

طراحی، ساخت و بررسی عملکرد سیستم خشک کن بستر جهنده

محسن زندی^{۱*}، مهرداد نیاکوثری^۲، محمد هادی اسکندری^۲، محمد سرشار^۲

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* نویسنده مسئول (mohsen.zandi@hotmail.com)

۲- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۳- استادیار گروه فرآوری مرکز تحقیقات مهندسی فارس

چکیده

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۸/۲۹

واژه‌های کلیدی

افت فشار

خشک کردن

خشک کن بستر جهنده

دبی هوا

ذرات خنثی

مصرف انرژی

هدف اصلی از این پژوهش طراحی و ساخت سیستم خشک کن جدیدی تحت عنوان بستر جهنده جهت خشک نمودن مواد غذایی (خصوصاً مواد غذایی حساس به حرارت) می باشد. به این منظور در گام اول، طراحی ابتدایی از خشک کن بستر جهنده بر اساس دو اصل مهم کارایی بالای سیستم در خشک کردن مواد غذایی و نیز انعطاف پذیری آن برای خشک کردن مواد غذایی مختلف در حالت جامد و مایع، ایجاد گردید. پس از ساخت دستگاه و انجام آزمون دستگاه بدون حضور مواد غذایی، آزمایش‌هایی نظیر بررسی نحوه حرکت ذرات خنثی، تعیین افت فشار و میزان مصرف انرژی انجام پذیرفت و بهینه شرایط سیستم برای ذرات خنثی با دو اندازه (۷/۸ و ۵/۸ میلی متری) تعیین گردید. نتایج نشان می دهد که تغییرات افت فشار در محفظه خشک کن حاوی ذرات خنثی مشابه معادله ارگان است. مصرف انرژی نیز در این سیستم در محدوده ۳-۸ کیلو وات در ساعت متغیر می باشد. نتایج همچنین مشخص نمود که سیستم خشک کن طراحی شده مصرف انرژی به مراتب کمتر از سیستم خشک کن پاششی در خشک کردن مایعات غذایی دارد. نتایج این تحقیق امکان استفاده از خشک کن جدید طراحی شده را به عنوان، تکنیکی اقتصادی در خشک کردن مواد غذایی حساس به حرارت نشان می دهد.

مقدمه

جامدات و مایعات حساس به حرارت نظیر مواد غذایی، داروها و پلاستیک‌ها استفاده کرد. این تکنیک یک روش سیالیت ذره بوده که عمدتاً برای ذراتی که قطری بین ۱ تا ۶ میلی متر دارند بکار برده می شود. استفاده از این تکنیک برای مایعات غذایی به سبب چسبندگی پودر به دیواره و کلوخه‌ای شده ذرات دارای محدودیت‌هایی است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها و کنترل آن‌ها داشتن اطلاعات جامعی از نیروهای بین ذره‌ای و اثر آن‌ها بر رفتار بستر جهنده، لازم می باشد (Mujumdar, Bancelos et al., 2007)

تکنیک بستر جهنده برای نخستین بار توسط دو دانشمند کانادایی با نام‌های Mathor and Gishler به عنوان جایگزینی برای روش بستر سیال مطرح گردید (Duarte et al., 2009). بستر جهنده به تنهایی برای مواد جامد قابل کاربرد بوده و با بکار بردن ذرات خنثی می توان از آن برای خشک کردن خمیرها، دوغاب‌ها و ترکیبات حساس به حرارت به طور موفقیت آمیزی استفاده نمود. به سبب زمان ماند کم ماده غذایی در بستر می توان از این خشک کن جهت خشک نمودن

ایجاد شد. Passos و Mujumdar (۲۰۰۰) تاثیر نیروهای پیوستگی بر بستر سیال و جهنده ذرات مرطوب را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ابتدا خشک‌کن بستر جهنده ای طراحی گردید. این تحقیق از طریق آنالیز تفاوت رفتار جریان ذرات خشک و مرطوب در بستر سیال و جهنده صورت پذیرفت. تحقیقات نشان داد که استفاده از موادی نظیر گلیسرول سبب افزایش چسبندگی سطحی در این خشک‌کن‌ها می‌گردد. Prachayawarakorn و همکاران (۲۰۰۶) خصوصیات انتقال حرارت را در یک خشک‌کن بستر جهنده مورد ارزیابی قرار دادند. به این منظور پس از طراحی خشک‌کن بستر جهنده با ویژگی‌های مورد نظر، از سه محصول کشاورزی برنج قهوه‌ای، ذرت و لوبیای سویا استفاده گردید. این محققان توانستند معادلات ضرایب انتقال حرارت را برای دو منطقه موجود در خشک‌کن بستر جهنده ایجاد نمایند.

نتایج بررسی تحقیقات پیشین نشان داد که تقریباً تمامی سیستم‌های خشک‌کن بستر جهنده‌ای طراحی و ساخته شده عمدتاً تنها قابلیت خشک کردن مایع یا جامد را دارند. از سوی دیگر تنها تعداد اندکی پژوهش بر روی طراحی سیستم بستر جهنده‌ای جهت خشک کردن مایعات غذایی انجام شده است. نکته قابل توجه دیگر این بوده که تاکنون مطالعه‌ای بر روی تعیین مقدار مصرف انرژی، مقایسه مصرف انرژی با سایر خشک‌کن‌ها، تعیین نحوه حرکت ذرات در بستر و تغییرات فشار در قسمت‌های مختلف خشک‌کن بستر جهنده صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش اولاً طراحی و ساخت نوعی از سیستم بستر جهنده با طراحی خاص بوده تا از یک سو امکان استفاده همزمان برای مایعات و جامدات غذایی را داشته باشد و از سوی دیگر برای خشک کردن مایعات غذایی حساس به حرارت کاملاً بهینه گردیده باشد. در نهایت هدف دیگر بررسی نحوه حرکت ذرات خنثی، تعیین افت فشار و میزان مصرف انرژی و نیز بهینه شرایط سیستم برای ذرات خنثی با دو اندازه ذره مختلف می‌باشد.

(2007). طراحی و کنترل موفقیت آمیز بستر جهنده نیازمند اطلاعات قوی در زمینه دینامیک سیستم و رفتار هر فاز می‌باشد. مطالعات تئوری حرکت گاز و مواد جامد در بستر جهنده توسط برخی از محققان انجام شده است (Liang-Wan & Jie-min, 2010). بستر جهنده به سه منطقه مختلف: فضای بین دوایر متحدالمرکز حاصل از جریان هوا یا منطقه حلقوی، منطقه پرش و منطقه فواره طبقه‌بندی می‌گردد. مکانیسم حرکت ماده جامد درون بستر جهنده هنوز به طور کامل مشخص نشده است. دانستن الگوی جریان ماده در بستر جهنده برای طراحی آن ضروری می‌باشد. به سبب وجود تعداد زیادی از ذرات درون بستر جهنده، مشاهده نحوه حرکت ذره کاری دشوار است (Duarte *et al.*, 2009). در بستر جهنده گردش مداوم ماده در حال خشک شدن، در بین سه منطقه حلقوی، پرش و فواره صورت می‌پذیرد. ذرات در منطقه پرش به سبب جریان بسیار سریع گاز، به سمت بالا پرتاب شده و فوران را پدید می‌آوردند. در انتها ذرات به سطح حلقوی موجود در بستر می‌افتند. در فضای بین دوایر متحدالمرکز حاصل از جریان هوا یا منطقه حلقوی ذرات یک بستر توده‌ای را ایجاد نموده و ذراتی که سقوط نموده‌اند با جریان کمی به نقطه پرش منتقل می‌شوند. اختلاط شدید ذرات در دو منطقه پرش و فوران که تراکم ذرات کم بوده، اتفاق می‌افتد در حالیکه تماس گاز و ذرات جامد در منطقه حلقوی صورت می‌پذیرد (Duarte *et al.*, 2009).

در سال‌های اخیر تحقیقاتی به منظور مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف خشک‌کن بستر جهنده بر روی فرایند خشک شدن صورت گرفته است. ویژگی‌های جریان در بستر جهنده مکعب مستطیلی شکل توسط Anabtawi و همکاران در سال ۱۹۹۲ مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق پس از طراحی نوع خاصی از خشک‌کن بستر جهنده با ویژگی‌های مورد نظر، مطالعات هیدرودینامیکی برای پنج ماده غذایی مختلف شامل گندم، بلغور، جو، گشنیز و فلفل سیاه صورت گرفت و روابط جدیدی برای پیشگویی حداقل سرعت جهش در سیستم خشک‌کن بستر جهنده

مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت سیستم خشک‌کن بستر جهنده

پس از انجام مطالعات کتابخانه‌ای، طراحی جدیدی از خشک‌کن بستر جهنده صورت پذیرفت تا علاوه بر رفع مشکلات سیستم‌های طراحی شده در تحقیقات پیشین، کارایی و انعطاف‌پذیری آن نیز بهبود داده شود. هدف، ساخت دستگاهی برای خشک کردن مایع با دبی ۱-۲ لیتر در ساعت و خشک کردن مواد جامد با ظرفیت‌های مختلف بود.

در تمامی خشک‌کن‌های طراحی شده در تحقیقات گذشته، شکل محفظه خشک‌کن مخروطی-استوانه‌ای یا مکعبی است. (Prachayawarakorn *et al.*, 2006; Abdul Salam and Bhattacharya, 2006; Bancelos & Freire, 2008). در این پژوهش برای نخستین بار طراحی جدیدی از نوع مخروطی-استوانه‌ای با تقارن دو طرفه برای ساخت محفظه خشک‌کن ایجاد شد (شکل ۱ الف و ب)، که در آن خروج هوا و پودر به سبب مخروطی بودن قسمت خروجی محفظه خشک‌کن با سهولت بهتری انجام

پذیرفته و از ایجاد اختلال در جریان هوای داخل محفظه جلوگیری می‌گردد. تمامی قسمت‌های محفظه خشک‌کن از جنس فولاد ضد زنگ (۳۰۴L) بود. از هوای تولیدی توسط فن برای ایجاد حالت جهنده در ذرات موجود در محفظه خشک‌کن استفاده گردید که با بررسی‌های تجربی به عمل آمده دمنده‌ای با ظرفیت هوادهی ۲۰۰ متر مکعب بر ساعت به کار گرفته شد. با محاسبات انجام شده، هیتری با توان ۶ کیلو وات به عنوان منبع حرارتی هوای ورودی استفاده گردید.

رابطه (۱)

$$W_{\text{air}}(\text{kg}) = \rho_{\text{air}}(\text{kg}/\text{m}^3) \times V_{\text{air}}(\text{m}^3)$$

چگالی هوا × حجم هوا = وزن هوا

$$= 0.055 \times 1293 = 71.183$$

رابطه (۲)

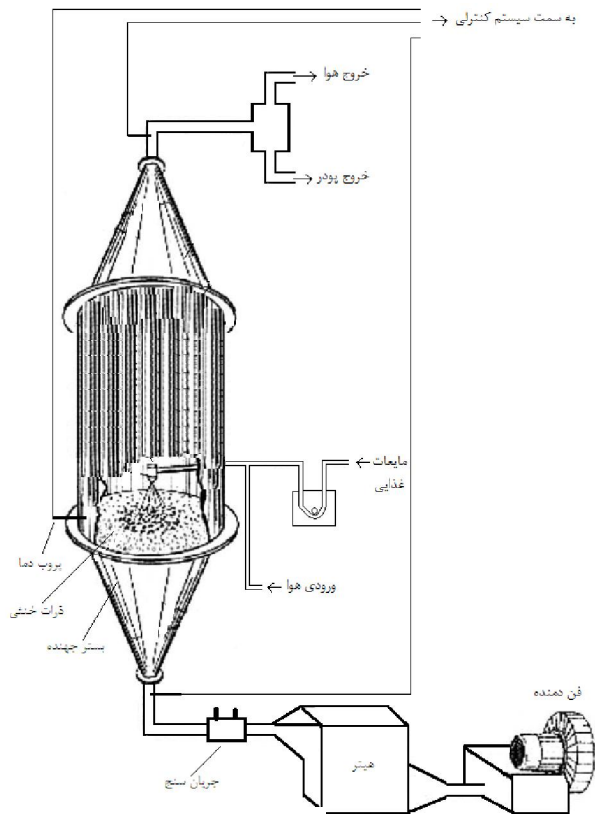
$$Q = mcp\Delta T$$

$$= 71.183 \times 1/0.12 \times (95 - 20) = 5452(\text{j/s})$$

$$= 5/4 (\text{kW})$$



ب



الف

شکل ۱- (الف) نمایی از سیستم بستر جهنده طراحی شده، (ب) محفظه خشک‌کن طراحی شده (ابعاد روی شکل همه بر حسب میلی‌متر می‌باشد)

خنثی) در مجموعه ذرات خنثی قرار داده شد و مدت زمان رویت تا محو شدن آن اندازه‌گیری گردید. این عمل با تکرار زیاد انجام گرفت تا زمان چرخش کامل ذره در بستر با حداقل خطا حاصل آید.

اندازه‌گیری مصرف انرژی

برای محاسبه میزان مصرف انرژی خشک‌کن بستر جهنده، ابتدا کنتوری در مسیر هیترها قرار گرفته و میزان مصرف انرژی برای مدت ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری شد. مقدار حاصله پس از تبدیل به مقدار مصرف در یک ساعت با میزان مصرف انرژی فن (۳ کیلو وات) جمع گردید تا مقدار کل مصرف انرژی سیستم به دست آید. علاوه بر این با بهره‌گیری از فرمول ۲، میزان مصرف انرژی هیترها به صورت تئوری برای شرایط مختلف (از نظر دبی حجمی هوا و دما) اندازه‌گیری شد و با مقداری که از کنتور به دست آمده بود، مقایسه گردید.

تجزیه و تحلیل آماری

برای انجام آنالیز آماری داده‌ها و بررسی اطلاعات حاصل از آزمایش‌های مختلف، از طرح کاملاً تصادفی استفاده گردید. آزمون‌ها حداقل در چهار تکرار انجام شد و سپس میانگین و انحراف معیار داده‌ها به دست آمد. آنالیز واریانس برای بررسی اختلاف معنی‌دار در سطح $p < 0.05$ به کار برده شد. به منظور تعیین اختلاف بین میانگین اعداد، پس از آنالیز واریانس از آزمون دانکن استفاده گردید. در تمام مراحل تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، نرم افزار آماری SPSS 16 به کار گرفته شد.

نتایج و بحث

بررسی تغییرات افت فشار

همان طور که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌گردد در محفظه خالی از ذره، افت فشار با مجذور سرعت هوا ارتباط داشته و همان طور که انتظار می‌رفت با افزایش دبی هوا، افت فشار نیز افزایش پیدا می‌کند. با اضافه شدن ذرات خنثی، افت فشار بین قسمت ورودی و میانی تا یک دبی حجمی خاص افزایش می‌یابد. دبی حجمی که افت فشار در آن حداکثر بوده

به منظور پاشش مایعات غذایی در بستر، از دو نوع افشانک دو سیاله و فشاری استفاده شد. افشانک دو سیاله با کمک یک جریان هوا (با فشار ۱/۵-۱ بار) و با استفاده از یک پمپ پریستالتیک مایعات را پاشش نموده در حالی که افشانک فشاری برای پاشش از یک پمپ سانتریفوژی کمک می‌گیرد. برای خشک کردن مایعات از ذرات خنثی به عنوان سطح مجازی استفاده گردید که باعث افزایش سطح خشک کردن از یک سو و افزایش انتقال حرارت از سوی دیگر می‌شوند (که امکان استفاده از دماهای پایین را فراهم می‌آورد). به این منظور ذراتی با جنس پلی اتیلن در دو قطر ۵/۸ و ۷/۸ میلی‌متر و دانسیته حجمی به ترتیب ۱/۱۶ و ۱/۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب به عنوان مناسب‌ترین ذره موجود انتخاب شد. برای جمع‌آوری پودر تولیدی در سیستم بستر جهنده از کیسه فیلتر استفاده گردید. از آن جایی که بر اساس محاسبات انجام شده سرعت هوای تولیدی توسط دمنده برای خروج پودر از محفظه کافی به نظر می‌رسد، از این‌رو قرار دادن فن مکنده در طراحی سیستم ضرورتی ندارد. سیستم طراحی شده به منظور کنترل و نمایش دما به حسگرهای دمایی تیپ کا تجهیز گردید.

تعیین افت فشار محفظه خشک‌کن

برای تعیین روند تغییرات افت فشار از مانومتر استفاده گردید. برای این کار لوله‌های دو سر مانومتر به قسمت ابتدایی و انتهایی محفظه خشک‌کن وصل گردید و اختلاف ارتفاع آب در دو بازوی لوله مانومتر اندازه‌گیری شد. با قرار دادن این اختلاف ارتفاع در فرمول ۳ افت فشار اندازه‌گیری شد. بر اساس این فرمول افت فشار با داشتن اختلاف ارتفاع اندازه‌گیری شده در مانومتر، دانسیته آب و شتاب گرانشی بدست می‌آید. افت فشار حاصل بر حسب پاسکال است (Mujumdar, 2006).

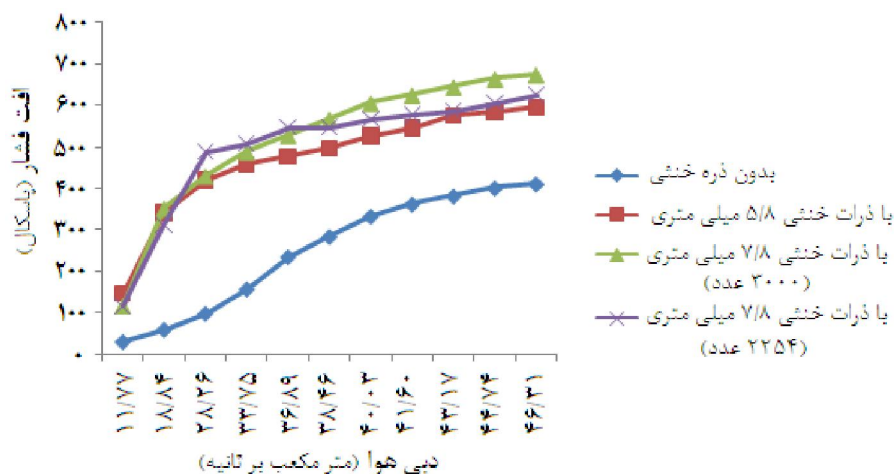
$$\Delta p = \rho \times g \times \Delta h \quad (3)$$

تعیین سرعت چرخش ذرات خنثی

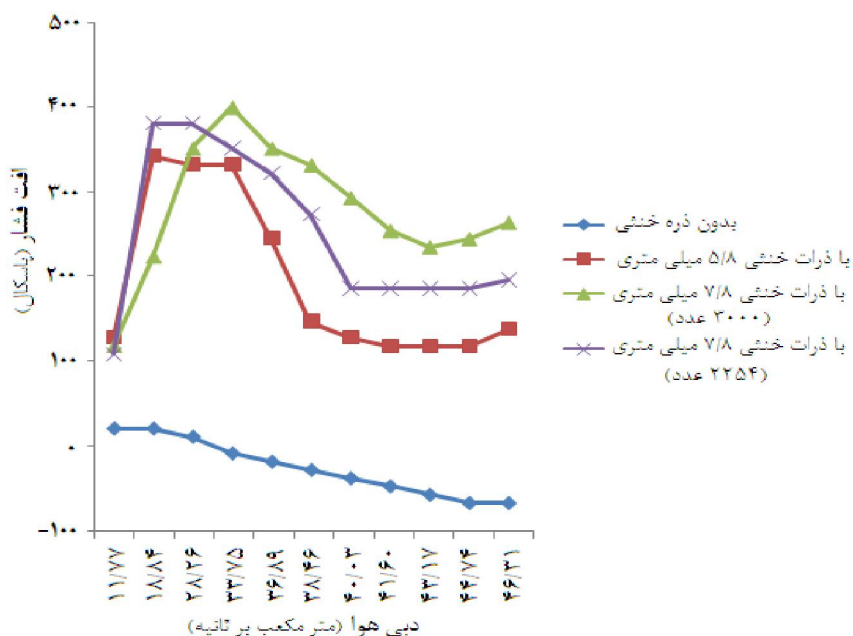
برای بررسی سرعت چرخش هر ذره یا به عبارت دیگر مدت زمان قرارگیری هر ذره در فضای بین دوایر متحدالمرکز، گلوله خنثی رنگی (از همان نوع ذره

ترتیب برابر با ۰/۱۸۸۴، ۰/۲۸۲۶ و ۰/۳۳۷۵ متر مکعب در ثانیه می‌باشد. ذرات خنثی از این دبی حجمی شروع به حرکت نموده و افت فشار بین نقطه ابتدایی و میانی محفظه روند نزولی پیدا می‌کند (شکل ۳).

در واقع همان دبی حجمی هوایی می‌باشد که پس از آن ذرات خنثی شروع به حرکت نموده و هوا با سهولت بیشتری از بین ذرات خنثی عبور می‌نماید (نقطه حداقل سرعت سیال شدن). این دبی برای ذرات ۵/۸، ۷/۸ (۲۲۵۴ عدد) و ۷/۸ (۳۰۰۰ عدد) به



شکل ۲- تغییرات افت فشار بین قسمت ورودی و خروجی بستر در ۴ حالت (اعداد مربوط به دبی هوا در 10^2 ضرب شده اند)



شکل ۳- تغییرات افت فشار بین قسمت ورودی و میانی بستر در ۴ حالت (اعداد مربوط به دبی هوا در 10^2 ضرب شده‌اند)

مشابه معادله ارگان بوده که طبق آن افت فشار تا نقطه حداقل سرعت سیال شدن افزایش می‌یابد و پس از آن از نظر تئوری ثابت می‌ماند (جهت توضیحات بیشتر در زمینه معادله ارگان به منابع Niven (۲۰۰۲) و Plessis (۱۹۹۴) مراجعه گردد). محققانی نظیر Niven (۲۰۰۲) و Plessis (۱۹۹۴) نیز که بر روی

شکل ۲ تغییرات افت فشار اندازه‌گیری شده بین قسمت ورودی و خروجی محفظه خشک‌کن را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌گردد، افت فشار تا نقطه حداقل سرعت سیال شدن افزایش یافته (از حدود ۱۱۰ پاسکال تا ۵۰۰ پاسکال) و پس از آن تغییرات افت فشار تقریباً ثابت می‌باشد. این روند

در جدول مشاهده می‌شود، پاشش (یک لیتر در ساعت) عمدتاً سبب افزایش زمان می‌گردد، که به سبب افزایش نیروی چسبندگی بین ذرات خنثی می‌باشد. Freire و Bachelos که بر روی رژیم جریانی در یک بستر جهنده مرطوب تحقیق نموده نیز مشاهده کردند که با افزایش رطوبت میزان چسبندگی در بستر افزایش پیدا می‌نماید (Bachelos & Freire, 2008). بررسی اعداد جدول نشان می‌دهد که با افزایش دبی هوای ورودی، اثر پاشش کاهش یافته به گونه‌ای که از یک دبی هوا به بعد پاشش تاثیر معناداری از نظر آماری در سطح $p < 0.05$ بر زمان چرخش ذرات در بستر ندارد.

تاثیرات تغییرات فشار در بسترهای متخلخل و فشرده کار نموده‌اند با بهره‌گیری از معادله ارگان، به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. این محققان بیان نموده که این کاهش افت فشار و ثابت ماندن آن به خاطر کاهش در دانسیته بستر به سبب افزایش جریان هوا می‌باشد.

بررسی نحوه حرکت ذرات

متوسط زمان چرخش برای هر یک از ۳ ذره خنثی ۵/۸، ۷/۸ (۳۰۰۰ عدد) و ۷/۸ (۲۲۵۴ عدد) زمانی که کاملاً جهنده بوده در دو حالت بدون پاشش و با پاشش اندازه‌گیری شد (جدول ۱). زمان چرخش ذرات بین ۶/۸-۳/۹ ثانیه متغیر بوده و همان طور که

جدول ۱- زمان لازم برای چرخش ذرات خنثی

اندازه ذرات	تعداد ذرات	دبی هوا (متر مکعب بر ثانیه)	پاشش	زمان (ثانیه)
۵/۸	۵۴۲۵	۰/۰۳۳۷۵	بدون پاشش	۴/۵۰±۱/۳۴ ^a
۵/۸	۵۴۲۵	۰/۰۳۳۷۵	با پاشش	۶/۰۰±۰/۴۵ ^b
۵/۸	۵۴۲۵	۰/۰۳۶۸۹	بدون پاشش	۴/۰۰±۰/۶۳ ^a
۵/۸	۵۴۲۵	۰/۰۳۶۸۹	با پاشش	۵/۰۰±۰/۳۸ ^b
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۰۰۳	بدون پاشش	۵/۸۳±۱/۴۷ ^b
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۰۰۳	با پاشش	۶/۰۰±۱/۶۷ ^b
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۱۶۰	بدون پاشش	۴/۵۰±۰/۹۵ ^a
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۱۶۰	با پاشش	۵/۰۰±۱/۲۹ ^b
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۳۱۷	بدون پاشش	۳/۹۰±۱/۱۱ ^a
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۳۱۷	با پاشش	۴/۸۳±۱/۲۶ ^a
۷/۸	۳۰۰۰	۰/۰۴۶۳۱	بدون پاشش	۶/۰۰±۰/۶۳ ^b
۷/۸	۳۰۰۰	۰/۰۴۶۳۱	با پاشش	۶/۸±۰/۲۷ ^b

مقادیر زمان به همراه انحراف معیار می‌باشد. اعداد با حروف لاتین مشابه تفاوت معناداری در سطح ۹۵ درصد ندارند.

این امر دقیقاً مطابق با فرمول انتقال حرارت (رابطه ۳) بوده که در آن گرمای داده شده به گرمای ویژه هوا، اختلاف دما و دبی ورودی وابسته است (Toledo, 2007). فن دمنده‌ای مورد استفاده در این پژوهش، مصرف ثابتی دارد (چون تغییر دبی حجمی هوا صرفاً به وسیله تغییر دریچه خروجی فن صورت پذیرفته و دور فن همواره ثابت است)، با توجه به برابری مقدار تئوری مصرف با مقدار حقیقی آن، با استفاده از فرمول میزان مصرف هیتر برای تمامی حالات مختلف (دمایی

تعیین میزان مصرف انرژی سیستم

نتایج نشان داد که میزان مصرف تئوری (که از طریق فرمول بدست آمده بود) با میزان مصرف واقعی (که از کنتور قرائت شده بود) اختلاف نداشته و کاملاً مشابه می‌باشند (جدول ۲). بررسی‌ها مشخص نمود که میزان مصرف هیتر تنها تابعی از دبی حجمی هوا و دما می‌باشد، به طوری که با افزایش دبی هوای ورودی و دمای خشک کردن، مصرف انرژی افزایش یافته که این امر به سبب افزایش زمان کارکرد هیتر می‌باشد.

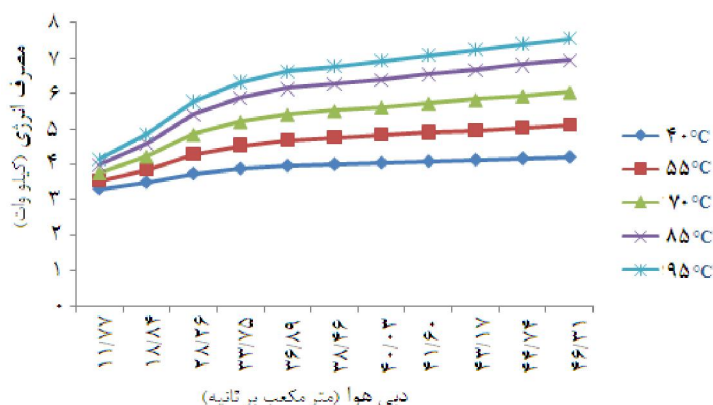
دستگاه بسته به شرایط بین ۳-۸ کیلو وات انرژی برق در ساعت مصرف می‌نماید که معادل ۴-۱/۵ کیلو وات انرژی برق به ازای هر لیتر ماده اولیه در این اندازه از سیستم می‌باشد.

و دبی حجمی هوا) به دست آورده شد. مقدار حاصله با میزان مصرف فن (۳ کیلو وات) جمع گردید، تا مصرف انرژی برای دبی‌های حجمی و دماهای مختلف تعیین گردد (شکل ۴). با توجه به نتایج حاصله،

جدول ۲- میزان مصرف انرژی برای حالات بهینه کارکرد دستگاه در مدت یک ساعت

اندازه ذرات	تعداد ذرات	دبی هوا (m^3/s)	دمای هوای ورودی ($^{\circ}C$)	انرژی مصرفی تئوری هیتر (kW)	انرژی مصرفی واقعی هیتر (kW)	انرژی مصرفی کل (kW)
۵/۸	۵۴۲۵	۰/۰۳۳۷۵	۸۵	۲/۸۰۷	۲/۸۰±۰/۱۰۳b	۵/۸۰±۰/۱۰۳
۵/۸	۵۴۲۵	۰/۰۳۶۸۹	۸۵	۳/۱۳۷	۳/۲۴±۰/۰۹۷c	۶/۲۴±۰/۰۹۷
۵/۸	۵۴۲۵	۰/۰۳۳۷۵	۹۵	۳/۳۱۲	۳/۲۸±۰/۰۸۶c	۶/۲۸±۰/۰۸۶
۵/۸	۵۴۲۵	۰/۰۳۶۸۹	۹۵	۳/۶۲۰	۳/۵۶±۰/۰۸۹d	۶/۵۶±۰/۰۸۹
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۰۰۳	۷۰	۲/۶۱۸	۲/۶۸±۰/۰۶۹a	۵/۶۸±۰/۰۶۹
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۱۶	۷۰	۲/۷۲۱	۲/۸±۰/۰۹۴b	۵/۸۰±۰/۰۹۴
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۳۱۷	۷۰	۲/۸۲۴	۲/۹۲±۰/۱b	۵/۹۲±۰/۱۰۰
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۰۰۳	۸۵	۳/۴۰۴	۳/۵۶±۰/۱۰۵d	۶/۵۶±۰/۱۰۵
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۱۶	۸۵	۳/۵۳۸	۳/۷۸±۰/۰۹۲e	۶/۷۸±۰/۰۹۲
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۳۱۷	۸۵	۳/۶۷۱	۳/۸۰±۰/۰۷۸e	۶/۸۰±۰/۰۷۸
۷/۸	۲۲۵۴	۰/۰۴۰۰۳	۹۵	۳/۹۲۸	۳/۸۶±۰/۰۸۱e	۶/۸۶±۰/۰۸۱
۷/۸	۳۰۰۰	۰/۰۴۶۳۱	۷۰	۳/۰۲۹	۳/۳۲±۰/۰۷۵c	۶/۳۲±۰/۰۷۵
۷/۸	۳۰۰۰	۰/۰۴۶۳۱	۸۵	۳/۹۳۸	۳/۸۶±۰/۰۸۶e	۶/۸۶±۰/۰۸۶

میانگین مقادیر مصرف برق به همراه انحراف معیار می‌باشد. اعداد با حروف لاتین مشابه تفاوت معناداری در سطح ۹۵ درصد ندارند.



شکل ۴- مصرف انرژی (در هر ساعت) در دبی‌های حجمی و دماهای مختلف (اعداد مربوط به دبی هوا در 10^3 ضرب شده اند)

کاهش فضای لازم جهت خشک کردن بوده که این امر از یک سو میزان هوای مورد نیاز جهت فرایند خشک کردن را تقلیل می‌دهد و از سوی دیگر باعث کاهش در میزان مصرف انرژی می‌گردد (Mujumdar, 2006).

مقایسه مصرف انرژی سیستم خشک‌کن جهنده با خشک‌کن پاششی

یکی از مزایای خشک‌کن بستر جهنده نسبت به خشک‌کن پاششی (در خشک کردن مایعات غذایی)،

که تولید این حجم از هوا نیاز به فن بزرگتری داشته که مصرف انرژی بالاتری دارد. هرچه حجم هوای مورد استفاده جهت خشک کردن (در دبی ثابت تولید) بیشتر باشد امکان فرار پودر و در نتیجه کاهش راندمان آن نیز بالاتر است.

نتیجه‌گیری

امروزه رقابت بسیار زیادی در صنعت غذا به منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت نهایی محصول وجود دارد. به این منظور تلاش‌های زیادی به سبب ایجاد طراحی‌های جدید در زمینه خشک‌کن‌ها و ابداع روش‌های جدید خشک کردن صورت پذیرفته است. طراحی سیستم بستر جهنده به منظور تامین اهدافی نظیر سادگی سیستم، کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت محصول، قابلیت استفاده برای مواد غذایی حساس صورت پذیرفت. امروزه با توجه به بالا بودن هزینه‌های انرژی در دنیا می‌توان ادعا نمود، سیستم خشک‌کنی موفق است که بتواند علاوه بر تولید محصول با کیفیت مناسب، هزینه انرژی قابل قبولی نیز داشته باشد. هدف از طراحی خشک‌کن بستر جهنده ساخت سیستمی جهت تولید محصولی با کیفیت مناسب و مصرف انرژی کمتر بود. نتایج نشان داد که تغییرات افت فشار در سیستم از معادله ارگان تبعیت می‌کند که نشان از طراحی صحیح خشک‌کن می‌باشد. مطالعات همچنین نشان داد که خشک‌کن طراحی شده قادر به تولید محصول با مصرف انرژی کمتری نسبت به خشک‌کن‌های مشابه است.

برای اثبات این امر، خشک‌کن طراحی شده با یک خشک‌کن پاششی مقایسه شد. خشک‌کن پاششی که در این مقایسه استفاده شد، دارای ظرفیتی معادل با ظرفیت خشک‌کن بستر جهنده بود. حداکثر حجم هوای لازم جهت خشک کردن یک لیتر مایع در ساعت در این خشک‌کن معادل ۵۰۰ متر مکعب در ساعت بوده که از طریق اندازه‌گیری سرعت هوا با استفاده از دبی‌سنج (در لوله ورودی هوا به خشک‌کن با قطر ۱۰۰ میلی‌متری) و قرار دادن آن در فرمول ۴ بدست آمده است:

رابطه (۴)

$$v_{air} \left(\frac{m^3}{s} \right) = V_{air} (m/s) \times A_{air} (m^2)$$

که V_{air} دبی حجمی هوا (متر مکعب بر ثانیه)، A_{air} سطح مقطع (متر مربع) و v_{air} دبی هوا (متر بر ثانیه) می‌باشد.

$$18 \times (3/14 \times ((0/1)^2 \div 4)) =$$

$$0/1413 \text{ (متر مکعب بر ثانیه)}$$

$$0/157 \times 3600 = 508/68 \text{ (متر مکعب بر ساعت)}$$

= وزن هوا

$$1293 \times \text{ (مترمکعب بر ثانیه)} / 1413$$

$$\text{(کیلوگرم بر ثانیه)} = 182/7 \text{ (کیلوگرم بر مترمکعب)}$$

$$Q = 182/7 \times 1/0.12 \times (170 - 20)$$

$$= 2773 \text{ (کیلو وات)} = 27/73 \text{ (ژول بر ثانیه)}$$

همان طور که مشاهده می‌شود، میزان انرژی لازم جهت گرم کردن هوا در خشک‌کن پاششی، چندین برابر خشک‌کن بستر جهنده بوده که این امر ادعای بهینه‌سازی مصرف انرژی را در خشک‌کن بستر جهنده به اثبات می‌رساند. از سوی دیگر نباید فراموش نمود

منابع

- 1- Abdul Salam, P. & Bhattacharya, S.C. 2006. A comparative hydrodynamic study of two types of spouted bed reactor designs. *Chemical Engineering Science*, 61: 1946 – 1957.
- 2- Anabtawi, M.Z., Uysal, B.Z. & Jumah, R.Y. 1992. Flow characteristics in a rectangular spout-fluid bed. *Powder Technology*, 69: 205-211.
- 3- Bacelos, M.S. & Freire, J.T. 2008. Flow regimes in wet conical spouted beds using glass bead mixtures. *Particuology*, 6: 72–80.
- 4- Bacelos, M.S., Passos, M.L. & Freire, J.T. 2007. Effect of interparticle forces on the conical spouted bed behavior of wet particles with size distribution. *Powder Technology*, 174:114–126.

- 5- Duarte, C.R., Olazar, M., Murata, V.V. & Barrozo, M.A.S. 2009. Numerical simulation and experimental study of fluid-particle flows in a spouted bed. *Powder Technology*, 188: 195–205.
- 6- Liang-Wan, R. & Jie-min, Z. 2010. Improved dem-cfd model and validation: a conical-base spouted bed simulation study. *Journal of Hydrodynamics*, 3: 351-359.
- 7- Mujumdar, A.S. 2006. *Hand book of industrial Drying*. Singapore: Taylor & Francis Group LLC.
- 8- Mujumdar, A.S. 2007. An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs. *Transport in Porous Media*, 66: 3–18.
- 9- Niven, R. K. 2002. Physical insight into the Ergun and Wen & Yu equations for fluid flow in packed and fluidised beds. *Chemical Engineering Science*, 57: 527-534.
- 10- Passos, M.L. & Mujumdar, A.S. 2000. Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles. *Powder Technology*, 110: 222–238.
- 11- Plessis, J.P. 1994. Analytical quantification of coefficients in the Ergun equation for fluid friction in a packed bed. *Transport in Porous Media*, 16: 189-207.
- 12- Prachayawarakorn, S., Ruengnarong, S. & Soponronnarit, S. 2006. Characteristics of heat transfer in two-dimensional spouted bed. *Journal of Food Engineering*, 76: 327–333.
- 13- Toledo, T. 2007. *Fundamentals of Food Process Engineering*. Athens, Georgia, USA: Springer Science+Business Media, LLC.

Design, construction and evaluation performance of spouted bed dryer

Mohsen Zandi^{1*}, Mehrdad Niakousari², Mohamad hadi Eskandari², Mohammad Sarshar³

1-PhD. Student, Department of Food Science and Technology, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Iran

*Corresponding author (mohsen.zandi@hotmail.com)

2-Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Agriculture Faculty, University of Shiraz, Iran

3- Assistant Professor, Department of Processing, Fars Engineering Research Center, Iran

Abstract

The main objective of this study is to design and construct the new, spouted bed dryer, for food drying sensitive foods specially. For this purpose, firstly a new design of dryer was planned to achieve the maximum efficiency and flexibility for liquids and solids drying. After constructing and initial setup of spouted bed, basic experiments such as investigation of an inert particles motion, pressure drop, energy consumption were conducted and optimal system requirements for two particle size (5.8 & 7.8 mm) were determined. The results indicated that changes in pressure drop in the dryer chamber containing inert particles are followed from the Ergun equation. Energy consumption in this system is variable in the range of 3-8 kW per hour. Also results reveals that the energy consumption of the new design of spouted bed dryer is less than the spray dryer for liquid foods drying.

Keywords: Air flow rate, Drying, Energy consumption, Inert particles, Pressure drop, Spouted bed dryer.