مقاله علمی پژوهشی/ نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی/ جلد ۳۲ شماره ۲/ سال ۱۴۰۱/ صفحات ۷۳ تا ۸۷
DOI: 10.22034/FR.2022.45628.1791

مقایسه تأثیر روش خشک‌کردن (هوای گرم، مایکروویو، هوای گرم-مایکروویو، مایکروویو-هوای گرم) بر سینتیک خشک‌شدن فوم بروکلی

مریم عطائی[۱]، مریم خاکباز حشمتی[۲*]، جلال دهقان‌نیا[۳] و سعید داداشی[۲]

تاریخ دریافت: ۴۰۰/۲/۳ تاریخ پذیرش: ۴۰۰/۳/۱۷

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
[۲] استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
[۳] استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
*مسئول مکاتبه: Email: m.khakbazheshmati@tabrizu.ac.ir

چکیده

زمینه مطالعاتی: بروکلی منبع غنی مواد معدنی، تأمین‌کننده ویتامین‌ها و منبع اصلی آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی است. با توجه به فسادپذیری بالای بروکلی، جلوگیری از فساد آن برای حفظ ترکیبات زیست‌فعال حیاتی می‌باشد. خشک‌کردن روشی است که برای افزایش عمر ماندگاری محصولات غذایی کاربرد بسیاری دارد. **هدف**: هدف از این پژوهش بررسی اثر روش خشک‌کردن (هوای گرم کنوکسیونی، مایکروویو، هوای گرم-مایکروویو، مایکروویو-هوای گرم) بر پارامترهای سینتیک خشک‌کردن (محتوای و نسبت رطوبت، نرخ و زمان خشک‌کردن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی) فوم پالپ کلم بروکلی است. **روش کار**: فوم از ۳ درصد (وزنی/وزنی) سفیده تخم مرغ به عنوان عامل فوم‌ساز و ۰/۵ درصد (وزنی/وزنی) محلول متیل سلولز به عنوان پایدارکننده کف تهیه شد. فوم بروکلی (ضخامت ۵ میلی‌متر) با استفاده از روش‌های هوای گرم (دمای ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت ۱ متر بر ثانیه)، مایکروویو (۹۰ وات)، مایکروویو-هوای گرم و هوای گرم-مایکروویو با همان دما و توان روش تکی، تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد. **نتایج**: ترکیب روش مایکروویو و هوای گرم (در هر دو شکل پیش‌تیمار و پس‌تیمار) نسبت به روش مایکروویو به تنهایی، موجب کاهش ضریب انتشار مؤثر و نرخ خشک‌کردن و افزایش انرژی مصرفی گردید. میانگین محتوا و نسبت رطوبت نیز تحت تأثیر روش خشک‌کردن و نحوه ترکیب مایکروویو و هوای گرم قرار گرفت؛ به این صورت که در روش خشک‌کردن مایکروویو-هوای گرم، میانگین محتوا و نسبت رطوبت در مقایسه با روش مایکروویو و هوای گرم به تنهایی، بیشتر بود اما میانگین محتوا و نسبت رطوبت در روش خشک‌کردن هوای گرم-مایکروویو، کمترین مقدار بین چهار روش دیگر را داشت. **نتیجه گیری نهایی**: بر اساس کمترین میزان مصرف انرژی، زمان فرایند، میانگین محتوا و نسبت رطوبت و نیز بیشترین میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت و نرخ خشک‌شدن، روش مایکروویو با میزان مطلوبیت ۰/۸۸ و پس از آن روش هوای گرم-مایکروویو با میزان مطلوبیت ۰/۷ روش بهینه برای خشک‌کردن فوم بروکلی شناخته شدند.

واژگان کلیدی: بروکلی، فوم‌مت، کنوکسیون، مایکروویو، هوای گرم

مقدمه

بروکلی یک سبزی از خانواده‌ی کلم‌هاست که به عنوان یک غذای سالم شناخته شده است که منبع غنی از مواد مغذی مانند آمینواسیدها، ویتامین‌ها، مواد معدنی ضروری و فیبر خوراکی محسوب می‌شود (چائو و همکاران ۲۰۲۰). هم‌چنین بروکلی یکی از بزرگترین منابع ترکیبات زیست فعال مثل سولفورافون‌ها، فولات، ویتامین ث و ترکیبات فنولی است (لیو و همکاران ۲۰۱۹). به دلیل اینکه بروکلی تازه محتوای رطوبت بالایی دارد، بسیار فاسد شدنی است و معمولاً در طول مدت نگه‌داری دچار مشکلاتی مثل نرم شدن، زردشدن و تخریب مواد مغذی می‌شود (لیو و همکاران ۲۰۱۹). خشک‌کردن یک فرآیند مهم برای افزایش مدت ماندگاریِ محصولات غذایی و کاهش جرم آنها برای نقل و انتقال می‌باشد. فعالیت آبی کم از رشد میکروبی، واکنش‌های آنزیمی و دیگر واکنش‌های تخریب‌کننده جلوگیری می‌کند(جین و همکاران ۲۰۱٤). خشک‌کردن کنوکسیونی قدیمی‌ترین روش خشک‌کردن است اما به دلیل هدایت حرارتی پایین مواد غذایی، مشکلاتی مانند مصرف بالای انرژی و زمان طولانی فرآیند دارد (دهقانی خیاوی و همکاران ۱۳۹۹). زمانی که محصولات بیولوژیکی تحت دمای بالا و به مدت طولانی خشک شوند کیفیت آن‌ها افت پیدا می‌کند؛ بنابراین تکنیک‌های جدیدی توسعه داده شده‌اند که محصولی با کیفیت بالا ارائه می‌دهند و کارایی انرژی بهتری دارند (سلیم و همکاران ۲۰۱٦). روش خشک‌کردن فوم‌مت در دهه ٦۰ میلادی توسعه یافت این روش شامل مخلوط کردن پالپ یا آبِ میوه و سبزی‌ها با یک عامل فوم‌ساز و یک پایدارکننده‌ی فوم برای تهیه‌ی فومی پایدار است که روی سینی پخش و خشک می‌شود سپس محصول خشک‌شده آسیاب می‌شود تا محصولِ پودرشده به دست آید. در این تکنیک به دلیل سطح زیاد توسعه‌یافته، نرخ خشک‌کردن بالاست (دکاروالو و همکاران ۲۰۱۷). عموماً هوای گرم به عنوان محیط خشک‌کردن روش فوم‌مت انتخاب‌می‌شود، هرچند عیب این روش خشک‌کردن انتقال گرمای ضعیفِ از هوای اطراف به فوم است (ژنگ و همکاران ۲۰۱۱). گرمایش مایکروویو با ویژگی تولید گرمای حجمی داخل ماده، می‌تواند این محدودیت را ازبین ببرد. انرژی مایکروویو می‌تواند مستقیماً به پالپ فوم‌شده نفوذ کرده و رطوبت داخل فوم را تبخیر نماید؛ بخارهایی که به طور پیوسته تولید می‌شوند، حباب‌های فوم را تحریک‌کرده و سطح تبخیر را توسعه‌می‌دهند و در نتیجه فرآیند خشک‌کردن را بیش از پیش سرعت می‌بخشند (ژنگ و همکاران ۲۰۱۱). برای بهبود کیفیت محصولات خشک‌شده با مایکروویو، استراتژی‌های زیادی مانند ترکیب مایکروویو و هوای گرم، خشک‌کردن متناوب و خشک‌کردن مایکروویو و خلأ وجود دارد. ترکیب مایکروویو و هوای گرم به‌طور موفقیت‌آمیزی برای تعدادی از محصولات کشاورزی مانند سیر، انگور، هویج، کیوی و بلوبری‌ها استفاده‌شده است. ترکیب این دو روش، زمان خشک‌کردن کوتاه‌تری نسبت به هوای گرم به تنهایی داشته، به علاوه نمونه نهایی کیفیت بالاتری خواهد داشت (کرمانی و همکاران ۲۰۱٦). با توجه به مطالب ذکر شده تا کنون پژوهشی در رابطه با خشک‌کردن بروکلی با استفاده از روش فوم‌مت و ترکیب آن با مایکروویو و هوای گرم انجام نشده است، بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی اثر روش‌های مایکروویو، هوای گرم و نیز ترکیب این روش‌ها برای خشک‌کردن فوم کلم بروکلی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

کلم بروکلی

کلم بروکلی (*Brassica oleracea var. italica*) از بازار محلی شهر تبریز واقع در استان آذربایجان‌شرقی تهیه شد. ابتدا آلودگی‌های سطحی بروکلی به وسیله‌ی آب‌کشی با آب شهری پاک شد. سپس جهت آنزیم‌بری گل‌ها و ساقه‌ی بروکلی به اندازه‌ی تکه‌های ۱ سانتی‌متری برش داده‌شدند و در آب جوش به مدت ٤ دقیقه نگه‌داری و بلافاصله در آب یخ به مدت ٥ دقیقه سرد شدند (مونیاکا و همکاران ۲۰۱۰). سپس ساقه و گل‌های آنزیم‌بری شده

در یک مخلوط‌کن خانگی تبدیل به پالپ شدند و در دمای منفی ۱۸ درجه سلسیوس نگهداری شدند.

عوامل فوم‌ساز و پایدار کننده

پودر سفیده‌ی تخم مرغ به عنوان عامل فوم‌ساز (ساخت شرکت آیلین مهر، کد CN) در غلظت ۳ درصد استفاده شد. متیل سلولز نیز به عنوان عامل پایدارکننده‌ی فوم (ساخت شرک سیگما آلدریچ، مدل M0512-100G) تهیه‌شد. برای استفاده از پایدارکننده باید محلول ۵ درصد متیل‌سلولز تهیه می‌شد بدین صورت که ۵ گرم متیل‌سلولز به آرامی و در طول مدت ٤٥ دقیقه به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب ۹۰ درجه سلسیوس اضافه می‌شد، در حالی که محلول با سرعت ۱۲۰۰ دور در دقیقه در حال هم‌زنی بود. بعد از تهیه‌ی محلول دمای آن تا ۵ درجه سلسیوس پایین آورده شد و برای حلالیت و شفافیت بیشتر، محلول به مدت ٢٤ ساعت در یخچال نگهداری شد (دهقان‌نیا و همکاران ۲۰۱۸ (الف)).

تهیه فوم و خشک‌کردن آن

جهت تهیه‌ی فوم ابتدا ۵/۵ گرم از محلول ۵ درصد متیل سلولز (وزن خالص: ۰/۲۷۵ گرم) برای تهیه‌ی غلظت ۰/۵ درصد (وزنی/وزنی) متیل‌سلولز و همچنین ۱/٦٥ گرم سفیده‌ی تخم‌مرغ به عنوان عامل ایجاد کننده‌ی کف برای تهیه‌ی غلظت ۳ درصد (وزنی/وزنی) توسط پالپ بروکلی روی یک ترازوی دیجیتال به وزن ٥٥ گرم رسانده شد. ترکیب حاصل در یک بشر یک لیتری پلاستیکی توسط همزن الکتریکی (Moulinex مدل HM-615 ، توان ٥٠٠ وات) به مدت ۱۰ دقیقه هم‌زده شد تا کف حاصل شود. کف حاصله به ضخامت ۵ میلی‌متر در پلیت‌های شیشه‌ای گسترده شد. برای خشک‌کردن فوم بروکلی از یک خشک‌کن مایکروویو (LG solarDom مدل SD-3855SCR ساخت کره‌جنوبی) که قابلیت هوای گرم نیز داشت، استفاده شد. فوم بروکلی به ٤ روش خشک‌شد. روش اول (CHA): هوای ٤٠ درجه سلسیوس با سرعت ۱ متر بر ثانیه که نمونه‌ها هر ۱۰ دقیقه یکبار وزن می‌شدند. روش دوم (MW[2]): خشک‌کردن مایکروویو در توان ۹۰ وات که نمونه‌ها هر دو دقیقه یکبار وزن می‌شدند. روش سوم (MW-CHA[3]): خشک‌کردن ترکیبی مایکروویو–هوای گرم بود. زمانی که نسبت رطوبت نمونه‌ها به ۰/٤–۰/۳٥ می‌رسید مایکروویو خاموش می‌شد و ادامه خشک‌کردن فقط با جریان هوا صورت می‌گرفت. روش چهارم(CHA-MW[4]): خشک‌کردن ترکیبی هوای گرم–مایکروویو بود. زمانی که نسبت رطوبت نمونه‌ها به ۰/٤– ۰/۳٥ می‌رسید، جریان هوا قطع و مایکروویو روشن می‌شد.

آنالیز سینتیک خشک‌کردن

محتوای رطوبت

کاهش محتوای رطوبت فوم بر مبنای خشک، در برابر زمان خشک‌کردن رسم‌شد و تأثیر هر ٤ روش خشک‌کردن بر آن مورد بررسی قرار گرفت.

نسبت رطوبت

نسبت رطوبت با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد که در آن، M_tمحتوای رطوبت بر مبنای خشک در هر زمان t (گرم آب بر گرم ماده خشک)، M_0 محتوای رطوبت اولیه بر مبنای خشک و M_e محتوای رطوبت تعادلی است به دلیل ناچیز بودن در مقایسه با M و M_0 نادیده گرفته شد (دهقان‌نیا و همکاران ۲۰۱۹).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \qquad \{۱\}$$

نرخ خشک‌کردن

نرخ خشک‌کردن از طریق رابطه‌ی زیر به دست آمد (جو و همکاران ۲۰۱۵):

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \qquad \{۲\}$$

که در آن، $M_{t+\Delta t}$ محتوای رطوبت (گرم آب بر گرم ماده خشک) در زمان $t + \Delta t$ ، t زمان بر حسب دقیقه و Δt اختلاف زمانی بر حسب دقیقه است.

[1] Convective Hot Air
[2] Microwave
[3] Microwave-Convective Hot Air
[4] Convective Hot Air-Microwave

ضریب انتشار مؤثر رطوبت

در سراسر فرآیند خشک‌کردن انتشار پدیده‌ی غالب انتقال رطوبت از مرکز به سطح فوم است، بنابراین حذف رطوبت بر اساس قانون دوم فیک، طبق رابطه‌ی زیر {۳} که به نام معادله‌ی کرنک شناخته می‌شود، محاسبه شد (جو و همکاران ۲۰۱۵):

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}exp\left(\frac{-(2n+1)^2\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right)t$$

که در آن MR نسبت رطوبت، D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت (مترمربع بر ثانیه) و L ضخامت فوم (متر) و t زمان فرآیند خشک‌کردن (ثانیه) می‌باشد.

برای زمان‌های طولانی خشک‌کردن فقط جمله‌ی اول این سری درنظر گرفته می‌شود و معادله‌ی بالا به صورت زیر ساده می‌شود (جو و همکاران ۲۰۱۵):

$$MR = \frac{8}{\pi^2}exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right)t \qquad \{٤\}$$

با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفیت معادله داریم:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) + \left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right)t \qquad \{٥\}$$

حال می‌توان ضریب انتشار مؤثر رطوبت را از طریق شیب خط لگاریتم طبیعیِ نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک‌کردن محاسبه کرد:

$$slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \qquad \{٦\}$$

$$D_{eff} = \frac{slope \times 4L^2}{\pi^2} \qquad \{٧\}$$

انرژی مصرفی خشک‌کردن مایکروویو

مصرف انرژی در روش خشک‌کردن با استفاده از مایکروویو به صورت زیر به دست آمد (دهقان‌نیا و همکاران ۲۰۱۸ (ب)):

$$E_{Mic} = \frac{P_{Mic}t_{Mic}}{PR \times m_{Mic}} \qquad \{٨\}$$

که E_{Mic} مصرف انرژی ویژه در مایکروویو (کیلوژول بر کیلوگرم آب خارج شده)، P_{Mic} توان مایکروویو (وات)، t_{Mic} زمان خشک‌کردن نمونه با مایکروویو (ثانیه)، PR نسبت پالسی و m_{Mic} میزان رطوبت خارج شده از نمونه در خشک کردن با مایکروویو (کیلوگرم) می‌باشد.

هوای گرم

مصرف انرژی در روش خشک‌کردن با استفاده از هوای گرم به صورت زیر محاسبه شد (دهقان‌نیا و همکاران ۲۰۱۸ (ب)):

$$E_{HA} = \frac{AV_a\rho_a\Delta H t_{HA}}{m_{HA}} \qquad \{٩\}$$

$$\Delta H = (C_{p,a} + WC_{p,v})(T_{in} - T_{amb}) + W\lambda \qquad \{١٠\}$$

که در آن، E_{HA} مصرف انرژی ویژه در خشک‌کن هوای گرم (کیلوژول بر کیلوگرم آب خارج شده)، A مساحت ظرف نمونه (متر مربع)، V_a سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)، ρ_a دانسیته توده‌ای هوا (کیلوگرم بر متر مکعب)، ΔH آنتالپی هوا (کیلوژول بر کیلوگرم هوای خشک)، t_{HA} زمان خشک‌کردن نمونه با هوای گرم (ثانیه)، m_{HA} میزان رطوبت خارج شده از نمونه در خشک‌کردن با هوای گرم (کیلوگرم)، $C_{p,a}$ گرمای ویژه هوا (کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)، W رطوبت مطلق هوا (کیلوگرم بخار آب بر کیلوگرم هوای خشک)، $C_{p,v}$ گرمای ویژه بخار آب (کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)، T_{in} دمای داخل خشک‌کن (درجه سلسیوس)، T_{amb} دمای هوای محیط اطراف (درجه سلسیوس) و λ گرمای نهان تبخیر آب (کیلوژول بر کیلو گرم بخار آب) می‌باشد.

ترکیب هوای گرم و مایکروویو

مصرف انرژی در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم و مایکروویو به صورت زیر محاسبه شد (دهقان‌نیا و همکاران ۲۰۱۸ (ب)):

$$E_{HA-Mic} = E_{HA} + E_{Mic} \qquad \{١١\}$$

تجزیه تحلیل آماری

این پژوهش در قالب یک طرح "کاملاً تصادفی" و با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۵ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تمام آزمون‌ها در سه تکرار انجام شد و برای مقایسه میانگین ویژگی‌های مختلف از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵ ٪ استفاه شد.

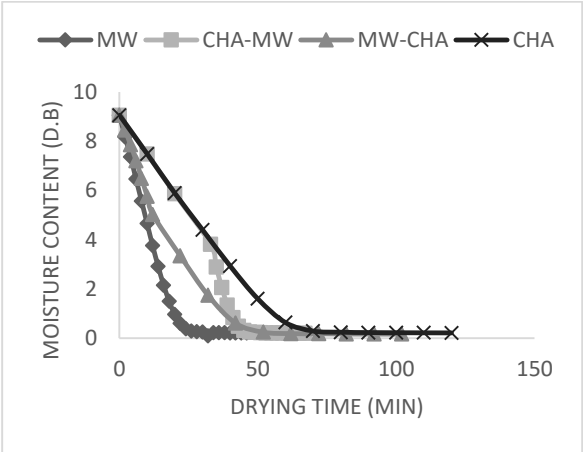
بهینه‌سازی

انتخاب روش بهینه جهت خشک‌کردن فوم بروکلی توسط نرم‌افزار Design Expert ورژن ۱۱ انجام شد.

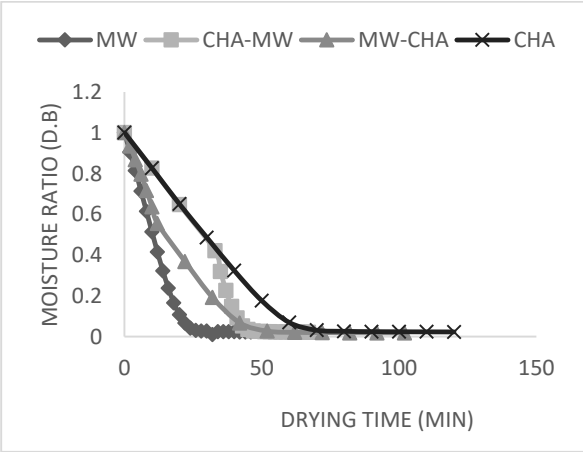
نتایج و بحث

محتوای رطوبت و نسبت رطوبت

با توجه به شکل ۱ تأثیر روش‌های هوای گرم (٤٠ درجه سلسیوس با سرعت ۱ متر بر ثانیه)، مایکروویو (توان ۹۰ وات)، مایکروویو–هوای گرم و هوای گرم–مایکروویو بر تغییرات میانگین محتوای رطوبت و نسبت رطوبت فوم بروکلی با غلظت ۳ درصد سفیده‌ی تخم مرغ نشان داده شده است. کمترین شیب کاهش محتوای رطوبت مربوط به هوای ٤٠ درجه سلسیوس و بیشترین شیب مربوط به توان ۹۰ وات مایکروویو بود. روش‌های پیش‌تیمار و پس‌تیمار مایکروویو برای هوای گرم نیز دارای میانگین سرعت کاهش رطوبت دو روش هوای گرم و مایکروویو هستند. هر چند با توجه به شکل مشاهده می‌شود که استفاده از هوای گرم به عنوان پیش‌تیمار برای مایکروویو (CHA-MW) موجب می‌شود که نمونه‌ها زودتر به رطوبت نهایی برسند. این مطلب می‌تواند تأثیر مناسب تیمار مایکروویو در انتهای فرآیند را نشان دهد (در واقع در این شرایط از ویژگی‌های مطلوب هر دو روش بهتر استفاده می‌شود). دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۸ (ب)) بیان کردند که با استفاده از انرژی مایکروویو در پایان فرایند خشک‌کردن (در طول دوره خشک‌شدن نزولی یا در رطوبت کم)، به‌دلیل خروج بخار، از چروکیدگی ساختار و بافت ماده غذایی جلوگیری می‌شود. در واقع استفاده از انرژی مایکروویو در آخرین مرحله خشک‌کردن می‌تواند در برداشتن آب پیوسته از محصول بسیار مؤثر باشد. طبق نتایج آنالیز آماری جدول ۱، بین میانگین محتوای رطوبت و نسبت رطوبت فوم بروکلی در همه ٤ روش خشک‌کردن تفاوت معنی‌دار وجود داشت (در سطح احتمال ٥ درصد). کمترین محتوای رطوبت و نسبت رطوبت مربوط به روش هوای گرم–مایکروویو (CHA-MW) و بیشترین مربوط به روش مایکروویو–هوای گرم (MW-CHA) بود.



الف)



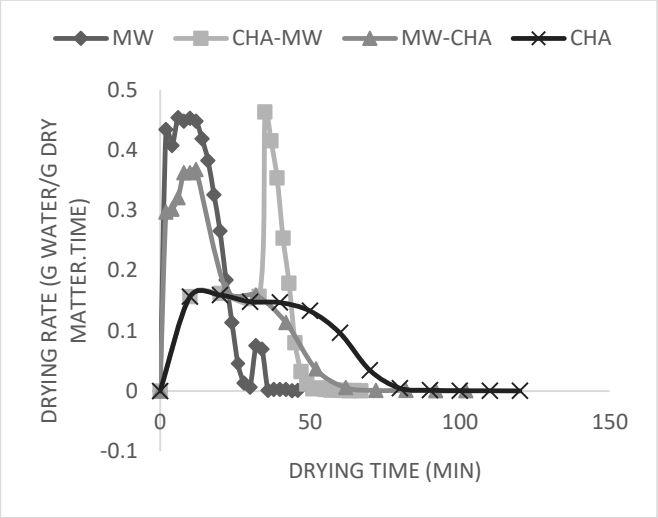
ب)

شکل ۱- تأثیر روش‌های مختلف خشک‌کردن (مایکروویو، هوای گرم–مایکروویو، مایکروویو–هوای گرم، هوای گرم) بر الف) تغییرات محتوای رطوبت و ب) نسبت رطوبت فوم بروکلی حین زمان خشک شدن

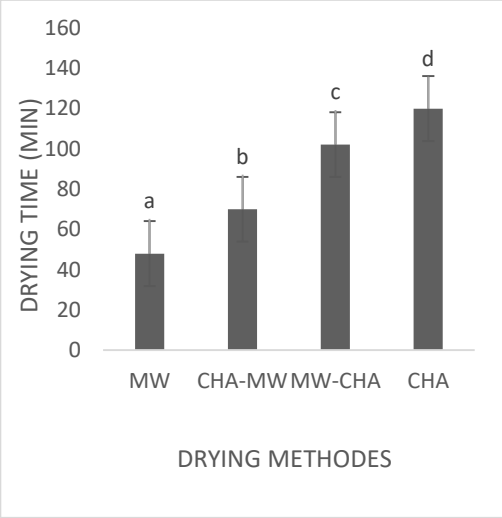
Figure 1- Effect of drying methods (microwave, convective-microwave, microwave-convective, hot air convective) on A) moisture content and B) moisture ratio of broccoli foam during drying time

نرخ خشک‌کردن و زمان خشک‌کردن

در شکل ۲ تأثیر روش‌های خشک‌کردن هوای گرم (هوای۴۰ درجه سلسیوس با سرعت ۱ متر بر ثانیه)، مایکروویو (توان ۹۰ وات)، مایکروویو–هوای گرم (MW-CHA) و هوای گرم– مایکروویو (CHA-MW) بر تغییرات میانگین نرخ خشک‌کردن و زمان خشک‌کردن فوم بروکلی با غلظت ۳ درصد سفیده تخم مرغ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در روش هوای گرم، جریان هوا در ابتدای فرایند منجر به کاهش رطوبت سطح می‌شود و با افزایش زمان خشک شدن، رطوبت به طور مداوم کاهش می‌یابد که باعث ایجاد پدیده سخت شدن سطحی می‌گردد. این پدیده خروج رطوبت از محصول را کند نموده و سرعت خشک شدن را کاهش می‌دهد. لذا همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، کندترین نرخ خشک‌شدن مربوط به هوای گرم است (۰/۰۷۵ گرم آب/گرم ماده خشک بر دقیقه). در روش مایکروویو در مراحل اولیه خشک‌کردن، نمونه‌ها دارای رطوبت بالایی هستند. رطوبت بالا دلیل اصلی گرمایش حجمی در روش مایکروویو است، به این صورت که مولکول‌های دو قطبی بخش قابل‌توجهی از انرژی مایکروویو را جذب کرده و منجر به افزایش دمای محصول و انتقال سریع رطوبت به سطح می‌شوند. جریان بخار آب از قسمت‌های داخلی به سمت سطح محصول، باعث ایجاد یک ساختار متخلخل شده و در نتیجه رطوبت سریع‌تر تبخیر می‌شود و در نهایت سرعت خشک‌کردن افزایش می‌یابد. گذشت زمان و کاهش رطوبت موجود در محصول، باعث کاهش جذب توان مایکروویو شده و با پیشرفت فرایند خشک‌شدن، منجر به افت سرعت خشک‌شدن می‌شود (بالاترین نرخ خشک‌شدن برابر با ۰/۱۹۶۶ گرم آب/گرم ماده خشک بر دقیقه). در مقایسه روش‌های ترکیبی خشک‌کردن، به دلیل جلوگیری از پدیده خشک‌شدن سطحی در روش مایکروویو–هوای گرم (MW-CHA)، این روش نسبت به روش هوای گرم–مایکروویو (CHA-MW) و هوای گرم به تنهایی، نرخ خشک‌کردن بالاتری دارد (۰/۱۸۰۳ گرم آب/گرم ماده خشک بر دقیقه). خاکباز حشمتی و سیفی مقدم (۱۳۹۶) نیز تکنیک متناوب هوای گرم–مایکروویو را بر خواص کیفی و تغذیه‌ای برگه‌های کیوی مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند زمان خشک‌کردن برگه‌های کیوی با استفاده از مایکروویو به عنوان پیش‌تیمار کاهش یافت. همان‌طور که در شکل مشهود است، پیک نرخ خشک‌شدن در روش MW-CHA به دلیل پیش‌تیمار مایکروویو، در ابتدای فرایند و پیک نرخ خشک‌شدن روش CHA-MW در میانه فرایند، همزمان با آغاز فرایند پس‌تیمار مایکروویو می‌باشد. با مقایسه نمودارهای این شکل، در هیچ کدام از این ٤ روش دوره سرعت ثابت مشاهده نشد که به دلیل ماهیت هیگروسکوپی این مواد است. در واقع در این نمودارها یک دوره افزایش سرعت و سپس یک دوره سرعت نزولی مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد، فرایند خشک‌شدن در مرحله سرعت نزولی اتفاق می‌افتد. مشابه این روند برای روش خشک‌کردن برگ زیتون (الحسین و شاهین ۲۰۱۸)، کدو تنبل (مونتریو و همکاران ۲۰۱۸)، سیب (دهقان‌نیا و همکاران ۲۰۱۸ (د))، میوه "به" دهقان‌نیا و همکاران ۲۰۱۸ (ب)) و قارچ خوراکی دکمه‌ای (داس و آرورا ۲۰۱۸) گزارش شده‌است. با توجه به جدول ۱ میانگین نرخ خشک‌کردن تمامی روش‌ها با هم در سطح احتمال ٥ درصد تفاوت معنی‌دار داشتند و میانگین زمان خشک‌کردن به ترتیب از کم به زیاد مربوط به روش مایکروویو (٤٨ دقیقه)، هوای گرم–مایکروویو (۷۰ دقیقه)، مایکروویو–هوای گرم (۱۰۲/۱٦ دقیقه) و هوای گرم (۱۲۰ دقیقه) بود. در تأیید نتایج این پژوهش، ژائو و همکاران (۲۰۱٤) نیز مشاهده کردند زمان خشک‌کردن اسلایس‌های هویج به‌ترتیب از کم به زیاد مربوط به روش‌های مایکروویو، ترکیب هوای گرم – مایکروویو، ترکیب مایکروویو – هوای گرم و هوای گرم بود.



الف)



ب)

شکل ۲- تأثیر روش‌های خشک‌کردن (مایکروویو، هوای گرم–مایکروویو، مایکروویو–هوای گرم، هوای گرم) بر الف) تغییرات نرخ خشک‌کردن فوم بروکلی حین زمان خشک‌شدن و ب) زمان خشک‌کردن

Figure 2- Effect of drying methods (microwave, convective-microwave, microwave-convective, hot air convective) on A) drying rate of broccoli foam during drying and B) drying time of different methods

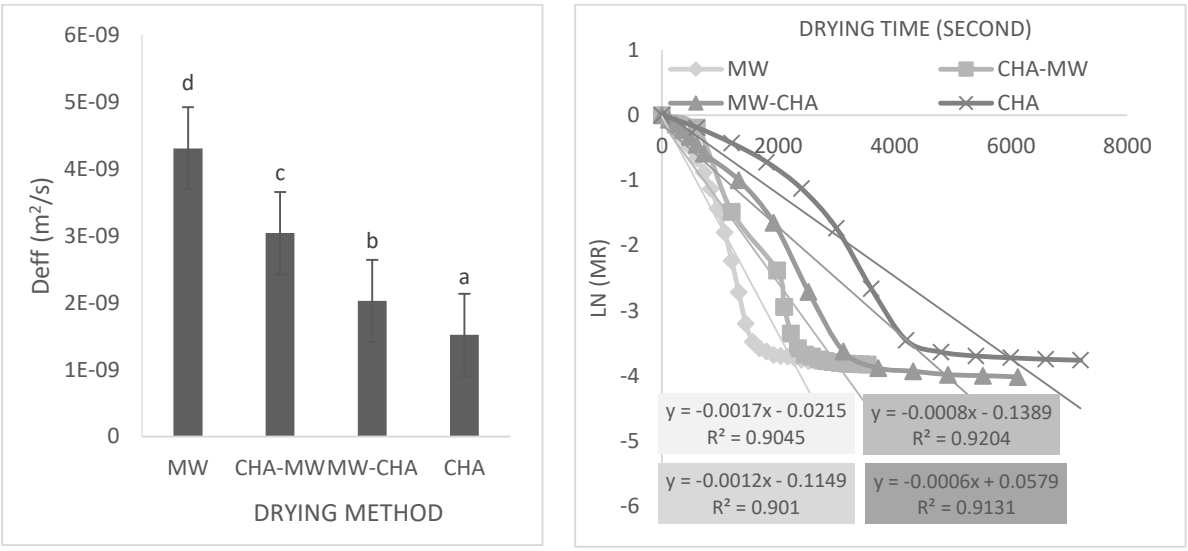
ضریب انتشار مؤثر رطوبت

در شکل ۳ تأثیر روش‌های خشک‌کردن (هوای گرم ٤٠ درجه سلسیوس، توان ۹۰ وات مایکروویو، ترکیب هوای گرم – مایکروویو و مایکروویو – هوای گرم) بر تغییرات ضریب انتشار مؤثر رطوبت فوم بروکلی با غلظت ۳ درصد سفیده‌ی تخم مرغ گزارش شده است. بیشترین و کمترین شیب نمودار به‌ترتیب در توان ۹۰ وات مایکروویو (۰/۰۰۱۷) و هوای ٤٠ درجه سلسیوس (۰/۰۰۰٦) مشاهده شد. با توجه به جدول ۱، ضریب انتشار مؤثر رطوبت هر ٤ روش خشک‌کردن، با یکدیگر در سطح احتمال ٥ درصد تفاوت معنی‌دار داشته و به ترتیب از زیاد به کم مربوط به روش مایکروویو ($٤/٠٩٥\times١٠^{-٩}$ مترمربع بر ثانیه)، هوای گرم–مایکروویو ($٣/٠٣٩\times١٠^{-٩}$ مترمربع بر ثانیه)، مایکروویو–هوای گرم ($٢/٠٢٦\times١٠^{-٩}$ مترمربع بر ثانیه) و هوای گرم ($١/٦٠٤\times١٠^{-٩}$ مترمربع بر ثانیه) بود. در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، ژائو و همکاران (٢٠١٤) نیز ضریب انتشار مؤثر رطوبت را به‌ترتیب از کم به زیاد در روش‌های خشک‌کردن هوای گرم، مایکروویو – هوای گرم، هوای گرم – مایکروویو و مایکروویو مشاهده کردند. بالا بودن ضریب انتشار مؤثر رطوبت در خشک‌کردن به روش مایکروویو به مکانیزم گرمادهی حجمی آن مربوط است. در یک میدان مایکروویو، دمای هسته‌ی محصول بالا می‌رود و یک اختلاف فشار بین هسته و سطح محصول به وجود آمده (جونکوریا و همکاران ۲۰۱۷) و باعث ایجاد ساختار متخلخل و نفوذپذیری بیشتر به بخار و در نهایت افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت در اثر گرمایش سریع‌تر می‌شود (دهقانی خیاوی و همکاران ۱۳۹۹). در روش هوای گرم با توجه به پایین بودن دمای هوا (٤٠ درجه سلسیوس)، چون بین ضریب انتشار مؤثر رطوبت و دما رابطه مستقیم وجود دارد و از طرفی هم انرژی هوای گرم برای خروج رطوبت نسبت به روش‌های دیگر پایین‌تر است، شیب لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت کم بوده بنابراین ضریب انتشار مؤثر رطوبت در این روش نسبت به روش‌های دیگر خشک‌کردن در پایین‌ترین مقدار خود می‌باشد و دلیل کندتر بودن سرعت خشک‌کردن در این روش همین مطلب

است. در ترکیب هوای گرم و مایکروویو، هنگامی که هوای گرم (به عنوان پیش‌تیمار) در ابتدای فرایند اعمال می‌شود، در واقع فرایند خشک‌کردن و خروج رطوبت توسط مایکروویو کنترل شده و شیب نمودار و ضریب انتشار مؤثر رطوبت در این روش بیشتر از هوای گرم است و هنگامی که هوای گرم در آخر فرایند (به عنوان پس‌تیمار) اعمال می‌شود، فرایند خشک‌کردن توسط هوای گرم کنترل شده و شیب نمودار و ضریب انتشار مؤثر رطوبت کمتر از حالت قبل می‌شود، اما بیشتر از هوای گرم به تنهایی است.

انرژی مصرفی

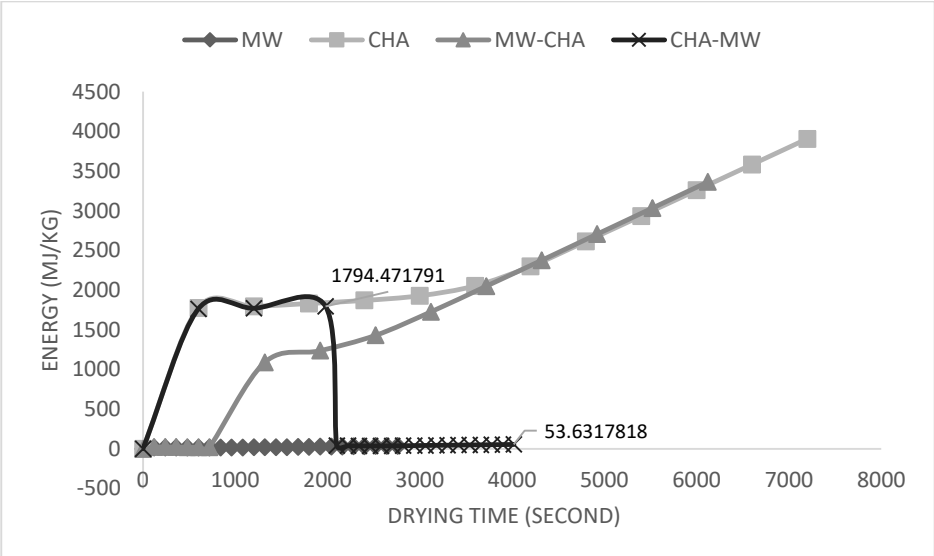
در شکل ٤ تأثیر روش‌های خشک‌کردن هوای گرم ٤٠ درجه سلسیوس، توان ۹۰ وات مایکروویو، هوای گرم–مایکروویو و مایکروویو–هوای گرم در غلظت ۳ درصد سفیده‌ی تخم مرغ بر انرژی مصرفی لازم برای خشک‌کردن فوم بروکلی نشان داده شده است. با توجه به شکل، کمترین میانگین انرژی مصرفی طی زمان فرایند متعلق به توان ۹۰ وات مایکروویو (۲۱/۲۹٦ مگاژول بر کیلوگرم) و بیشترین میانگین انرژی مصرفی، متعلق به هوای گرم (۲۲٤۱/۲۹ مگاژول بر کیلوگرم) بوده است. در روش مایکروویو به دلیل جذب امواج توسط رطوبت موجود در محصول و ارتعاش مولکول‌های آب، گرما در کل بافت محصول تولید می‌شود و مدت زمان خشک‌کردن کاهش می‌یابد. بنابراین هرچقدر زمان خشک‌کردن کمتر باشد، میزان انرژی مصرفی نیز کاهش می‌یابد (دهقانی خیاوی و همکاران ۱۳۹۹). طبق جدول ۱، انرژی مصرفی هر ٤ روش خشک‌کردن با هم در سطح احتمال ٥ درصد تفاوت معنی‌دار داشتند. در روش هوای گرم به طور کلی سه عامل دما، زمان و سرعت جریان هوا، انرژی مصرفی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از این‌رو می‌توان گفت که انرژی مصرفی با دما رابطه معکوس و با زمان فرایند رابطه مستقیم دارد. چون در پژوهش انجام گرفته سرعت و دمای هوا ثابت می‌باشد، بنابراین مهمترین عامل تأثیرگذار زمان فرایند است که به دلیل طولانی بودن زمان این روش، میزان مصرف انرژی بسیار افزایش می‌یابد (۲۲٤۱/۲۹٥ مگاژول بر کیلوگرم). از جمله عیوب خشک‌کردن توسط هوای گرم، زمان طولانی فرآیند و مصرف انرژی بالاست و از جمله مزیت‌های خشک‌کردن توسط مایکروویو، زمان کوتاه فرآیند و مصرف انرژی کمتر این روش است (کاراسلان و همکاران ۲۰۰۸؛ آگلیلتیک و همکاران ۲۰۱٥). بنابراین استفاده از انرژی مایکروویو در طول فرآیند خشک‌کردن یک راه مؤثر جهت کاهش مصرف انرژی خواهد بود (دهقان‌نیا و همکاران ۲۰۱۸ (ج)). راندمان انرژی در ابتدای خشک‌کردن توسط مایکروویو به علت رطوبت بالای محصول، جذب بیشتر امواج مایکروویو و تبدیل آنها به انرژی گرمایی افزایش می‌یابد (دهقان‌نیا و همکاران ۲۰۱۸ (د)). طی فرایند خشک‌کردن، میزان مصرف انرژی ویژه برای از بین بردن ۱ کیلوگرم رطوبت از بروکلی برای تمام روش‌های خشک‌کردن همراه با گذشت زمان افزایش یافت، بجز روش ترکیبی پیش‌تیمار هوای گرم برای مایکروویو (CHA-MW). در این روش پس از مشاهده افزایش انرژی مربوط به پیش‌تیمار هوای گرم در زمان‌های اولیه (از صفر تا ۱۷۹٤/٤۷۱ مگاژول بر کیلوگرم)، با ورود به مرحله پس‌تیمار مایکروویو مصرف انرژی کاهش یافت (از ۱۷۹٤/٤۷۱ تا ٥۳/٦۳۱۷ مگاژول بر کیلوگرم).



الف) ب)

شکل ۳- تأثیر روش خشک‌کردن (مایکروویو، هوای گرم-مایکروویو، مایکروویو-هوای گرم، هوای گرم) بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت فوم بروکلی حین زمان خشک‌شدن

Figure 3- Effect of drying method (microwave, convective-microwave, microwave-convective, hot air convective) on effective diffusion coefficient of broccoli foam during drying time



شکل ۴- تأثیر روش خشک‌کردن (مایکروویو، هوای گرم-مایکروویو، مایکروویو-هوای گرم، هوای گرم) بر انرژی مصرفی فوم بروکلی طی زمان خشک‌شدن

Figure 4- Effect of drying methods (microwave, convective-microwave, microwave-convective, hot air convective) on energy consumption of broccoli foam during drying time

جدول ۱- تأثیر روش خشک‌کردن (مایکروویو، هوای گرم-مایکروویو، مایکروویو-هوای گرم، هوای گرم) بر پارامترهای سینتیک خشک‌کردن فوم کلم بروکلی

Table 1- Effect of drying method (microwave, convective-microwave, microwave-convective, hot air convective) on drying kinetic parameters

	Drying method			
Parameter	CHA	MW	MW-CHA	CHA-MW
Moisture content (g/g)	$2.984^{c}\pm0.491$	$2.494^{b}\pm0.159$	$3.85^{d}\pm0.314$	$1.903^{a}\pm0.175$
Moisture ratio (g/g)	$0.295^{c}\pm0.016$	$0.248^{b}\pm0.011$	$0.383^{d}\pm0.01$	$0.189^{a}\pm0.003$
Drying rate (g/g t)	$0.075^{a}\pm0.008$	$0.196^{d}\pm0.01$	$0.18^{c}\pm0.025$	$0.11^{b}\pm0.002$
Drying time (min)	$120^{d}\pm0.001$	$48^{a}\pm0.346$	$102.16^{c}\pm0.288$	$70^{b}\pm0.36$
D_{eff} (m^2/s)	$1.6\times10^{-9a}\pm1.4\times10^{-9}$	$4.1\times10^{-9d}\pm3.5\times10^{-10}$	$2.1\times10^{-9b}\pm1.1\times10^{-9}$	$3.1\times10^{-9c}\pm1.2\times10^{-9}$
Energy (MJ/kg)	$2241.29^{d}\pm0.68$	$21.296^{a}\pm0.85$	$1142.04^{c}\pm0.431$	$302.96^{b}\pm0.381$

Each value in the table represents the mean ± standard deviation of triplicate analysis. Different superscripts within the same line represent significant difference at $P<0.05$.

بهینه‌سازی

با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت ورژن ۱۱ بهترین روش جهت خشک‌کردن فوم بروکلی، با توجه به محتوای رطوبت و نسبت رطوبت، زمان خشک‌کردن و انرژی مصرفی کمتر و نرخ خشک‌کردن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت بیشتر، مایکروویو ۹۰ وات با میزان مطلوبیت ۰/۸۸ و پس از آن روش هوای گرم-مایکروویو با میزان مطلوبیت ۰/۷ انتخاب شد.

نتیجه‌گیری

استفاده از انرژی مایکروویو به عنوان پیش‌تیمار برای هوای گرم (CHA-MW)، به طور معنی‌داری توانست میانگین محتوای رطوبت و نسبت رطوبت را در مقایسه با روش مایکروویو به تنهایی، کاهش دهد و پودری با محتوای رطوبت کمتر و ماندگاری بیشتر تولید کند. نرخ خشک‌کردن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت مربوط به هر دو روش خشک‌کردن ترکیبی مایکروویو و هوای گرم در مقایسه با خشک‌کردن توسط هوای گرم، افزایش یافت اما در مقایسه با خشک‌کردن توسط مایکروویو کمتر بود. همچنین انرژی مصرفی در هر دو روش خشک‌کردن ترکیبی مایکروویو و هوای گرم کمتر از خشک‌کردن به روش هوای گرم و بیشتر از روش خشک‌کردن توسط مایکروویو به دست آمد.

قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان نامه دانشجویی در مقطع کارشناسی ارشد با عنوان " شبیه‌سازی کامپیوتری و بررسی تجربی فرآیند خشک‌کردن پالپ کلم بروکلی به روش فوم‌مت در خشک‌کن هیبریدی هوای داغ-مایکروویو" می‌باشد.

منابع مورد استفاده

خاکباز حشمتی م و سیفی مقدم الف، ۱۳۹۶. بررسی تکنیک متناوب مایکروویو- هوای گرم بر خواص کیفی و تغذیه‌ای برگه‌های کیوی خشک‌شده، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۷(۱)، ۱۲۶-۱۱۱.

دهقانی خیاوی ه، خاکباز حشمتی م، دهقان‌نیا ج و باغبان ح، ۱۳۹۹. کاربرد روش‌های هیبریدی (هوای داغ- مایکروویو- مادون قرمز) جهت خشک‌کردن سیب‌زمینی و مطالعه ویژگی‌های کیفی محصول خشک‌شده، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۳۰(۲)، ۱۶۱-۱۴۳.

Aghilinategh N, Rafiee S, Gholikhani A, Hosseinpur S, Omid M, Mohtasebi SS and Maleki N, 2015. A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes. Food science & nutrition 3: 519-526.

Cao Y, Tao Y, Zhu X, Han Y, Li D, Liu C and Show PL, 2020. Effect of microwave and air-borne ultrasound-assisted air drying on drying kinetics and phytochemical properties of broccoli floret. Drying technology 38: 1733-1748.

Das I and Arora A, 2018. Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying. Journal of Food Engineering 223: 208-219.

De Carvalho TI, Nogueira TY, Mauro MA, Gómez-Alonso S, Gomes E, Da-Silva R and Lago-Vanzela ES, 2017. Dehydration of jambolan [*Syzygium cumini* (L.)] juice during foam mat drying: Quantitative and qualitative changes of the phenolic compounds. Food Research International 102: 32-42.

Dehghannya J, Pourahmad M, Ghanbarzadeh B and Ghaffari H, 2018الف. Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations. Journal of food engineering 238: 164-177.

Dehghannya J, Hosseinlar SH and Heshmati MK, 2018ب. Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. Innovative Food Science & Emerging Technologies 45: 132–151.

Dehghannya J, Bozorghi S and Heshmati MK, 2018ج. Low temperature hot air drying of potato cubes subjected to osmotic dehydration and intermittent microwave: drying kinetics, energy consumption and product quality indexes. Heat and Mass Transfer 54: 929-954.

Dehghannya J, Farshad P and Khakbaz Heshmati M, 2018د. Three-stage hybrid osmotic–intermittent microwave–convective drying of apple at low temperature and short time. Drying Technology 36: 1982-2005.

Dehghannya J, Pourahmad M, Ghanbarzadeh B and Ghaffari H, 2019. Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. International Journal of Thermal Sciences 135: 30-43.

Elhussein EA and Şahin S, 2018. Drying behaviour, effective diffusivity and energy of activation of olive leaves dried by microwave, vacuum and oven drying methods. Heat and Mass Transfer 54: 1901-1911.

Jin X, Oliviero T, Van Der Sman RG, Verkerk R, Dekker M and van Boxtel AJ, 2014. Impact of different drying trajectories on degradation of nutritional compounds in broccoli (*Brassica oleracea* var. italica). LWT-Food Science and Technology 59: 189-195.

Ju G, Song Q, Liu Z, Shi J and Wan Y, 2015. A solid-analytical-based method for extracting cutter-workpiece engagement in sculptured surface milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 80: 1297-1310.

Junqueira JR, Corrêa JL and Ernesto DB, 2017. Microwave, convective, and intermittent microwave–convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices. Journal of Food Processing and Preservation 41: e13250.

Karaaslan SN and Tuncer IK, 2008. Development of a drying model for combined microwave–fan-assisted convection drying of spinach. Biosystems engineering 100: 44-52.

Kermani A. M, Khashehchi M, Kouravand S and Sadeghi A, 2017. Effects of intermittent microwave drying on quality characteristics of pistachio nuts. Drying Technology 35: 1108-1116.

Liu ZL, Bai JW, Yang WX, Wang J, Deng LZ, Yu XL and Xiao HW, 2019. Effect of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) and drying parameters on drying characteristics and quality of broccoli florets. Drying Technology 37(10): 1251-1264.

Monteiro RL, Link JV, Tribuzi G, Carciofi BA and Laurindo JB, 2018. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. Journal of food engineering 232: 1-10.

Munyaka AW, Oey I, Van Loey A and Hendrickx M, 2010. Application of thermal inactivation of enzymes during vitamin C analysis to study the influence of acidification, crushing and blanching on vitamin C stability in Broccoli (*Brassica oleracea* L var. italica). Food Chemistry 120: 591-598.

Salim NS, Garièpy Y and Raghavan V, 2016. Effects of operating factors on osmotic dehydration of broccoli stalk slices. Cogent Food & Agriculture 2: 1134025.

Zhao D, An K, Ding S, Liu L, Xu Z and Wang Z, 2014. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: drying kinetics and physical quality. Food and bioprocess technology 7: 2308-2318.

Zheng XZ, Liu CH and Zhou H, 2011. Optimization of parameters for microwave-assisted foam mat drying of blackcurrant pulp. Drying Technology 29: 230-238.

Journal of Food Research, 2022,32(2):73-87
https://foodresearch.tabrizu.ac.ir

© 2009 Copyright by Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
This is an open access article under the CC BY NC license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/)

DOI: 10.22034/FR.2022.45628.1791

Comparison of drying method (convective hot air, microwave, convective hot air -microwave, microwave- hot air convective) on drying kinetic of broccoli foam

M Ataee[1], M Khakbaz Heshmati[2*], J Dehgannya[3] and S Dadashi[2]

Received: April 22, 2021 Accepted: June 7, 2021

[1]MSc Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran
[2]Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran
[3]Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran
[*] Corresponding author: E mail: Email: m.khakbazheshmati@tabrizu.ac.ir

Introduction: Broccoli is a rich source of minerals such as potassium, phosphorus, calcium and sodium. Additionally, broccoli provides vitamins, especially vitamin C, vitamin A and folic acid. In addition, it has been reported as a one of the main sources of natural antioxidants such as phenolic compounds, glucosinolates and isothiocyanates. Because of the high corruptibility of broccoli, it is very important to keep its effective components as much as possible. Drying is the most common method for enhance the shelf life of food products. The foam mat drying method was developed in the 1960s. This method involves mixing pulp or fruit and vegetable juices with a foaming agent and a foam stabilizer to prepare a stable foam that is spread and dried on a tray, then the dried product is ground to a powdered product. In this technique, due to increasing of the material area, the drying rate is high. Convective hot air is generally chosen as the drying medium of the foam mat method. The disadvantage of this drying method is the poor heat transfer of the air around the foam. Microwave heating, with its ability to produce volumetric heat inside the material, can overcome this limitation. Microwave energy can penetrate directly into the foamed pulp to evaporate moisture inside the foam; continuously generated vapors stimulate foam bubbles, which expand the evaporation level and speed up the drying process even more. There are many strategies to improve the quality of microwave-dried products, such as combining microwave and convective hot air, intermittent drying, and microwave -vacuum drying. The combination of microwave and convective hot air has been used successfully for a number of agricultural products such as garlic, grapes, carrots, kiwis and blueberries. The combination of these two methods has a shorter drying time than single convective hot air, and the final sample will have higher quality.

Material and methods: Broccoli was purchased from the local market of Tabriz and its enzymes were inactivated by blanching in 90°C hot water for 4 minutes and then immediately cooled in ice water for 5 minutes. It was then pulped and stored in a freezer at minus 18°C until drying experiments were performed. Broccoli pulp was first thawed before drying experiments. 3% (w/w) egg white as foaming agent and 0.5% (w/w) methyl cellulose solution as stabilizer agent were used to prepare the broccoli foam. The foam was spread to a thickness of 5 mm on a glass plate and then it was dried with different drying methods including convective hot air (at 40°C and air velocity of 1m/s),

microwave (90w) and combination of microwave and convection as pre and post treatment (MW-CHA and CHA-MW). The moisture content of samples was measured at 10 minute intervals (in CHA method) and at 2 minute intervals (in MW method), and the drying process was terminated when moisture content of the samples reached 0.04 g water/g dry solids. The produced powders were then scratched off by a special spatula and were immediately ground in a crucible in order to prevent further moisture absorption and kept in the refrigerator until further testing.

Results and discussion: The combination of microwave and convective hot air (in both pre and post treatment) compared to microwave method, had lower effective moisture diffusivity coefficient and drying rate but higher energy consumption. The average of moisture content and moisture ratio was also affected by drying method and the combination of microwave and convective hot air (MW-CHA and CHA-MW). In MW-CHA, the average of moisture content and moisture ratio was higher than MW and CHA drying method, but in CHA-MW, the average of moisture content and the moisture ratio was the lowest obtained. Among the four drying methods, the hot air drying method had the lowest drying rate due to the hardening of the surface due to the loss of surface moisture. This phenomenon slows down the exit of moisture from the product and reduces the drying speed. In the microwave method, in the early stages of drying, the samples have high humidity. High humidity is the main reason for volumetric heating in the microwave method, in that bipolar molecules absorb a significant part of the microwave energy and lead to an increase in product temperature and rapid transfer of moisture to the surface. The flow of water vapor from the inner parts to the surface of the product creates a porous structure, resulting in faster evaporation of moisture, and ultimately increases the drying speed. Therefore, the highest drying rate was observed in the microwave drying method. The passage of time and the reduction of moisture in the product reduce the absorption of microwave power and, as the drying process progresses, leads to a slowdown in the drying speed. Compared to the combined drying methods, due to the prevention of surface drying in the microwave-hot air (MW-CHA) method, this method had a higher drying rate than the hot air-microwave (CHA-MW) method and hot air alone. The mean drying time were from low to high: microwave (48 minutes), hot air-microwave (70 minutes), microwave-hot air (102.16 minutes) and hot air (120 minutes), respectively. The effective moisture diffusion coefficient of all four drying methods was significantly different from each other at the level of 5% probability and were from high to low related to microwave, hot air-microwave, microwave-hot air and hot air, respectively. The high effective diffusion coefficient of moisture in microwave drying is related to its volumetric heating mechanism. In a microwave field, the core temperature of the product rises, creating a pressure difference between the core and the surface of the product (Junkoria et al. 2017), creating a more porous structure and more vapor permeability, and ultimately increasing the effective moisture diffusion coefficient due to faster heating. (Dehghani Khiavi et al. 1399). Hot air method has the lowest effective moisture diffusion coefficient value, due to the low air temperature (40°C), because there is a direct relationship between the effective diffusion coefficient of humidity and temperature, and on the other hand, the hot air energy for moisture exit is lower than other methods, so the effective moisture diffusion coefficient in this method is at its lowest value compared to other drying methods, and this is the reason for the slower drying speed in this method. In the combination of hot air and microwave, when hot air (as a pre-treatment) is applied at the beginning of the process, the drying and dehumidification process is controlled by the microwave and the effective moisture diffusion coefficient in this method are higher than hot air. When hot air is applied at the end of the process (as a post-treatment), the drying process is controlled by hot air and the effective moisture diffusion coefficient are lower than hot air-microwave, but higher than hot air alone.

Conclusion: According to the least energy consumption, drying time, moisture content, moisture ratio and the most effective moisture diffusivity coefficient and drying rate, MW and CHA-MW were the optimum methods for drying the broccoli foam (with 0.88 and 0.7 desirability, respectively). The use of microwave energy as a pretreatment for hot air (CHA-MW) was able to significantly reduce

the average moisture content and moisture ratio compared to the microwave method alone, and produce a powder with lower moisture content and longer shelf life.

Key words: Broccoli, Convection, Foam mat, Hot air, Microwave