود. FIR بطور موفقیت آمیزی برای غیرفعال سازی آنزیم های مسئول رشد بدطعمی در نخود فرنگی قبل از فرایند انجماد استفاده شده است. Galindo و همکاران (۲۰۰۵) کاربرد حرارت دهی IR برای برش های هویج قبل از انجماد در مقایسه با بلانچ کردن از نظر سلول های هویج و آسیب بافتی آن را بررسی

کردند. برش های هوپچ حرارت دیده بوسیله اشعه IR تنها حاوی سلولهای آسیب دیده در نیم میلی متر اول سطح و ویژگیهای بافتی بافت خام را به نمایش گذاشته بود. (توسط Vishwanathan و همکاران (۲۰۱۳) بلانچینگ IR و خشک کردن با هوای داغ به کمک IR (بصورت ترکیبی) تکه های هوپچ بررسی شده بود و عملکرد آنها (زمان پردازش، حفظ ویتامین C و ویژگیهای آبرسانی) را با تکنیک های معمولی بلانچینگ و خشک کردن مقایسه شد. زمان مورد نیاز برای بلانچینگ تکه های هوپچ (با ضخامت ۱۰ میلی متر) با استفاده از هوای گرم، بخار آب و اشعه IR به ترتیب ۵ و ۳ و ۱۰ دقیقه بود. در مقایسه با بلانچینگ آب (۴۳٪) و بخار (۴۹٪)، حفظ ویتامین C محلول در آب با استفاده از روش بلانچینگ IR بالاترین (۶۳٪) بود. نمونه های بلانچ شده با IR که توسط تکنیک هیبرید خشک شده بودند حدود ۴۵٪ زمان کمتری در مقایسه با نمونه های بلانچ شده با آب و خشک شده با هوای داغ داشتند. Sabbaghi و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهش خود به بررسی حرارت دهی مرحله ای و کنترل کننده فازی دما طی پرتودهی مادون قرمز سیب با روش حرارت دهی متناوب پرداختند. بدین منظور، فرآیند بلانچینگ خشک و آبردایی همزمان برش های سیب در سه دمای ۷۰، ۷۵ و ۸۰ درجه سانتی گراد براساس غیرفعال سازی آنزیم پلی فنل اکسیداز یا PPO (شاخص سرعت بلانچینگ) و حفظ ویتامین C (شاخص ثبات کیفیت) مطالعه شد. نمونه ها از خشک کن مادون قرمز با فاصله زمانی ۲ دقیقه به منظور جداسازی اختصاصی زمان بلانچینگ خشک و آبردایی برش های سیب، خارج شدند. نتایج نشان داد که دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۵ دقیقه برای عملیات بلانچینگ و دمای ۷۰ درجه سانتی گراد برای عملیات آبردایی مناسب بود. نتایج شبیه سازی تایید کرد که مرتبه بالاتر تابع انتقال موجب پاسخ سریع تر شد، اما افزایش نوسانات و کاهش پایداری مطلوب نبود. امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز به عنوان یک منبع انرژی در فرآیند خشک شدن در شرایط خلا به کار می روند و تاکنون هیچ مقایسه ای بین این دو منبع انرژی در فرآیند خشک شدن محصولات کشاورزی انجام نشده است. در یک پژوهش تاثیر تابش امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز بر رفتار خشک کردن برش های هلو در شرایط خلا بررسی و مقایسه شد. خشک کردن نمونه ها در فشارهای مطلق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال و در درجه حرارت های ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس تحت هر دو منبع انرژی انجام شد. رفتار خشک شدن برش های هلو شامل اثر شرایط خشک کردن بر کاهش رطوبت، ضریب پخش رطوبت موثر، رنگ و چروکیدگی در خشک کن خلا- مادون قرمز مورد بررسی قرار گرفت. ضریب پخش رطوبت موثر برش های هلو تحت تاثیر امواج متوسط مادون قرمز نسبت به امواج کوتاه در شرایط مختلف خشک کردن بین ۱۱-۲۶× تا ۱۰-۱۰۴× مترمربع بر ثانیه بیشتر بود. تغییرات کلی رنگ و درصد چروکیدگی برش های هلو تحت تاثیر امواج کوتاه مادون قرمز نسبت به امواج متوسط در شرایط مختلف خشک کردن به ترتیب بین ۶.۶ تا ۸.۷٪ و ۷.۸٪ تا ۹.۷٪ کمتر بود. کمترین میزان تغییرات کلی رنگ برش های هلو تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز به ترتیب ۸.۲ و ۱۴.۸٪ حاصل شد. همچنین کمترین درصد چروکیدگی برش های هلو تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز به ترتیب ۴۶.۳٪ و ۵۵.۹٪ به دست آمد. (چایجان و علائی، ۱۳۹۵)

غیرفعال سازی پاتوزن ها

حرارت IR می تواند برای غیرفعالسازی باکتری، اسپور، مخمر و کپک در مواد غذایی مایع و جامد استفاده شود. اثر غیر فعال سازی میکروبی توسط حرارت دهی IR وابسته به پارامترهایی است که شامل: سطح قدرت IR، درجه حرارت نمونه غذایی، طول موج حداکثر و پهنای باند منبع حرارتی IR، عمق نمونه، نوع میکروارگانیسم، محتوای رطوبت، فاز فیزیولوژیکی میکروارگانیسم و نوع ماده غذایی است. شونودی و همکاران (۱۳۹۸)، پس از تعیین بیشینه ی جذب باسیلوس سرئوس (به عنوان یک شاخص غذازاد) با طیف سنجی مادون قرمز (FTIR)، تاثیر طول موج انتخابی مادون قرمز (۶.۲۶، ۰.۶ و ۰.۵ میکرومتر به ترتیب معادل با ۱۵۹۷، ۴۴، ۱۶۶۳، ۸۹ و ۱۷۳۶.۱۱ سانتی متر-۱)، فاصله از منبع تابش (۳، ۵ و ۷ سانتی متر)، مدت زمان تابش (۱۵، ۲۲ و ۳۰ دقیقه)، و ضخامت نمونه (۲، ۴ و ۶ میلی متر) بر جمعیت باسیلوس سرئوس در محیط کشت مایع به روش سطح پاسخ ارزیابی گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، معنی داری تاثیر تمام متغیرهای مورد مطالعه (به جز ضخامت نمونه) بر کاهش جمعیت باسیلوس سرئوس محرز شد. اثر متقابل طول موج تابش مادون قرمز با فاصله از منبع تابش و اثر متقابل فاصله از منبع تابش با مدت زمان تابش بر

کاهش جمعیت باکتری نیز مشهود بود. علاوه بر این، بیشترین کاهش جمعیت باسیلوس سرئوس (معادل ۳۴.۴ سیکل لگاریتمی) در تیمار حاصل از طول موج تابش ۵/۷۶ میکرومتر (معادل با ۱۷۳۶.۱۱ سانتی متر-۱)، فاصله از منبع تابش ۳ سانتی متر، مدت زمان تابش ۳۰ دقیقه، و ضخامت نمونه ۲ میلی متر مشاهده شده است. از نتایج این پژوهش می توان برای بهینه یابی فرایندهای صنعتی با هدف حذف باسیلوس سرئوس با تابش مادون قرمز استفاده کرد.

فناوری خشک کردن ترکیبی مادون قرمز-همرفتی

اگرچه خشک کردن IR یک روش جدید امیدوار کننده است اما این روش، علاج همه فرایندهای خشک کردن نیست، زیرا اگرچه این روش سریع است و حرارت را درون ماده تولید می کند تا ماده را خشک کند اما قدرت نفوذ آن محدود است و قرار گرفتن طولانی مدت مواد بیولوژیکی در معرض حرارت IR باعث تورم مواد و در نهایت شکسته شدن آنها می شود. در همین زمینه، Fasina و همکارانش (۲۰۰۱) نشان دادند که حرارت دهی IR به تنهایی خواص فیزیکی، شیمیایی و عملکردی دانه جو را تغییر می دهد و حرارت دهی مادون قرمز دانه های بقولات در ۱۴۰ درجه سانتیگراد باعث ترک خوردگی در سطح دانه ها می شود. به هر حال، استفاده از ترکیب حرارت دادن مادون قرمز متناوب و خشک کردن همرفتی پیوسته در مواد متخلخل ضخیم باعث بهترین کیفیت محصول و بهره وری بالاتر انرژی می شود. بنابراین اشعه IR می تواند به عنوان تیمار سطح، شبیه به دیگر تکنولوژی های تشعشعی در نظر گرفته شود. استفاده از ترکیب اشعه الکترومغناطیسی و حرارت همرفتی معمولی، کارآمدی بیشتری نسبت به حرارت همرفتی و یا اشعه ای به صورت جداگانه دارد و به عنوان اثر هم افزایی عمل می کند. امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز به عنوان یک منبع انرژی در فرآیند خشک شدن در شرایط خلأ مورد استفاده قرار می گیرند. تاکنون مقایسه ای بین این دو منبع انرژی در فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی انجام نشده است. در این تحقیق، تأثیر تابش امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز بر رفتار خشک کردن برش های هلو در شرایط خلأ بررسی و مقایسه شد. خشک کردن نمونه ها در فشارهای مطلق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال و در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس تحت هر دو منبع انرژی انجام شد. بررسی رفتار خشک شدن شامل اثر شرایط خشک کردن بر کاهش رطوبت، ضریب پخش رطوبت مؤثر، رنگ و چروکیدگی برش های هلو در خشک کن خلأ- مادون قرمز بود. ضریب پخش رطوبت مؤثر برش های هلو تحت تأثیر امواج متوسط مادون قرمز نسبت به امواج کوتاه در شرایط مختلف خشک کردن، بین ۱۰-۱.۴ تا ۱۰-۲.۶ مترمربع بر ثانیه بیشتر بود. همچنین، تغییرات کلی رنگ و درصد چروکیدگی برش های هلو تحت تأثیر امواج کوتاه مادون قرمز نسبت به امواج متوسط، به ترتیب بین ۶.۶ تا ۸.۷ و ۷.۸ تا ۹.۷ درصد کمتر بود. کمترین میزان تغییرات رنگ برش های هلو تحت امواج کوتاه و متوسط به ترتیب ۸.۲ و ۱۴.۸ ثبت شد. همچنین، کمترین درصد چروکیدگی برش های هلو تحت امواج کوتاه و متوسط به ترتیب ۴۶.۳ و ۵۵.۹ به دست آمد (Wang, ۲۰۱۴).

نتیجه گیری

حرارت دهی با استفاده از امواج مادون قرمز به عنوان یک روش نوین در صنایع غذایی به دلیل مزایای فراوانی که دارد، به سرعت در حال گسترش است. این روش به افزایش زمان ماندگاری مواد غذایی و حفظ کیفیت حسی و تغذیه ای آنها کمک می کند. با انتقال الکترومغناطیسی انرژی حرارتی و جذب آن توسط مواد غذایی، حرارت تولید می شود که این امر به بهبود فرایندهای مختلفی از جمله خشک کردن، پختن، کباب کردن، بلانچ کردن، پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون کمک می کند. ویژگی های بارز حرارت دهی مادون قرمز نظیر راندمان بالا، زمان فرآیند کوتاه و نفوذ مستقیم حرارت در محصولات، این امکان را فراهم می آورد که این روش به عنوان جایگزین یا مکملی برای روش های سنتی عمل کند. استفاده از امواج مادون قرمز دور به دلیل جذب گسترده اش توسط ترکیبات غذایی، باعث می شود که این فناوری در فرایندهای غذایی بسیار مؤثر واقع شود. در نهایت، می توان نتیجه گرفت که فناوری حرارت دهی مادون قرمز نه تنها به کاهش هزینه های اقتصادی در فرایندهای غذایی کمک می کند، بلکه به تسریع این فرایندها نیز می انجامد. این ویژگی ها نشان دهنده پتانسیل بالای این روش در بهبود کارایی و کیفیت محصولات غذایی است.

منابع

- شوندی، مهدی، کاشانی نژاد، مهدی، صادقی، علیرضا، جعفری، سیدمهدی، و حسینی، مهدیه. (۱۳۹۷). ارزیابی تابش انتخابی مادون قرمز بر غیر فعال سازی باسیلوس سرئوس به روش سطح پاسخ. تحقیقات مهندسی صنایع غذایی (مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی)، ۱۱(۱۷) (پیاپی ۶۴)، ۵۷-۷۰.
- موسوی بایگی، فرهنگ، تقی زاده، ضیافروغی، امین. (۲۰۱۵). مدل سازی خشک کردن لایه نازک خرمالو به دو روش هوای داغ و مادون قرمز. مجله علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۳(۵۳)، ۱۶۱-۱۷۱.
- دهقانی خیوی، هادی، خاکباز حشمتی، دهقان نیا، باغبان. (۲۰۲۰). کاربرد روش های هیبریدی (هوای داغ-مایکروویو-مادون قرمز) جهت خشک کردن سیب زمینی و مطالعه ویژگی های کیفی محصول خشک شده. پژوهش های صنایع غذایی، ۳۰(۲)، ۱۴۳-.
- Aktaş, M., Şevik, S., Amini, A., & Khanlari, A. (۲۰۱۶). Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. *Solar Energy*, ۱۳۷, ۵۰۰-۵۱۵.
- Alaei, B., & Amiri Chayjan, R. (۲۰۱۵). Drying characteristics of pomegranate arils under near infrared-vacuum conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, ۳۹(۵), ۴۶۹-۴۷۹.
- Antal, T., Tarek-Tilistyák, J., Cziáky, Z., & Sinka, L. (۲۰۱۷). Comparison of drying and quality characteristics of pear (*Pyrus communis* L.) using mid-infrared-freeze drying and single stage of freeze drying. *International Journal of Food Engineering*, ۱۳(۴), ۲۰۱۶-۲۹۴.
- Barzegar, M., Zare, D., & Stroshine, R. L. (۲۰۱۵). An integrated energy and quality approach to optimization of green peas drying in a hot air infrared-assisted vibratory bed dryer. *Journal of Food Engineering*, ۱۶۶, ۳۰۲-۳۱۵.
- Delfiya, D. A., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V., Samuel, M. P., & Pandiselvam, R. (۲۰۲۲). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*, ۴۵(۶), e۱۳۸۱۰.
- Dos Santos, C. A. T., Lopo, M., Páscoa, R. N., & Lopes, J. A. (۲۰۱۳). A review on the applications of portable near-infrared spectrometers in the agro-food industry. *Applied spectroscopy*, ۶۷(۱۱), ۱۲۱۵-۱۲۳۳.
- Fasina, O., Tyler, B., Pickard, M., Zheng, G. H., & Wang, N. (۲۰۰۱). Effect of infrared heating on the properties of legume seeds. *International journal of food science & technology*, ۳۶(۱), ۷۹-۹۰.
- Ghaboos, S. H. H., Ardabili, S. M. S., Kashaninejad, M., Asadi, G., & Aalami, M. (۲۰۱۶). Combined infrared-vacuum drying of pumpkin slices. *Journal of food science and technology*, ۵۳, ۲۳۸۰-۲۳۸۸.
- Jain, D., & Pathare, P. B. (۲۰۰۴). Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices. *Biosystems Engineering*, ۸۹(۳), ۲۸۹-۲۹۶.
- Krishnamurthy, K., Khurana, H. K., Soojin, J., Irudayaraj, J., & Demirci, A. (۲۰۰۸). Infrared heating in food processing: an overview. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, ۷(۱), ۲-۱۳.
- Nathakaranakule, A., Jaiboon, P., & Soponronnarit, S. (۲۰۱۰). Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Journal of Food Engineering*, ۱۰۰(۴), ۶۶۲-۶۶۸.
- Nachaisin, M., Jamradloedluk, J., & Niamnuy, C. (۲۰۱۶). Application of combined far-infrared radiation and air convection for drying of instant germinated brown rice. *Journal of Food Process Engineering*, ۳۹(۳), ۳۰۶-۳۱۸.
- Özdemir, M. B., Aktaş, M., Şevik, S., & Khanlari, A. (۲۰۱۷). Modeling of a convective-infrared kiwifruit drying process. *International Journal of Hydrogen Energy*, ۴۲(۲۸), ۱۸۰۰۵-۱۸۰۱۳.
- Pawar, S. B., & Pratape, V. M. (۲۰۱۷). Fundamentals of infrared heating and its application in drying of food materials: A review. *Journal of food process engineering*, ۴۰(۱), e۱۲۳۰۸.
- Roknul, A. S., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Wang, Y. (۲۰۱۴). A comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (*Lactuca sativa* L.). *Drying Technology*, ۳۲(۶), ۶۵۷-۶۶۶.
- Sabbaghi, H., Ziiaifar, A.M., an Kashani-Nejad, M. ۲۰۲۱. Simulation of temperature fuzzy controller during infrared dry blanching and dehydration of apple slices by intermittent heating method. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, ۱۶(۶), ۱۳۳-۱۵۰.
- Salehi, F., & Kashaninejad, M. (۲۰۱۸). Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying. *Information processing in Agriculture*, ۵(۴), ۵۱۶-۵۲۳.
- Senevirathne, M., Kim, S. H., Kim, Y. D., Oh, C. K., Oh, M. C., Ahn, C. B., ... & Jeon, Y. J. (۲۰۱۰). Effect of far-infrared radiation drying of citrus press-cakes on free radical scavenging and antioxidant activities. *Journal of Food Engineering*, ۹۷(۲), ۱۶۸-۱۷۶.
- Wang, L., Zhang, M., Fang, Z., & Xu, B. (۲۰۱۴). Application of intermediate-wave infrared drying in preparation of mushroom chewing tablets. *Drying Technology*, ۳۲(۱۵), ۱۸۲۰-۱۸۲۷.
- Zhang, Y., Zhu, G., Li, X., Zhao, Y., Lei, D., Ding, G., ... & Liu, Y. (۲۰۲۰). Combined medium-and short-wave infrared and hot air impingement drying of sponge gourd (*Luffa cylindrical*) slices. *Journal of Food Engineering*, ۲۸۴, ۱۱۰۰۴۳.

Application of infrared technology in food industry

Donya Hosseini^۱

B. Sc. Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture and Animal Science,
University of Torbat-e Jam, Torbat-e Jam, Razavi Khorasan Province, Iran

Hassan Sabbaghi

Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture and Animal
Science, University of Torbat-e Jam, Torbat-e Jam, Razavi Khorasan Province, Iran

Abstract

Infrared heating is one of the modern methods in the food industry that is increasingly expanding due to its advantages, including extended shelf life of food products and preservation of sensory and nutritional quality. In this method, thermal energy is transferred electromagnetically and absorbed by food materials, generating heat. Applications of this technology include drying, baking, roasting, blanching, pasteurization, and sterilization. Infrared heating, due to its characteristics such as high efficiency, short processing time, and direct heat penetration into the product, can effectively replace or complement traditional methods. Infrared waves are classified into three categories: near, mid, and far infrared. In food processing, far-infrared waves are predominantly used, as most food components absorb radiation from this spectrum. Overall, the application of infrared heating technology helps reduce economic costs and accelerate food processing.

Keywords: Infrared, Food industry, Quality, Heating, Food processing

^۱-Corresponding Author