بررسی انواع خشک‌کن‌های بستر سیال و روش‌های حرارتی

محسن ناصری [۱،*]، ولی رسولی شربیانی [۲]، ابراهیم تقی نژاد [۳] و محمد کاوه [۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم گرایش طراحی و ساخت، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی (mnaseri@student.uma.ac.ir)
۲. دانشیار گروه بیوسیستم دانشگاه محقق اردبیلی (vrasooli@uma.ac.ir)
۳. استادیار گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی
۴. دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم گرایش طراحی و ساخت، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی

چکیده

خشک‌کردن محصولات کشاورزی یکی از قدیمی‌ترین و درعین‌حال گسترده‌ترین فرایندهای مورداستفاده جهت حفظ مواد غذایی در مقابل فساد است، که منجر به کاهش فعالیت‌های میکروبی، آنزیمی و تقلیل سرعت فعل‌وانفعالات شیمیایی محصولات کشاورزی پس از برداشت‌شده و ضمن کاهش محتوای رطوبتی محصول و رساندن آن به یک سطح ایمن که زمان ماندگاری آن را افزایش و با کاهش حجم و وزن مواد بسته‌بندی، حمل‌ونقل و انبارداری آن‌ها را سهولت می‌بخشد. قدیمی‌ترین و عمومی‌ترین روش جهت خشک‌کردن محصولات کشاورزی خشک‌کردن در مقابل آفتاب و هوای آزاد است، که به دلیل استفاده از خورشید و باد به‌عنوان منابع انرژی روش ارزان و آسان تلقی می‌شود، ولی به دلیل کند و وقت‌گیر بودن فرایند، قرار گرفتن محصول در معرض آلودگی محیطی، عدم ثبات شرایط آب و هوایی، هجوم حشرات، گردوخاک و همچنین نیاز به نیروی کارگری زیاد روشی غیر کارآمد است. به‌منظور بهبود کیفیت تولیدات و بالا بردن سرعت فرایند خشک‌کردن و بهره‌وری در زمان و هزینه، باید روش خشک‌کردن در مقابل آفتاب و جریان باد را با روش‌های صنعتی جایگزین کرد. در میان روش‌های جدید خشک‌کردن، روش بسترسیال از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. از این روش اصولاً برای خشک‌کردن مواد دانه‌ای استفاده می‌شود. یکنواختی توزیع رطوبت درکل بستر، درجه‌ی بالای انتقال حرارت و جرم بین هوای گرم و ذرات، اختلاط مناسب و انتقال آسان ذرات، از جمله نتایج مثبت استفاده از سیستم بسترسیال برای خشک‌کردن است.

کلمات کلیدی: *خشک‌کن، بسترسیال، خشک‌کن ترکیبی*

*نویسنده مسئول: mnaseri@student.uma.ac.ir

بررسی انواع خشک‌کن محصولات کشاورزی بستر سیال

مقدمه

هدف از خشک‌کردن مواد غذایی، ذخیره‌سازی طولانی‌مدت مواد غذایی، حداقل کردن نیازهای انبارداری و بسته‌بندی و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌باشد. عملیات خشک‌کردن تأثیر زیادی بر روی کیفیت محصول و قیمت آن می‌گذارد. کیفیت محصول غذایی به میزان تغییرات فیزیکی و بیوشیمیایی که در طول فرایند خشک‌کردن در آن رخ می‌دهد بستگی دارد. درجه حرارت، زمان و فعالیت آبی در حین فرایند خشک‌کردن بر روی کیفیت محصول نهایی تأثیر می‌گذارد. دمای پایین اثر مثبتی روی کیفیت محصول دارد، ولی زمان فرایند را نیز طولانی‌تر می‌کند. در فعالیت آبی پائین، رشد میکروارگانیسم‌ها کند یا متوقف می‌شود ولی سرعت اکسیداسیون لیپید نیز افزایش می‌یابد. واکنش‌های قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی یا مایلارد در فعالیت آبی متوسط به حداکثر می‌رسد؛ بنابراین باید سریعاً از این دامنه فعالیت آبی[1] عبور شود. پایداری یک ماده‌ی غذایی در مدت ذخیره‌سازی با کاهش فعالیت آبی، افزایش می‌یابد و فرآورده‌هایی که در دمای پائین‌تری خشک می‌شود در طول مدت انبارداری پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهد {۴}.

طی تحقیقی، کریل و اشمیت {۱۹} کاربرد خشک‌کن‌های بستر سیال شکر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که به دلیل تماس تمام سطح کریستالهای شکر با هوا، انتقال حرارت و جرم و در نتیجه تبخیر سطحی بسیار بالاست که باعث تشکیل یک‌لایه خارجی میکرو کریستالی می‌شود که به شدت نسبت به خروج رطوبت مقاومت می‌کند. این پدیده سخت شدگی سطحی است و مشکلی برای خشک کردن دانه‌های بسیار مرطوب به شمار می‌رود.

خشک‌کن‌های بسترسیال جهت بررسی مشخصات سینتیک خشک کردن گندم قرمز و شلتوک نیم جوش در رطوبت‌های مختلف مورداستفاده قرار گرفت. نتایج حاکی از این بود که زمان خشک کردن این مواد به شدت کاهش می‌یابد ضمن اینکه میزان شکستگی دانه‌ها بر اثر تنش‌های حرارتی پایین می‌آید {۱۵}.

کینگ (۱۹۷۴) سه هدف زیر را برای خشک‌کردن مواد غذایی، به‌صورت فشرده بیان کرده است:

الف) کیفیت محصول

- حداقل کردن واکنش‌های تجزیه شیمیایی و بیوشیمیایی
- انتخاب شرایط به‌صورت که در طول خشک‌کردن فقط آب از ماده‌ی غذایی جدا شود و مواد دیگر مانند نمک‌ها و مواد مولد عطر فرار و طعم‌دهنده، حذف نشود.
- ساختار محصول حفظ شود
- چگالی کنترل شود.
- باز آبپوشی(حل شدن در آب) سریعاً و با سهولت انجام شود.
- ماده‌ی غذایی در طول مدت انبار شدن، پایدار بوده، به سردکردن و بسته‌بندی نیاز کمتری داشته باشد.
- ماده‌ی غذایی خشک‌شده رنگ مطلوبی داشته باشد.
- از آلودگی و تقلبات مبرا باشد.

ب) اقتصاد فرآیند

- اتلاف محصول به حداقل برسد.

[1] Water activity

- جداسازی آب سریع صورت گیرد.
- منبع انرژی ارزان باشد.
- مشکلات حمل‌ونقل مواد جامد حداقل شود.
- تا حد ممکن عملیات خشک‌کردن به‌صورت پیوسته باشد.
- از دستگاه‌های ساده و غیر پیچیده استفاده شود تا هزینه‌های تعمیرات و نگهداری به حداقل کاهش یابد.

ج) موارد دیگر

- تأثیر مخرب بر محیط‌زیست حداقل باشد.

مواد و روش‌ها

انواع خشک‌کن‌های مورداستفاده امروزه به شرح ذیل است:

۱) خشک‌کن خورشیدی
۲) خشک‌کن جابجایی(کنوکسیونی)
۳) خشک‌کن مادون قرمز
۴) خشک‌کن ماکروویو
۵) خشک‌کن بسترسیال
۶) خشک‌کن‌های افشانه‌ای، تصعیدی، استوانه‌ای(غلتکی)، صوتی، خلأ

خشک‌کن خورشیدی

یکی از معمول‌ترین روش‌ها برای نگهداری محصولات کشاورزی در مناطق گرمسیری است. به‌هرحال این روش خیلی به شرایط آب و هوایی و مشکلاتی از قبیل: آلودگی به گردوغبار، خاک، شن و ماسه و حشرات بستگی دارد. مواد غذایی که با استفاده از هوای داغ خشک می‌شوند دارای بازده انرژی کم و زمان خشک‌کردن طولانی در طول دوره خشک‌کردن با سرعت نزولی می‌باشند. به علت هدایت حرارتی پایین مواد غذایی در این مرحله، انتقال حرارت در داخل مواد غذایی تنها به‌صورت جابجایی صورت می‌گیرد. برای حل این مشکل، جلوگیری از کاهش کیفیت محصولات خشک‌شده و افزایش سرعت خشک‌کردن از خشک‌کن‌های نوین از قبیل ماکروویو و مادون قرمز استفاده می‌شود {۲۷}.

خشک‌کن جابجایی

در این روش از هوای داغ برای تأمین حرارت و انتقال رطوبت تبخیر شده از محصول استفاده می‌شود. هوای داغ در تماس با مواد مرطوب قرار گرفته و سبب تبخیر آب از آن‌ها می‌شود. انتقال رطوبت به ماده جامد مرطوب بیشتر به واسطه جابجایی اجباری انجام می‌شود. از ویژگی‌های این روش می‌توان با استفاده از سوخت مواد زائد کشاورزی، سوخت‌های فسیلی و غیره به‌عنوان عامل خشک‌کننده، وابسته بودن خشک شدن ماده به میزان انتقال حرارت عامل خشک‌کننده به ماده مرطوب و رطوبت هوای داغ و متغیر بودن درجه حرارت در فرآیند خشک‌کردن اشاره کرد. چنانچه رطوبت محیط خیلی زیاد باشد، خشک‌کردن با هوای طبیعی نیاز به رطوبت‌گیری دارد. این روش از جمله روش‌های بسیار رایج به شمار می‌رود {۶}. از جمله عواملی که باعث کاهش فرآیند خشک‌کردن به روش هوای داغ می‌شوند عبارت‌اند از : هدایت حرارتی پایین، حالت سخت شدن ماده، قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی، ویژگی‌های آب‌رسانی ضعیف و از دست دادن مواد مغذی. در سال‌های اخیر توجه زیادی به روش‌های جدید و نوآورانه که باعث افزایش نرخ خشک‌کردن و کیفیت محصول می‌شود، شده است {۲۹}. از دیگر معایب خشک‌کردن به روش هوای داغ، بازده انرژی پایین و زمان طولانی خشک‌کردن در طول دوره نزولی

خشک‌کردن می‌باشد. به دلیل این‌که هدایت حرارتی در داخل مواد غذایی در دوره نزولی خشک‌کردن پایین است، انتقال حرارت تنها به قسمت‌های داخلی مواد غذایی در طول گرمایش جابجایی، انجام می‌شود {۲۳}.

خشک‌کن مادون قرمز

انرژی مادون قرمز یک نوع تابش الکترومغناطیسی می‌باشد که از جسم داغ ساطع می‌شود. تابش وقتی جذب شود انرژی خود را به مواد داغ می‌دهد. میزان انتقال حرارت به دمای سطح مواد دریافت‌کننده گرما، ویژگی‌های سطح دو ماده و شکل بدنه دریافت‌کننده و ساطع کننده بستگی دارد {۷}. امواج الکترومغناطیس به ترتیب افزایش طول‌موج شامل: ماوراءبنفش (**UV**)، مادون قرمز (**IR**)، ماکروویو (**MW**) و فرکانس رادیویی (**RF**) می‌باشند. مکانیسم انتقال انرژی برای هر شکل از تابش الکترومغناطیسی متفاوت است. انرژی گرمایش ماوراءبنفش و مادون قرمز بر روی سطح محصول ایجاد می‌شوند درحالی‌که ماکروویو و فرکانس رادیویی در درون محصول نفوذ می‌کنند و باعث گرمایش حجمی می‌شوند {۳}. در صنعت از اشعه مادون قرمز برای عملیات فرآوری مواد غذایی از قبیل طبخ کردن، برشته کردن، عملیات حرارتی (بلانچینگ، پاستوریزاسیون، استریلیزاسیون و غیره) و همچنین خشک‌کردن مواد غذایی استفاده می‌شود {۲۹}.

تکنولوژی خشک‌کن مادون قرمز بر اساس خاصیت دفع آب توسط اشعه مادون قرمز است. اشعه مادون قرمز دارای محدوده طول‌موج ۰ / ۷۵ تا ۱۰۰ میکرومتر است که به سه محدوده طول‌موج تقسیم می‌شود از جمله: طول‌موج کوتاه (۰/ ۷۵ تا ۲ میکرومتر)، طول‌موج متوسط (۲ تا ۴ میکرومتر) و طول‌موج بلند (۴ تا ۱۰۰ میکرومتر). مکانیزم خشک شدن محصولات بیولوژیکی، به‌صورت نفوذ توده‌ی آب قسمت بیرونی محصولات بیولوژیکی به هوای اطراف است. زمانی که ماده در معرض اشعه مادون قرمز قرار می‌گیرد اشعه به سطح ماده برخورد کرده و به داخل آن نفوذ می‌کند و همین امر باعث می‌شود که نوسان مولکول‌ها در داخل ماده افزایش یابد. علت این افزایش این است که اشعه جذب‌شده باعث می‌شود که به‌طور هم‌زمان در لایه‌های داخلی و سطح محصول دما افزایش یابد و در نهایت رطوبت توسط هوای خشک‌کردن جذب شود و نرخ خشک‌کردن افزایش یابد. عمق نفوذ اشعه به داخل ماده غذایی، به ترکیب و ساختار ماده غذایی و همچنین به طول‌موج‌های تابش مادون قرمز بستگی دارد. زمانی که ماده غذایی در معرض تابش مادون قرمز قرار می‌گیرد انرژی موج الکترومغناطیس با از دست دادن مقدار انرژی کم به‌طور مستقیم توسط ماده غذایی خشک‌شده جذب می‌شود {۲۴}. زمانی که از اشعه مادون قرمز برای گرمایش یا خشک‌کردن مواد مرطوب استفاده می‌شود به علت گرم شدن بیش‌ازحد ماده غذایی، گرادیان دما در مواد در یک دوره کوتاه کاهش می‌یابد. بنابراین انرژی مصرفی توسط این خشک‌کن به نسبت کاهش می‌یابد. انرژی مادون قرمز بدون گرمایش هوای محیط از المنت‌های گرمایی به سطح محصول منتقل می‌شود {۲۵}.

در خشک‌کردن مادون قرمز، هوای محیط اطراف ماده‌ی مرطوب توسط یک دمنده یا مکنده جریان می‌یابد تا ضمن جلوگیری از اشباع شدن سطح ماده از رطوبت، رطوبت خارج شده از ماده را از محیط اطراف ماده خارج کند. این کار سبب می‌شود تا رطوبت برای خارج شدن از ماده با مقاومت کمتری مواجه گردد. روش خشک‌کردن با استفاده از تابش مادون قرمز در بسیاری از مواد شیمیایی، دارویی و غذایی در صنعت و آزمایشگاه به‌منظور تعیین ویژگی‌های خشک‌کردن مواد مختلف کاربرد دارد {۳}.

اگرچه حرارت مادون قرمز یک وسیله حرارتی سریع است و برای خشک‌کردن استفاده می‌شود اما عموماً برای حرارت سطحی استفاده می‌شود. زمانی که از یک دانه با بستر عمیق استفاده می‌شود تغییر زیادی در مقدار رطوبت بستر مشاهده می‌شود. لایه نزدیک به منبع مادون قرمز نسبت به لایه عمیق داخلی بیشتر خشک می‌شود. به‌هرحال این مشکل با به ارتعاش در آوردن محصول به‌نحوی‌که باعث شود همه محصول در معرض اشعه قرار گیرد، قابل‌حل است {۱۳}. در طول فرآیند خشک‌کردن به روش مادون قرمز، نمونه‌ها باید به‌طور مساوی و یکنواخت در کل ظرف از هم تفکیک شوند. در غیر این صورت، بخش زیادی از اشعه مادون قرمز به قسمت‌های پایینی ظرفی که در معرض اشعه قرار گرفته و توسط نمونه‌ها پوشش داده نشده منعکس می‌شود.

خشک‌کن مادون قرمز نسبت به خشک‌کن جابجایی تحت شرایط مشابه خشک‌کردن دارای مزایای زیادی از قبیل بازده انرژی بالا،

نرخ بالای انتقال حرارت و شار حرارتی بالا است، که همه این موارد منجر به کاهش زمان خشک‌کردن می‌شوند و نرخ تبخیر را افزایش می‌دهند. زمانی که از اشعه مادون قرمز برای گرم کردن یا خشک‌کردن استفاده می‌شود اشعه به داخل موادی که در معرض اشعه قرارگرفته‌اند نفوذ کرده و باعث تبدیل انرژی تابش به گرما می‌شود. خشک‌کن مادون قرمز به‌عنوان یک روش بالقوه برای به دست آوردن محصولات غذایی خشک‌شده باکیفیت بالا از قبیل میوه‌ها، سبزی‌ها و دانه‌ها موردبررسی قرار گرفته است {۲۷}.

استفاده از ترکیب اشعه مادون قرمز با سایر خشک‌کن‌ها برای افزایش کیفیت محصولات خشک‌شده از جمله سفتی تکه‌های موز خشک‌شده {۲۲} و برای محصولاتی با رطوبت بالا مؤثرتر می‌باشد {۲۱}.

خشک‌کن ماکروویو

طیف الکترومغناطیسی بین فرکانس‌های ۳۰۰ مگاهرتز و ۳۰۰ گیگاهرتز مربوط به امواج ماکروویو می‌باشد و اثرات گرمایشی که در این گستره فرکانسی روی می‌دهد به گرمایش ماکروویو مشهور است. امواج ماکروویو توانایی عبور از داخل لوله‌های توخالی را نیز دارند و بسته به خواص دی‌الکتریک ماده، این امواج یا منعکس‌شده یا توسط آن جذب می‌شوند و یا بدون آن‌که جذب شوند از ماده عبور کنند. برخلاف سیستم‌های گرمایشی متداول، امواج ماکروویو به داخل ماده غذایی نفوذ کرده و حرارت در تمام ماده غذایی منتشر می‌شود و در نهایت باعث افزایش سرعت گرمایش می‌شوند. امواج ماکروویو در حین تقابل با ماده غذایی حرارت ایجاد می‌کنند. اشعه ماکروویو اشعه غیریونیزه است و به‌کلی با اشعه‌های یونیزه کننده، مانند اشعه ایکس و گاما تفاوت دارد. در اثر تماس اشعه ماکروویو با مواد غذایی، هیچ اثر غیر حرارتی شناخته شده‌ای در مواد غذایی ایجاد نمی‌شود {۹}. در گرمایش ماکروویو، امواج توسط موج رسان به مواد غذایی که در داخل اجاق ماکروویو قرار داده‌شده‌اند، منتقل می‌شوند. این موج رسان‌ها، لوله‌های آلومینیومی هستند که در داخل آن‌ها امواج بازتابش می‌یابند. انرژی جذب‌شده توسط ماده غذایی باعث افزایش دما می‌شود. مکانیسم تولید انرژی در تابش‌دهی توسط ماکروویو از چرخش دوقطبی‌های مولکولی، مولکول‌های قطبی به‌ویژه مولکول‌های آب در ماده غذایی و حرکت ترکیبات یونی در پاسخ به میدان‌های الکتریکی متناوب با فرکانس‌های بالا به وجود می‌آیند. مولکول‌های آب دارای گشتاور دوقطبی هستند یعنی یک انتهای آن‌ها دارای بار مثبت و انتهای دیگر دارای بار منفی می‌باشد. بنابراین مولکول‌ها در یک میدان نوسانی به سرعت، ارتعاش می‌کنند و تلاش می‌کنند خود را در جهت میدان قرار دهند. چرخش دوقطبی منجر به ایجاد گرمای حاصل از اصطکاک می‌گردد که این گرما همراه با گرمای ناشی از مقاومت الکتریکی موجب افزایش دما می‌شود {۸}. در گرمایش ماکروویو، قسمت‌هایی از ماده که مقدار رطوبت بالایی دارند مقدار انرژی بیشتری را جذب می‌کنند. افزایش فشار درونی، رطوبت را از بخش‌های داخلی ماده به سمت سطح می‌راند و در آنجا تبخیر می‌شود. درصورتی‌که تنها از خشک‌کن ماکروویو برای خشک‌کردن استفاده شود ممکن است با توجه به خواص دی‌الکتریک و ترموفیزیکی محصول، گرمایش غیر یکنواخت صورت گیرد و رطوبت بار دیگر بر روی سطح چگالش یابد. این مسئله به‌خصوص زمانی که عملیات فرآوری در فرکانس‌های پایین (که خواص دی‌الکتریک به‌طور قابل‌توجهی به تغییرات دما بستگی دارد) صورت می‌گیرد از اهمیت بیشتری برخوردار است. به این دلیل، برای افزایش آهنگ خشک‌کردن، گرمایش ماکروویو با سایر روش‌های متداول خشک‌کردن ترکیب می‌شود {۱۰}.

از جمله مزایای گرمایش ماکروویو عبارت‌اند از: گرمایش حجمی بالا، بازده حرارتی بالا، زمان خشک‌کردن کم، بهبود کیفیت محصول و افزایش ماندگاری محصول می‌باشد. از معایب آن توزیع غیر یکنواخت دما در گرمایش ماکروویو می‌باشد. ازآنجاکه توزیع غیر یکنواخت دما منجر به کاهش کیفیت محصول می‌شود تلاش‌های بسیاری برای افزایش یکنواختی دما در طول گرمایش ماکروویو شده است. اگر میدان الکتریکی در محفظه یکنواخت نباشد، گرمایش غیریکنواخت رخ می‌دهد. با استفاده از یک پروانه فلزی که تابش را به‌صورت تصادفی بازتاب می‌دهد یا با حرکت دادن ماده غذایی از طریق یک میدان متغیر، می‌توان توزیع یکنواخت‌تری از میدان به دست آورد. تابش به‌وسیله دیواره اجاق بازتاب داده می‌شود و دمای دیواره افزایش می‌یابد و باعث افزایش کارایی اجاق می‌شود {۸}.

خشک‌کن بستر سیال

هرگاه هوا از میان ذرات یک بستر به سمت بالا هدایت شود، در دبی پایین، سیال فقط از بین فضای خالی بین ذرات ثابت عبور می‌کند، در این حالت یک بستر ثابت[۲] به وجود می‌آید که با افزایش دبی جریان، ذرات از هم فاصله گرفته و اندکی مرتعش شده و در ناحیه محدودی به ارتعاش خود ادامه می‌دهند. در این حالت بستر را نیمه سیال[۳] می‌نامند. در نهایت با افزایش بیشتر سرعت سیال، در نقطه‌ای تمام ذرات به‌وسیله حرکت رو به بالای سیال، کاملاً معلق شده و انبساط کامل بستر را خواهیم داشت. به این حالت نیز سیال کامل[۴] گویند. به‌طورکلی هرگونه افزایش در سرعت هوای مورداستفاده، نرخ انتقال حرارت را از هوا به محصول به‌واسطه افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌دهد که خود باعث افزایش نرخ انتشار رطوبت(انتقال جرم) و در نتیجه خشک شدن می‌شود {۲۰}.

سیال‌سازی پدیده‌ای است که در آن، ذرات جامد به‌وسیله یک سیال معلق می‌شوند {۲۰} با توجه به پیشرفت‌های دو دهه اخیر و صدها نوع ماده مختلف که نیاز به خشک‌کردن دارد، نیاز به محصول نهایی متفاوت و اخیراً توجه زیاد به معضل مصرف انرژی انواع معدودی از خشک‌کن‌ها گسترش‌یافته‌اند از این میان خشک‌کن بسترسیال یکی از بهترین گزینه‌ها می‌باشد. خشک‌کن بسترسیال نرخ بالایی در انتقال حرارت و جرم و مخلوط کردن ذرات و جابجایی آسان ذرات به داخل و خارج خشک‌کن ایجاد می‌کند. بنابراین خشک شدن سریع‌تر بوده و سطح مقطع کوچک‌تری موردنیاز است. بعلاوه به علت کم بودن قطعات متحرک مکانیکی هزینه تعمیرات نیز کاهش می‌یابد {۱۲}.

در میان روش‌های جدید خشک‌کردن، خشک‌کن‌های بستر سیال از اهمیت خاصی برخوردارند. از این روش اصولاً برای مواد دانه‌ای استفاده می‌شود. بااین‌حال، از این نوع خشک‌کن‌ها برای خشک‌کردن مواد محلول، خمیری و سیالی نیز استفاده می‌شود. در خشک‌کن‌های بستر سیال هوای داغ از میان ذره‌های دانه‌ای شکل موادی که بر روی صفحه مشبک داخل محفظه قرارگرفته‌اند، عبور داده می‌شود. در این حال سرعت جریان گاز در بین ذره‌ها تعیین‌کننده میزان سیال شدن است، به عبارتی اگر سرعت گاز از سرعت بحرانی سیالی شدن مواد بیشتر باشد به یک حالت شبیه جوشیدن مایع می‌رسد و این همان پدیده سیالی شدن مواد است. زمانی که فشار گاز با نسبت وزن ذره‌ها بر سطح مقطع برابر شود، لایه ذره‌ها شروع به حرکت و سیال شدن می‌کند. در این فشار، ذره‌ها دچار اختلاطی ملایم می‌گردد. سرعت‌های جریان کمتر از این میزان، اختلاط ایجاد نمی‌کند. افزایش سرعت جریان گاز بیشتر از این میزان باعث اختلاط سریع ذره‌ها می‌شود. گاز اضافی نیز به‌صورت حباب از بین ذره‌ها عبور خواهد کرد. ذره‌های باقی‌مانده در گاز سیال کننده ممکن است به‌صورت بادی از اتاق بیرون رود {۳}.

خشک‌کن بستر سیال نسبت به سایر خشک‌کن‌ها مزایایی دارد از قبیل: الف) سیال بودن بستر که باعث می‌شود عملکرد دستگاه حتی زمانی که دبی محصول زیاد است ساده‌تر باشد)، ب) نرخ بالای خشک‌کردن، پ) نرخ بالای انتقال حرارت و جرم و همین امر منجر به کاهش زمان خشک‌کردن می‌شود)، ت) امکان به‌کارگیری سایر منابع انرژی از قبیل قرار دادن صفحات داغ و امکان تولید تشعشع، ث) اختلاط خوب یا یکنواختی مواد در محفظه خشک‌کن، ج) بازده حرارتی بالا باقابلیت کنترل دما به‌طور یکنواخت در داخل بستر و چ) همچنین خشک‌کن بستر سیال به دلایل سهولت در عملیات و نگهداری خشک‌کن و چندین فرآیند ترکیبی از قبیل: مخلوط کردن، تفکیک کردن، خشک‌کردن و سرد کردن قابل‌استفاده می‌باشد.

این نوع خشک‌کن‌ها دارای معایبی نیز هستند از قبیل: افت فشار بالا، ساییدگی مواد جامد و سایش محتوای سطوح.

خشک‌کردن بستر سیال مواد جامد می‌تواند به دو صورت مداوم و غیر مداوم باشد. نوع غیر مداوم برای مواد کوچک و کم و همچنین

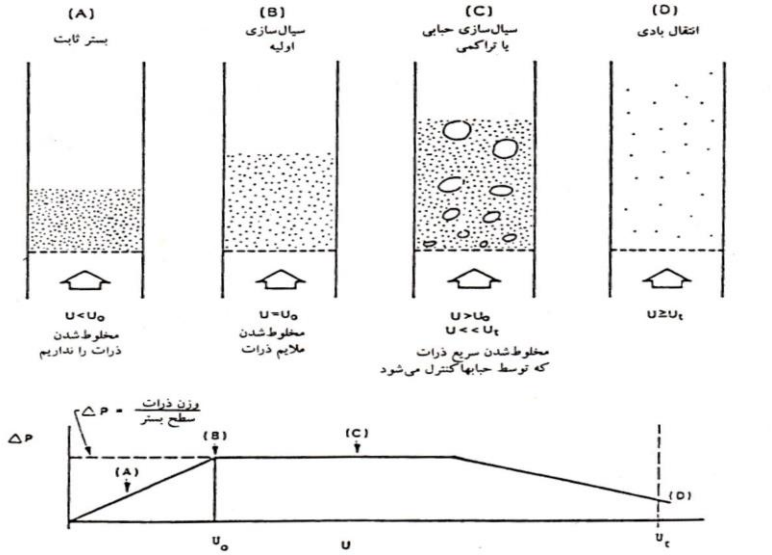
---

[2] Fixed Bed
[3] Semi- Fluidized
[4] Complete Fluidization

برای مواد حساس به حرارت استفاده می‌شود. در این نوع خشک‌کن شرایط فرآیند به‌راحتی انتخاب می‌شود و به علت همگن بودن بستر در هر لحظه در طول فرآیند خشک‌کردن کیفیت محصول یکنواخت است. اگر مقدار مواد زیاد باشد از خشک‌کن‌های مداوم استفاده می‌شود و این خشک‌کن‌ها شامل دو قسمت است: الف) خشک‌کن‌های با جریان مواد به‌طور کاملاً مخلوط (برای موادی که به‌راحتی شناور نمی‌شوند به کار می‌رود در این نوع مواد با توزیع یکنواخت روی سطح‌فعال بستر ریخته شده و با مواد خشک‌شده داغ مخلوط و سریعاً خشک می‌شوند)، ب) خشک‌کن‌های با جریان مواد تقریباً پیستونی برای موادی که به‌راحتی شناور می‌شوند به کار می‌رود یا برای موادی که مقدار رطوبت نهایی آن‌ها باید به‌صورت یکنواخت باشد {۲۸}.

نظریه خشک‌کردن بسترسیال

ذره‌های دانه‌ای شکل درون اتاقک به‌وسیله‌ی یک گاز داغ مانند هوا به‌صورت سیال درمی‌آید.گاز از میان ذره‌ها عبور می‌کند. در این حالت سرعت جریان گاز در بین ذره‌ها تعیین‌کننده‌ی میزان سیال‌شدن است. این موضوع به‌صورت نمودار هندسی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- منطقه‌های سیال شدن گاز: U سرعت گاز، U_0 سرعت اولیه یا شروع سیال شدن، ، U_t سرعت حد و ΔP افت فشار در طول بستر می‌باشد.

هنگامی که فشار گاز معادل نسبت وزن ذره‌ها بر سطح مقطع برج شود، لایه‌ی ذره‌ها شروع به حرکت و سیال‌شدن می‌کند. در این فشار، ذره‌ها دچار فشاری اختلاطی ملایم می‌گردد. سرعت‌های جریان کمتر از این میزان اختلاط ایجاد نمی‌کند. افزایش سرعت جریان گاز بیشتر از این میزان باعث اختلاط سریع ذره‌ها می‌شود. گاز اضافی نیز به‌صورت حباب از بین ذره‌ها عبور خواهد کرد. ذره‌های باقی‌مانده در گاز سیال‌کننده ممکن است به‌صورت بادی[5] از اتاقک بیرون رود. ویژگی‌های ذره‌های قابل خشک شدن در این روش را فهرست کرده است که در زیر می‌آید {۱۸}:

۱) متوسط اندازه‌ای ذره‌ها باید میان μm۲۰ تا mm۱۰ باشد تا از کانالیزه شدن جزیان سیال و لخته شدن جلوگیری شود. ذره‌های کوچکتر از μm۲۰ به علت داشتن سطح زیاد، به هم چسبیده و لخته‌سازی می‌کند.

۲) توزیع اندازه‌ی ذره‌ها باید باریک باشد تا از سیال‌شدن تمامی آن‌ها و از دست رفتن جزء کوچکی درنتیجه‌ی باقی ماندن در گاز

[5] Pneumatic

خروجی[6]، اطمینان حاصل شود.

۳) به‌منظور سیالب‌شدن بهتر ذره‌ها و به‌ویژه ذره‌های بزرگ‌تر، بهتر است ذره‌ها شکل کروی داشته باشد.

۴) چنانچه هرگونه لخته‌ای در ماد در حال سیال‌شدن وجود داشته باشد، باید بلافاصله در داخل خشک‌کن شکسته شود تا سیالیت در داخل بستر باقی بماند.

۵) ذره‌ها باید به‌اندازه‌ی کافی مقاومت داشته تا در اثر شدت اختلاط در بستر شکسته و خرد نشود.

۶) محصول نهایی نباید در دمای خروجی از بسترسیال چسبنده باشد.

انواع خشک‌کن‌های بسترسیال

۱) بسترسیال لرزنده[7]

اگر محصولی که باید خشک شود به علت آن‌که ذره-ها توزیع پهنی دارد، یا ذره‌ها به علت مقاومت کمی که دارد می‌شکند یا چسبنده و گرمانرم[8] است و در خشک‌کن بسترسیال استاندارد سیال نمی‌شود، یک بسترسیال شده از طریق لرزاندن برای بهتر خشک شدن ماده‌ی غذایی به‌کاربرده می‌شود.

سرعت هوای عبور کننده از داخل بستر می‌تواند تا ۲۰٪ کمترین سرعت سیال‌شدن باشد. از لرزش برای انتقال ذرات بزرگ‌تر نیز استفاده می‌شود. لرزش موجب انتقال آرام‌تر مواد در مقابل اختلاط شدید در خشک‌کن‌های سیال کننده ثابت را به وجود می‌آورد. خشک-کن‌های بستر سیال لرزان معمولاً محصولاتی از قبیل شیر، آب‌پنیر[9]، کاکائو و قهوه را خشک می‌کند.

۲) بسترسیال گرانوله کننده[10]:

دومین شکل خشک‌کن‌های بستر سیال تغییر یافته، بسترهای سیال گرانول‌ساز می‌باشد. در این خشک‌کن، یک مایع پیوند دهنده را به داخل بستر سیال شده می‌پاشند، و به این ترتیب باعث متراکم شدن و به هم چسبیدن ذره‌ها می‌شوند. این نوع خشک‌کن بسترسیال معمولاً ناپیوسته است گرچه برخی واحدهای فعال پیوسته نیز وجود دارد {۴}. که شامل خشک‌کردن، سدکردن، واکنش نشان دادن، انباشتگی و روکش کردن می‌باشد.

۳) خشک‌کن‌های بستر فواره‌ای[11]:

چنانچه اندازه‌ی ذره‌هایی که باید خشک شود از ۵ mm بزرگ‌تر باشد و به‌سادگی در یک خشک‌کن بستر روان معمولی سیال نشود، از یک خشک‌کن بستر سیال فواره‌ای بهره‌گیری می‌شود. هوای خشک‌کننده از مرکز یک مخروط و در انتهای پایین اتاقک وارد آن می‌شود و باعث حرکت ذره‌ها به‌گونه‌ای چرخشی در خشک‌کن می‌شود. آن‌ها در مرکز اتاقک به سمت بالا حرکت می‌کند و در دیواره‌ها که سرعت هوا کمتر است، ذره‌ها به سمت پایین سقوط می‌کند. فایده‌ی این‌گونه خشک‌کن‌ها، اختلاط خوب جامد و سرعت انتقال حرارت مناسب است. خشک‌کن‌های فواره‌ای، به‌خوبی خوراک‌های حساس به حرارت، مانند گونه‌های نخود و گندم را خشک کرده است.

۴) خشک‌کن بستر سیال راه‌اندازی شده به روش مکانیکی۱۲:

ترکیبی از خشک‌کن آنی و خشک‌کن بسترسیال، برای خشک‌کردن کیک‌های تازه برای صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی به کار می-

---

[6] Entrainment
[7] Vibrated Fluid Bed
[8] Thermoplastic
[9] Whey
[10] Fluid Bed Granulation
[11] Spouted Bed Dryer
[12] Mechanically AGITATED fluid – bed Dryer

رود. کیک تازه یا نمدار، مستقیماً، از راه نقاله مارپیچی، به درون خشک‌کن فرستاده می‌شود. همین‌که در اتاقک خشک‌کن، یک راه‌انداز مکانیکی، تکه‌ها را خرد می‌کند هوایی برای سیال کردن ذره‌های کوچک پدید می‌آید. ذره‌های خشک‌شده به روش سیال کردن به سمت خروجی دستگاه رانده می‌شود{۱۸}. خمیر رنگ مایه‌ها و رنگ‌دانه‌هایی که به روش صنعتی خشک‌شده است از این روش بهره‌گیری کرده است {۴}.

۵) خشک‌کن‌های بسترسیال گریز از مرکز (سانتریفیوژال):

خشک‌کردن سریع خوراک‌های چسبناک دارای رطوبت فراوان به‌وسیله‌ی خشک‌کن‌های بسترسیال گریز از مرکز انجام می‌گیرد. سبزی‌های خرد، تکه‌تکه و برگه‌برگه شده‌ای که به دشواری سیال می‌شود و حساسیت بالایی به حرارت دارد تا در خشک‌کن‌های انتقالی خشک شود نیز در این‌گونه خشک‌کن‌ها، خشک می‌شود. خشک‌کن‌های استوانه‌ای، هنگامی که هوا از دیواره‌ی سوراخ‌سوراخ آن به درون اتاقک رانده می‌شود، دارای چرخشی افقی است. جسم‌های جامد، همچنان که خشک‌کن می‌چرخد یک‌درمیان لابه‌لای بسترسیال و بسترایستا، قرار می‌گیرد {۱۸}.

۶) خشک‌کن افشانه‌ای سیال شده[۱۳]:

یک روش دیگر برای خشک‌کردن مواد نم‌گیر و مواد غذایی که در نتیجه گرم شدن نرم می‌شود، استفاده از خشک‌کن افشانه‌ای سیال شده است. اتاقک خشک‌کن بسترسیال به‌طور مستقیم در مسیر اتاقک خشک‌کن افشانه‌ای سوار می‌شود. هوای سیال‌کننده به سمت پایین اتاقک خشک‌کن وارد می‌شود. مخلوط ذره‌های خشک و نیمه‌خشک به ذره‌ها اجازه‌ی چسبیدن به یکدیگر را می‌دهد. ذره‌های کوچکتر که در هوای خروجی از سیستم باقی‌مانده به داخل خشک‌کن بازگردانده می‌شود. این ترکیب خشک‌کن افشانه‌ای و خشک‌کن سیال موجب تولید ذره‌های محصول اگلومره (انباشته) می‌شود و چگالی حجمی کم و خواصی کاری مطلوب را در ماده‌ی غذایی ایجاد می‌کند{۱۸}.

یافته‌ها و بحث

خشک‌کردن محصولات کشاورزی جزء فعالیت‌هایی به شمار می‌رود که انرژی زیادی مصرف می‌کند. در میان روش‌های جدید خشک‌کردن، روش بسترسیال از اهمیت خاصی برخوردار است {۲}. علیرغم مزایای استفاده از روش‌های قدیمی در فرایند خشک‌کردن، این روش‌ها دارای معایبی از قبیل عدم کنترل کافی در فرایند خشک‌کردن، طولانی بودن زمان خشک شدن و غیربهداشتی بودن محصول خشک‌شده هست. این معایب نیاز به خشک‌کن‌های صنعتی را آشکار می‌سازد. مهم‌ترین نوع خشک‌کن‌های صنعتی، خشک‌کن بسترسیال هست. این نوع خشک‌کن‌ها نیز دارای معایبی نظیر ایجاد سوختگی سطحی در محصول، بالا بودن مدت‌زمان خشک شدن و همچنین بالا بودن انرژی مصرفی هست {۱۴}. به علت معایب برخی خشک‌کن‌های صنعتی و همچنین ضرورت راندمان بهره‌وری از انرژی در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی خشک‌کن‌های خلائی، انجمادی، مادون‌قرمز، ماکروویو و خشک‌کن‌های ترکیبی مانند: مادون قرمز-جریان هوای گرم و ماکروویو-جریان هوای گرم صورت گرفته است {۵}.

همچنین استفاده از خشک‌کن ترکیبی می‌تواند سهم قابل‌توجهی در کاهش مصرف انرژی در بخش کشاورزی و مناطق روستایی داشته باشد. از طرف دیگر با توجه به بالا بودن شدت مصرف انرژی در ایران‌که مقدار آن ۵/۴ برابر متوسط مقدار جهانی است {۱}. راه‌کارهایی برای کاهش مصرف انرژی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در بخش‌های مختلف کشور (خانگی، صنعت، کشاورزی و ...) باید ارائه شود. بنابراین این امر، اهمیت موضوع را بیش‌ازپیش موردتوجه قرار می‌دهد.

[13] Fluidized Spray Dryer

نتیجه‌گیری

بنابراین با توجه به موارد فوق امروزه استفاده از خشک‌کن‌های ترکیبی از نظر راندمان مصرف انرژی و بازدهی، بهتر از روش‌های دیگر خشک‌کردن خواهد بود.

مراجع

۱. امیری چایجان، ر.، خوش تقاضا، م. ه.، و امیری پریان، ج. ۱۳۸۶ . برآورد متغیرها و بررسی اهمیت عوامل مؤثر در فرایند خشک شدن بستر ثابت شلتوک به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله پژوهش‌های صنایع غذایی، جلد ۱۹ ، شماره ۱، ص ۷۳-۵۵.

۲. پهلوانزاده، ح. ۱۳۷۷ .خشک‌کردن :اصول، کاربرد و طراحی. تألیف سزلا استرامیلو و تادیوز کودرا چاپ اول . انتشارات دانشگاه تربیت مدرس 455 .ص.

۳. توکلی پور، حمید (۱۳۸۸) اصول خشک‌کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی, چاپ دوم. انتشارات آییژ، ۳۲۸ صفحه

۴. توکلی‌پور، ح. ۱۳۸۰ . اصول و روش‌های خشک‌کردن مواد غذایی، تهران: آییژ ۱۳۸۰ ده، ۱۷۶ص.

۵. حاضروظیفه، ا.، نیکبخت، ع.م.، احمدی مقدم، پ.، فوج لعلی، م.، ۱۳۹۱. طراحی، ساخت و ارزیابی خشک‌کن ترکیبی ماکروویو و جریان هوای گرم. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران، شیراز. دانشگاه شیراز.

۶. شریفی، محمد (۱۳۸۶) بررسی مدل‌های خشک‌کردن و مقایسه زمان و انرژی مصرفی در شرایط مختلف خشک‌کردن ورقه پرتقال رفم تامسون ."پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده مهندسی بیوسیستم دانشگاه تهران

۷. فلاحی، مسعود (۱۳۷۶) تکنولوژی فرآوری مواد غذایی مقدمه‌ای بر ماشین‌آلات، چاپ اول، تألیف فلاوز، پ. ج. انتشارات بارثاوا، ۵۱۰ صفحه

۸. قنبرزاده، بایک (۱۳۸۶) ویژگی‌های فیزیکی مواد غذایی و سیستم‌های فرآوری غذایی، چاپ اول .تألیف: جان لوئیس، م. انتشارات آییژ، تهران. ۵۲۰ صفحه

۹. مرتضوی، سید علی، سیف گردی، علی اکبر، محمدی نافچی، عبدالرضا و نوری، لیلا (۱۳۷۸) اصول مهندسی صنایع غذایی، چاپ پنجم، تألیف سینگ، آ، آرهلدمان، د. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، شماره ۲۴۵، ص۴۱۶

10. Abbasi Souraki, A., Andrés, A. and Mowla, D. (2009) “Mathematical modeling of microwave-assisted inert medium fluidized bed drying of cylindrical carrot samples”. Chemical Engineering and Processing 48(1): 296-305.
11. Barbosa canovas, G.V. Vega Mercado, H. (1997), Dehydration of Foods. Chapman and Hall.
12. Daud, W. R. W., (2008), Fluidized bed dryers – recent advances., Advanced Powder Technology, 19, 403–418
13. Das, I., Das, S.K. and Bal, S. (2009) “Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared(IR) drying”. Journal of Food Engineering 95(1): 166-171.
14. Das, I., Das, S. K. and Bal, S., (2004). Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. Journal of Food Engineering. 68: 249-255.
15. Dimattia,D, G., Amyotte, P. R. and Hamdullahpur, F. (1996). Fluidized bed drying og large particles. Transaction of the ASAE. 39 (5), 1745-1750.

16. Guine, R.P.F., Pinho, S.and Barroca, M.J. (2011) “Study of the convective drying of pumpkin (Cucurbita maxima)”. Food and Bioproducts Processing 89(4): 422-428.
17. Hazervazifeh, A., Nikbakht, A. M. and Moghaddam, P. A., (2016), Novel hybridized drying methods for processing of apple fruit: Energy conservation approach, Energy, 103, 679-687.
18. Hovmand, S. 1987. Fluidized bed drying. In Handbook of Industrial Drying, (A. S. Mujumdar eds). Marcel Dekker, NY, USA.
19. Krill, L. and Schmitt, W. (1997). Sugar drying and cooling in a fluidized bed drier. Zucker Indusrie. 122 (8), 585-603.
20. Kunii, D. and Levenspiel, O. (1991). Fluidization engineering. Stoneham: Butterworth-Heinemann, U. S. A.
21. Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T. and Soponronarit, S (2004). “Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying”. Journal of Food Engineering 65(2): 293-301.
22. Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T. and Soponronnarit, S. (2007) “Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation”. Journal of Food Engineering 81(3): 624-633.
23. Pan, Z., Shih, C., McHugh, T.H. and Hirschberg, E. (2008) “Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying”. LWT-Food Science and Technology 41(10): 1944-1951.
24. Ruiz Celma, A., Rojas, S. and Lopez-Rodríguez, F. (2008) “Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk”. Chemical Engineering and Processing 47 (9-10): 1810-1818.
25. Sharma, G.P., Verma, R.C. and Pathare, P.B. (2005) “Thin-layer infrared radiation drying of onion slices”. Journal of Food Engineering 67 (3): 361-366.
26. Tireki, S., Şumnu, G. and Esin, A. (2006) “Production of bread crumbs by infrared-assisted microwave drying”. European Food Research and Technology 222 (1-2): 8-14.
27. Toğrul, H. (2006) “Suitable drying model for infrared drying of carrot”. Journal of Food Engineering 77 (3): 610-619.
28. Topuz, A., Gur, M. and Zafer Gul, M. (2004) “An experimental and numerical study of fluidized bed drying of hazelnuts”. Applied Thermal Engineering 24 (10): 1535-1547.
29. Umesh Hebbar, H., Vishwanathan, K.H. and Ramesh, M.N. (2004) “Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables”. Journal of Food Engineering 65 (4): 557-563.

Investigation of types of fluidized bed dryers and thermal methods

Mohsen Naseri[1*], Vali Rasooli Sharabian[2], Ebrahim Thanginejhad[3], Mohammad Kaveh[4]

1. MSc Student in Department of Biosystem Engineering, University of Mohaghegh Ardabili
2. Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, University of Mohaghegh Ardabili
3. Assistant Professor in Department of Agricutural Machinery, Moghan Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili
4. PhD Student in Department of Biosystem Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

Abstract

Drying of crops is one of the oldest and yet the most widely used processes to protect food against corruption, which results in reduced microbial activity, enzymatic activity, and deceleration of post-harvest chemical interactions, while reducing the moisture content of the crop to a safe level which increases shelf life and decreases the volume and weight of packaging materials, it facilitates their transportation and storage. The oldest and most common method for drying crops is drying in the sun and in the open air, this is a cheap and easy method due to the use of sun and wind as energy sources, but due to the slow and time consuming process, product exposure to environmental pollution, unstable weather conditions, insect infestation, dust and also the need for large labor force is an inefficient method. In order to improve production quality and speed up the drying process and to save time and cost, the drying and wind flow drying methods should be replaced with industrial methods. Among the new methods of drying, the fluidized bed method has a special importance. This method is mainly used for drying grain materials. The uniform distribution of moisture throughout the bed, high degree of heat and mass transfer between hot air and particles, proper mixing and easy transfer of particles are positive results of using fluidized bed system for drying.

Key words: Dryer, Fluidized bed, Combined dryer.

*Corresponding author
E-mail: mnaseri@student.uma.ac.ir