تخمین مقدار بهینه مواد افزودنی بر اساس دمای نقطه چسبندگی پودر آب انار

امید رضا روستاپور[1]، اکبر جوکار[2] و ندا مفتون آزاد [3]

1 ، 3- استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس

2- مربی پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس

آدرس پست الکترونیکی مکاتبه کننده roustapour@farsagres.ir

چکیده

از مشکلات فرایند تولید پودر میوه از جمله آب انار چسبندگی ذرات به یکدیگر و جداره خشک کن پاششی در طی فرایند خشک شدن می‌باشد. رفتار فیزیکی ترکیبات قندی و اسیدهای آلی از قبیل آب‌دوستی باعث ایجاد این مشکل می‌گردد. یکی از روش‌های رفع چسبندگی استفاده از مواد افزودنی خوراکی با وزن مولکولی بالا از قبیل مالتودکسترین، آدامس عربی و متیل سلولز می‌باشد. این مواد قبل از ارسال خوراک مایع به خشک کن به ماده اولیه اضافه شده و از تشکیل باندهای هیدروژنی در اطراف ذرات جلوگیری می‌نمایند. کاربرد بهینه مواد افزودنی در فرایند تولید پودر و افزایش کیفیت محصول خروجی مستلزم شناسایی دمای مرز چسبندگی است. در این راستا بایستی دمای تبدیل شیشه ای محصول با استناد به مقادیر گرمای ویژه و دمای تبدیل شیشه ترکیبات تشکیل دهنده آن از رابطه تجربی موجود تعیین گردد . در این تحقیق با استفاده از نرم افزار MATLAB و تعریف محدوده دمای بحرانی چسبندگی در فرایند خشک کردن آب آنار در خشک کن پاششی، میزان بهینه مواد افزودنی در هر دما برای رفع چسبندگی در فرایند تولید پودر انار تخمین زده شد. نتایج بدست آمده نشان داد با افزایش دمای هوای خشک‌کن از 70 به 90 درجه سلسیوس میزان مالتودکسترین (DE12) از 26 درصد به 40 درصد افزایش یافته است. همچنین مطابق با نتایج حاصل از تولید پودر آب انار توسط خشک کن پاششی نیمه صنعتی، مقدار مناسب مالتودکسترین برای تولید پودر روان 35 درصد وزنی در دمای 77 درجه سلسیوس می‌باشد. این دما در واقع دمای محیط خشک‌کن و معرف دمای چسبندگی است . با حل معادله تجربی مقدار مناسب مالتودکسترین 31 درصد تخمین زده شد که در محدوده خطای 10 درصد قابل قبول می‌باشد.

کلمات کلیدی: ***خشک‌کن پاششی، دمای تبدیل شیشه، دمای چسبندگی، پودر انار، مواد افزودنی***

مقدمه

در دماهای بالاتر از دمای تبدیل شیشه ای، ذرات از حالت جامد وارد فاز پلاستیک می شوند. افزایش دما و تجاوز آن از دمای تبدیل شیشه ای، باعث تغییر ناگهانی در بسیاری از خواص فیزیکی محصول خواهد شد . از مهمترین آن ها می‌توان از افزایش حجم مولکولی، افزایش گرمای ویژه، افزایش ضریب انبساط حرارتی و تغییر خواص ویسکوالاستیکی نام برد [Genin and Rene, 1995] دمای نقطه چسبندگی 10 الی 20 درجه سلسیوس بالاتر از دمای تبدیل شیشه‌ای می‌باشد [Bhandari et al., 1997]

روس و کارل و نیز بهانداری و همکاران همبستگی دمای تبدیل شیشه ای و لزجت بحرانی را مورد بررسی قرار داده‌اند بر اساس نتایج، ذرات در محدوده دمایی 10 تا 20 درجه سلسیوس بالاتر از دمای تبدی ل شیشه ای به لزجت بحرانی می‌رسد. بر این اساس، دمای سطح ذره در طی خشک شدن نبایستی به 10 تا 20 درجه سلسیوس بالاتر از دمای تبدیل شیشه ای برسد. استفاده از مواد افزودنی با وزن مولکولی زیاد، باعث بالا رفتن دمای T_g مواد غذایی شده و از چسبیدن آنها در طی خشک شدن به دیواره خشک کن پاششی جلوگیری می نمایند [Roos and Karel, 1991; Bhandari et al., 1997]

در تحقیقات انجام شده توسط دولینسکی و همکاران، پودر ترکیباتی از شیر و آب میوه هایی از قبیل سیب و توت فرنگی در خشک کن پاششی تولید شد. مواد ترموپلاستیک موجود در آب سیب در انتهای فرآیند خشک شدن به صورت نرم و قابل ذوب باقی می مانند. استفاده از مواد افزودنی، خنک کردن مکانهای مختلف جداره خشک کن و همچنین خنک کردن واحد جداسازی و تخلیه مواد پودری جهت کاهش خاصیت ترموپلاستیک ذرات، ضروری است [Dolinsky et al., 2000]

دمای رقطه چسبندگی، دمایی است که در آن ذرات به سختی جریان پیدا می کنند. آزمایش‌های مربوط به تعیین نقطه چسبندگی توسط محققان بسیاری از قبیل جایا صورت گرفته است [Jaya, 2002]

سوداگر و همکاران با افزودن 45 درصد مالتودکسترین به آب انبه نسبت به تولید پودر انبه در یک خش ک کن پاششی آزمایشگاهی با دمای هوای ورودی 167 درجه سلسیوس که مجهز به جاروبک های دوار هوا می‌باشد، اقدام نمودند. افزودن این مقدار مالتودکسترین باعث افزایش دمای چسبندگی و بهینه شدن روانی پودر آب میوه می‌گردد [Sudhagar et al., 2002]

ادیکاری و همکاران سینتیک خ شک شدن مواد قندی با وزن مولکولی کم از قبیل فروکتوز، گلوکز، ساکاروز و اسیدهای آلی از قبیل اسید سیتریک و مواد با وزن مولکولی بالا از قبیل مالتودکسترین (DE6) را به صورت آزمایشگاهی با بررسی خشک شدن یک قطره مورد مطالعه قرار داده و با نتایج حاصل از مدل سازی عددی مقایسه نمودند. در این راستا تاریخچه چسبندگی قطرات به صورت آزمایشگاهی تعیین و به روش عددی و بر اساس دمای تبدیل شیشه لایه سطحی قطرات تخمین زده شد . مالتودکسترین تشکیل یک لایه بر قطرات داده و آن ها را به شرایط غیرچسبنده نزدیک می‌نماید [Adhikari et al., 2003]

در تحقیقات انجام شده توسط ادیکاری و همکاران نتیجه گیری شده است که چسبندگی سطح قطره زمانی کاملاً رفع می گردد که دمای تبدیل شیشه لایه سطحی قطره، 10 درجه سلسیوس بیش از دمای قطره گردد [Adhikari et al., 2004].

جدایش لایه های نازک خمیرهای مواد غذایی مانند مال تودکسترین، آدامس عربی و یا ملاس چغندر از سینی های شیشه‌ای خشک کن در دماها و رطوبت های مختلف بررسی و با نتایج تجربی حاصل از تعیین دمای تبدیل شیشه مواد مقایسه گردید. جدایش زمانی رخ می‌دهد که شرایط دمایی مطابق با دمای تبدیل شیشه باشد. این دما بستگی به ترکیبات تشکیل دهنده و میزان مواد قندی هریک از مواد غذایی دارد [Collares et al., 2004].

پایداری مواد آمورف (با شکل نامنظم مولکولی) وابسته به ترکیبات تشکیل دهنده است . کرستالیزاسیون لاکتوز به عنوان یک ماده آمورف در دمای تبدیل شیشه بالا اتفاق می افتد. افزودن ترکیبات نمک به لاکتوز باعث افزایش این دما می گردد. در این میان کلرید کلسیم بهترین خاصیت جذب آب را داشته و باعث افزایش بیشتر دمای تبدیل شیشه خواهد گردید [Elmonsef Omar and Roos, 2007]

چسبندگی ذرات پودر با ایجاد یک پل توسط صفحات لاستیکی بین دیواره و ذرات کاهش می یابد. در این راستا دمای تبدیل شیشه که حدود 20 درجه سلسیوس زیر نقطه چسبندگی درنظر گرفته شده، با استفاده از رابطه تجربی کوچمن و کاراز تخمین زده شده است [Woo et al., 2009]

در این تحقیق شرایط بهینه کاربرد ماده افزودنی مالتودکسترین (DE12) در فرایند تولید پودر آب انار در خشک‌کن پاششی و رفع چسبندگی، با استفاده از رابطه تجربی کوچمن و کاراز [4] تخمین زده شد. در این راستا با نوشتن یک برنامه محاسباتی بر اساس موازنه جرمی توسط کد MATLAB مقدار بهینه ماده افزودنی جهت رسیدن به دمای تبدیل شیشه قابل قبول تعیین گردید.

مواد و روشها

جهت انجام آزمایش‌ها و تولید پودر آب انار، از یک خشک کن پاششی نیمه‌صنعتی بلند[5] که پاشنده آن از نوع نازل دو سیاله می‌باشد استفاده گردید. آب انار دارای ترکیبات قندی با وزن مولکولی کم و اسیدهای آلی بوده که همگی دارای دمای تبدیل شیشه پایین هستند. مواد قندی از قبیل فروکتوز و گلوکز بسیار آب دوست بوده و تمایل زیادی به جذب مولکول های آب از محیط اطراف دارند . رفتار فیزیکی این مواد با وزن مولکولی کم باعث ایجاد مشکلات زیادی در طی خشک کردن از قبیل آب دوستی، حلالیت بالا، چسبندگی و دمای ذوب پایین می گردد. جذب رطوبت باعث تشدید مسئله چسبندگی خواهد شد . به‌طورکلی آب انار دارای حدود 13 درصد مواد قندی و 1/3 درصد اسیدهای آلی می‌باشد. ترکیبات تشکیل دهنده آب انار در جدول (1) ارائه شده است[AOAC, 1990].

جدول 1: ترکیبات تشکیل دهنده آب انار

جزء	مقدار (g/100g)
فروکتوز	6/63
گلوکز	6/62
اسید سیتریک	1/24
اسید مالیک	0/053

جهت انجام آزمایشات، آب انار به صورت کنسانتره با بریکس 65 از شرکت دشت نشاط تهیه گردید . این غلظت جهت ارسال به خشک‌کن مناسب نمی‌باشد لذا با استفاده از آب مقطر آب انار رقیق شد تا غلظت آن به حدود 24 درصد برسد. دمای تبدیل شیشه آب انار با استفاده از رابطه تجربی کوچمن و کاراز (رابطه 1) [Bhandari et al., 1997] و با توجه به غلظت اولیه آن، درصد وزنی، گرمای ویژه و دمای تبدیل شیشه ترکیبات تشکیل دهنده محاسبه گردید. دمای تبدیل شیشه و گرمای ویژه ترکیبات قندی، اسیدهای آلی و ماده افزودنی مالتودکسترین توسط کلارس و همکاران ارائه داده شده است (جدول 2) [Collares et al., 2004] بر اساس این رابطه، دمای تبدیل شیشه آب انار حدود 17 درجه سلسیوس گردید.

$$T_{gm} = \frac{\sum w_i \Delta C_{pi} T_{gi}}{\sum w_i \Delta C_{pi}} \qquad (1)$$

[4] Couchman and Karasz
5 Long spray dryer

در این رابطه، T_{gm} دمای تبدیل شیشه آب انار، w_i درصد وزنی، ΔC_{pi} گرمای ویژه و T_{gi} دمای تبدیل شیشه هریک از ترکیبات می‌باشند.

با توجه به پایین بودن این دما ذرات در طی فرآیند خشک شدن به جداره خشک کن خواهند چسبید. تمهیدات به‌کار گرفته شده برای رفع این مشکل استفاده از ترکیبات افزودنی کمکی با وزن مولکولی بالا در ماده اولیه قبل از فرایند خشک کردن می‌باشد.

به‌منظور تولید پودر آب انار از ماده افزودنی مالتودکسترین (DE12)[6] استفاده گردید. مالتودکسترین از پلیمرهای دکستروز و جزو کربوهیدرات های قابل هضم بوده که از هیدرولیز نشاسته ذرت به دست می‌آید و بسته به درجه هیدرولیز، معادل دکستروز آن تغییر خواهد کرد.

درصد بهینه ماده افزودنی بایستی به محدوده‌ای برسد که سبب رفع مشکل چسبندگی گردد. برای رسیدن به این هدف افزایش دمای تبدیل شیشه تا حدود 10 درجه سلسیوس کمتر از دمای چسبندگی ضروری است. دمای چسبندگی معادل با دمای سطحی ذرات پودر در خشک کن می باشد. با توجه به اینکه ذرات در محیط گرم خشک‌کن معلق بوده و در تماس مستقیم با هوای گرم هستند لذا دمای سطحی ذرات تقریباً با دمای خشک کن و جداره یکسان است. در آزمایشات تولید پودر انار در خشک کن پاششی نیمه صنعتی دمای محیط خشک کن و جداره 80 درجه سلسیوس بود.

جدول 2: دمای تبدیل شیشه و گرمای ویژه ترکیبات قندی، اسیدهای آلی و مالتودکسترین

ترکیبات	T_g (°C)	ΔC_{pi} (J/g °C)
فروکتوز	5	0/75
گلوکز	31	0/63
اسید سیتریک	15/73	1/18
اسید مالیک	11/03	1/01
مالتودکسترین	156	0/23

با اضافه نمودن مالتودکسترین به عنوان جزء جدید به مجموعه ترکیبات تشکیل دهنده آب انار برای آماده‌سازی خوراک ورودی خشک کن، مقدار درصد وزنی هر یک از اجزاء تغییر خواهد نمود. برای محاسبه درصد وزنی در این حالت از موازنه جرم و مواد استفاده می کنیم. در نظر گرفتن سیستم با محدوده مشخص از نکات مهم برای انجام یک موازنه جرمی صحیح می باشد. پس از مشخص ش دن محدوده سیستم می توان ورودی ها و خروجی‌های آن را تعیین کرد. اگر یک از ورودی های سیستم را آب انار با بریکس 24 و درصد وزنی مشخص برای هریک از اجزاء درنظر بگیریم، ورودی بعدی جزء مالتودکسترین خواهد بود که به آب انار اضافه می شود. خروجی از این سیستم مخلوطی با درصد وزنی‌های متفاوت با مخلوط ورودی به سیستم است. اگر فرض شود مالتودکسترین به میزان "x" به سیستم اضافه می شود، درصد وزنی هر جزء در خروجی برابر با کسری است که صورت آن درصد

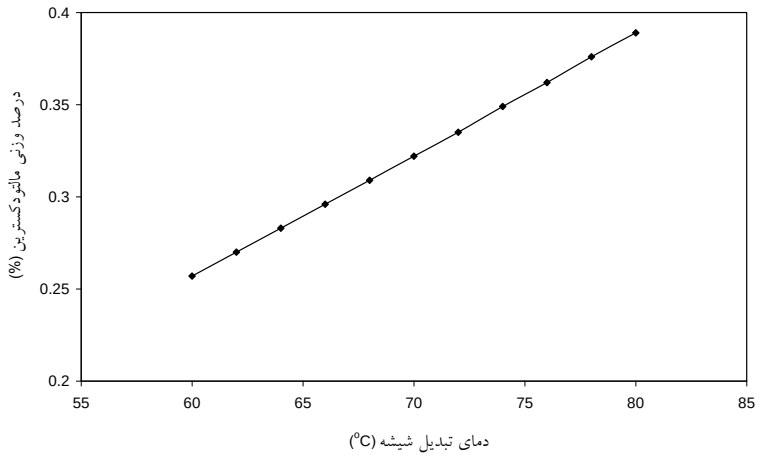
[6] Maltodextrin (Dextrose equivalent 12)

وزنی ورودی برای هر جزء و مخرج آن "1+x" خواهد بود. با مشخص شدن درصد وزنی هریک از اجزاء در خروجی، دمای تبدیل شیشه کل مخلوط از رابطه (1) محاسبه گردید. مقدار x بر اساس دمای تبدیل شیشه ذرات تغییر می‌نماید. همانطور که بیان شد این دما حدود 10 درجه سلسیوس کمتر از دمای سطحی قطرات که شاخص دمای چسبندگی است، می باشد لذا با استفاده از نرم افزار MATLAB و حل این رابطه، مقدار x برای مقادیر مختلف دمای تبدیل شیشه ذرات محاسبه شد . با توجه به اینکه دمای محیط خشک کن در محدوده 70 تا 90 درجه سلسیوس متغیر است لذا محدوده دمای تبدیل شیشه قطرات "T_{gm}" 60 تا 80 درجه سلسیوس در این برنامه تعریف شد. بایستی با استفاده از د اده‌های ارائه شده در جدول (2)، داده‌های درخواست شده به عنوان ورودی به برنامه داده شود تا درنهایت این برنامه میزان "x" را برای رسیدن به "T_{gm}" مورد نظر محاسبه نماید.

در شرایط آزمایشگاهی نیز پودر آب انار در خشک کن پاششی با به کارگیری ماده افزودنی مالتودکستر ین (DE12) تولید گردید. مقدار مالتودکسترین به‌صورت سعی و خطا جهت تولید پودر روان و غیر چسبنده به دست آمد. در این راستا سه سطح مالتودکسترین 30، 35 و 40 درصد انتخاب گردید. به‌منظور جلوگیری از کیکی شدن پودر تولیدی در کلیه آزمایش ها از 3 درصد ماده افزودنی دی اکسید سیلیکان استفاده شد . در حین فرآیند دمای هوای ورودی و خروجی خشک کن به‌ترتیب در 133 و 73 درجه سلسیوس و دبی خوراک 0/2 لیتر در دقیقه بوده است [روستاپور و همکاران، 1389].

نتایج و بحث

بر اساس نتایج به‌دست آمده با افزایش دما، درصد وزنی مالتودکسترین جهت رفع چ سبندگی افزایش یافته است . شکل 1 تغییرات درصد وزنی ماده افزودنی (بر اساس ماده خشک) با افزایش دمای تبدیل شیشه قطرات آب انار را نشان می‌دهد.



شکل1: تغییرات درصد وزنی مالتودکسترین بر اساس دمای چسبندگی

کاربرد 30 درصد مالتودکسترین در سطوح مختلف دمای هوای ورود ی و خروجی خشک کن باعث تولید ذرات چسبنده شد که بر جداره مخروطی مخزن خشک کن رسوب کردند بنابراین تولید پودر در این شرایط امکان پذیر نبود. افزایش درصد مالتودکسترین به 35 و 40 درصد باعث تولید پودر با جریان کاملاً روان گردید.
افزایش دبی خوراک باعث کاهش دمای خروج ی خشک‌کن می‌گردد. بایستی توجه داشت که افزایش بیش از حد دبی باعث عدم تکمیل فرآیند خشک شدن و رسوب ذرات بر دیواره خشک کن می‌گردد. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، زمانی که دمای هوای ورودی 133 درجه سلسیوس است برای دستیابی به دمای خروجی 73 درجه سلسیوس بایستی دبی خوراک 0/20 لیتر در دقیقه باشد . تغییرات دما در ارتفاع مخزن خشک کن توسط ترانسمیترهایی اندازه‌گیری و به کامپیوتر منتقل می شد. در این دمای خروجی، دمای محیط خشک کن حدود 77 درجه سلسیوس بوده است.

نتایج حاصل از تخمین مرز چسبندگی با استفاده از رابطه (1) نشانگر این است که در دمای تبدیل شیشه حدود 70 درجه سلسیوس، میزان وزنی مالتودکسترین جهت رفع چسبندگی حدود 31 درصد می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی حاصل از تولید پودر، کاربرد 35 درصد مالتودکسترین چسبندگی را مرتفع می نماید که نشانگر وجود تنها 10 درصد خطا در تخمین مرز چسبندگی با استفاده از رابطه تجربی کوچمن و کاراز بوده است.

شکل 2 تصویر نمونه پودر آب انار به دست آمده در شرایط اولیه دمای هوای ورودی 133، میزان خوراک 0/20 لیتر در دقیقه و کاربرد 35 درصد مالتودکسترین و 3 درصد دی اکسید سیلیکان مواد افزودنی، به عنوان شرایط مطلوب تولید پودر را نشان می‌دهد.

شکل 2: نمونه پودر آب انار تولیدی

نتیجه‌گیری

آب انار به علت دارا بودن ترکیبات قندی و اسیدهای آلی دارای دمای تبدیل شیشه پایینی بوده و در حین فرایند خشک شدن در خشک‌کن پاششی به جداره خشک‌کن خواهند چسبید. کاربرد مقدار مناسب مالتودکسترین (DE12) این مشکل را مرتفع می نماید. با استفاده از رابطه تجربی کوچمن و کاراز مرز چسبندگی و میزان مالتودکسترین مناسب تخمین زده شده است . با حل این معادله تجربی با استفاده از نرم افزار MATLAB مقادیر بهینه مالتودکسترین در دماهای تبدیل شیشه مناسب قابل محاسبه است . با افزایش دمای تبدیل شیشه از 60 به 80 درجه سلسیوس، درصد وزنی مالتودکسترین از 26 به 40 درصد افزایش خواهد یافت. مطابق با نتایج حاصل از تولید پودر آب انار توسط خشک کن پاششی نیمه صنعتی مقدار مناسب مالتودکسترین برای تولید پودر روان 35 درصد وزنی در دمای 77 درجه سلسیوس می باشد. این دما در واقع دمای محیط خشک کن و معرف دمای چسبندگی است. با حل معادله تجربی مقدار مناسب مالتودکسترین 31 درصد تخمین زده شده است که نشانگر وجود 10 درصد خطا بوده که قابل قبول می‌باشد.

منابع

1 – روستاپور، ا.ر.، پایدار، ع.ر.، سرشار، م. و جوادیان، ش. 1389. تولید پودر آب انار در خشک کن پاششی در راستای کنترل ضایعات کشاورزی. همایش ملی کشاورزی حفاظتی و توسعه پایدار . 5 الی 8 اردیبهشت. شیراز.

2- Adhikari, B., Howes, T., Bhandari, B.R. and Troung, V. 2003. Surface stickiness of drops of darbohydrate and drganic acid solutions during convective drying: Experiments and Modeling. Drying Technol. 21(5): 839–873.

3- Adhikari, B., Howes, T., Bhandari, B.R. and Troung, V. 2004. Effect of addition of maltodextrin on drying kinetics and stickiness of sugar and acid-rich foods during convective drying: experiments and modeling. J. Fd. Eng. 62: 53-68.

4- AOAC. 1990. Official methods of analysis (15th Edn). Association of Official Analytical Chemists. Washington DC, USA.

5- Bhandari, B.R., Datta, N. and Howes, T. 1997. Problem associated with spray drying of sugar-rich foods. Drying Technol. 15(2): 671-684.

6- Collares, F.P., Finzer, J.R.D., Kieckbusch, T.G. 2004. Glass transition control of the detachment of food pastes dried over glass plates. J .Fd. Eng. 61: 261-267.

7- Dolinsky, A.A., Maletskaya, K. and Snezhkin, Y. 2000. Fruit and vegetable powders production technology on the bases of spray and convective drying methods. Drying Technol. 18(3): 747-758.

8- Elmonsef Omar, A.M. and Roos, Y.H. 2007. Glass transition and crystallization behaviour of freeze-dried lactose–salt mixtures. LWT. 40: 536-543.

9- Genin, N. and Rene, F. 1995. Analyse du role de la transition vitreause dans les procedes de conservation agro-alimentarie. J. Fd. Eng. 26: 391-407.

10- Jaya, S. 2002. Vacuum drying of mango pulp. Ph.D thesis. Indian Ins. Technol. Kharagpur, West Bengal, India.

11- Roos, Y. and Karel, M. 1991. Plasticizing effect of water on thermal behavior and crystallization of amorphous food models. J. Fd. Sci. 56(1): 38-43.

12- Sudhagar, M., Jaya, S. and Das, H. 2002. Sticky issues on spray drying of fruit juices. The Society for Engineering in Agricultural, Food and Biological System. Paper No: MBSK 02-201. An ASAE Meeting Presentation. September 27-28.

13- Woo, M.W., Daud, W.R.W, Tasirin, S.M. and Talib, M.Z.M. 2009. Controlling food powder deposition in spray dryers: Wall surface energy manipulation as an alternative. J. Fd. Eng. 94: 192-198.