



طراحی، توسعه و ارزیابی یک خشک‌کن بستر سیال پیوسته جریان قالبی

مجید خانعلی^{۱*}، شاهین رفیعی^۲، علی جعفری^۲

۱ و ۲- به ترتیب استادیار و استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی و فناوری دانشگاه تهران

ایمیل مکاتبه کننده: khanali@ut.ac.ir

چکیده:

در این مطالعه، کاربرد روش خشک‌کردن بستر سیال پیوسته جریان قالبی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور یک خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی پیوسته جریان قالبی طراحی و ساخته شد. دمنده سانتریفیوژ پره عقب‌گرد با توان موتور ۴ کیلووات بر اساس بیشترین افت فشار استاتیک در شرایط حداقل سیال‌سازی و قابلیت تأمین سرعت مورد نیاز سیال‌سازی اکثر محصولات دانه‌ای کشاورزی انتخاب شد. محفظه بستر سیال به صورت یک مکعب مستطیل با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب برابر ۱۰۰، ۸ و ۴۰ سانتی‌متر ساخته شد. بخش تغذیه ماده جامد به درون بستر از یک مخزن، نقاله مارپیچی و مجموعه یک الکتروموتور-جعبه‌دنده تشکیل شد. یکنواختی سیال‌سازی و خشک‌شدن مطلوب محصول بیانگر آن بود که امکان توسعه طرح آزمایشگاهی به نمونه صنعتی امکان‌پذیر است. کاهش رطوبت محصول در طول خشک‌کن به صورت غیر خطی بود. به ازای مقادیر ثابت دمای هوا و ارتفاع سرریز، افزایش دبی تغذیه ماده خشک موجب افزایش رطوبت شلتوک در خروجی و طول بستر شد. به ازای مقادیر ثابت دمای هوا و دبی تغذیه، افزایش ارتفاع سرریز موجب کاهش رطوبت شلتوک در خروجی و طول بستر شد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کردن، بستر سیال، پیوسته، جریان قالبی، رطوبت

۱- مقدمه

خشک‌کردن یکی از رایج‌ترین عملیات واحد فرآوری مواد گوناگون می‌باشد. خشک‌کردن یک فرآیند پیچیده است که در آن پدیده‌های انتقال جرم و انتقال حرارت به طور هم‌زمان رخ می‌دهند. خشک‌کردن و طراحی خشک‌کن‌ها آمیزه‌ای از علم، تکنولوژی و هنر می‌باشد (Mujumdar, 2011).

تولید شلتوک در ایران از ۱/۳ میلیون تن در سال ۱۹۷۰، به ۲/۲۵ میلیون تن در سال ۲۰۰۹ افزایش یافته است (FAO, 2011). شلتوک با رطوبت بالا در حدود ۲۵-۴۵ درصد بر پایه خشک برداشت می‌شود. ذخیره‌سازی شلتوک با این رطوبت قبل از سفیدکنی به دلیل رشد قارچ‌ها و ریزموجودها، باعث افزایش دما، تغییرات نامطلوب رنگ، عطر، طعم و کاهش راندمان سفیدکنی می‌شود. بنابراین برای افزایش خاصیت انبارداری و کیفیت محصول، لازم است در کوتاه‌ترین زمان پس از برداشت خشک شود. از پارامترهای کیفی برنج که در طول فرآیند خشک‌کردن تحت تأثیر قرار می‌گیرند، می‌توان درصد برنج سالم، درجه سفیدی و کیفیت طبخ را نام برد. در ایران، کاهش درصد برنج سالم یکی از مشکلات عمده فرآوری محصول می‌باشد

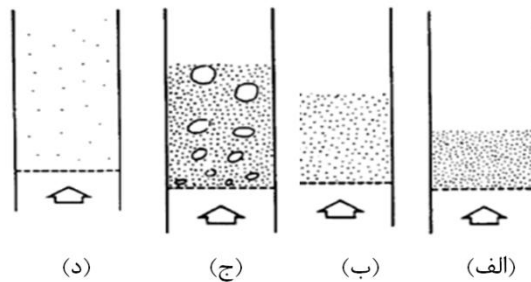


چرا که برای خشک کردن برنج معمولاً از خشک‌کن مخزنی استفاده می‌شود. استفاده از این خشک‌کن باعث توزیع غیریکنواخت رطوبت و دما در محصول و در نتیجه کاهش کیفیت می‌شود. در ضمن خشک‌کن‌های مخزنی، دارای ظرفیت محدود بوده و فرآیند کنترل دقیق دما و رطوبت شلتوک برنج نیز امکان‌پذیر نمی‌باشد (طباطبائی فر و رفیعی، ۱۳۸۱).

استفاده از خشک‌کن بستر سیال باعث کاهش معایب حاصل از کاربرد خشک‌کن‌های مخزنی می‌شود. سوپونروناریت و همکاران طراحی و ساخت نمونه اولیه خشک‌کن بستر سیال پیوسته جریان قالبی را انجام دادند. طول، عرض و ارتفاع این خشک‌کن به ترتیب ۰/۸، ۰/۱۵ و ۰/۵ متر بود. تغذیه ماده جامد توسط نقاله ماریچی و کنترل ارتفاع بستر با استفاده از سرریز نصب شده در انتهای بستر انجام شد (Soponronnarit et al, 1996). خوش تقاضا و همکاران مطالعه فرآیند خشک شدن شلتوک به دو روش بستر ثابت و بستر سیال را از نظر بازده حرارتی، آهنگ خشک شدن و میزان ترک خوردگی دانه مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها با استفاده از خشک‌کن بستر سیال ناپیوسته و اعمال شرایط بستر ثابت و بستر سیال، انجام شد (خوش تقاضا و همکاران، ۱۳۸۶). بیزارک و همکاران مدل‌سازی خشک کردن بستر سیال جریان قالبی را به منظور پیش‌بینی رطوبت شلتوک خروجی مورد مطالعه قرار دادند و جهت ارزیابی مدل از یک خشک‌کن آزمایشگاهی با عرض و طول به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۳ متر استفاده نمودند. تغذیه ماده جامد به خشک‌کن به صورت دستی انجام شد. آزمایش‌های خشک کردن شلتوک در ارتفاع سرریز ۲/۵ سانتی‌متر، رطوبت اولیه شلتوک در محدوده ۰/۱۵۱ تا ۰/۲۷۸ بر مبنای خشک، دبی تغذیه شلتوک در محدوده ۵ تا ۱۵ گرم در دقیقه، دمای هوا در محدوده ۶۰/۵ تا ۷۸/۸ درجه سلسیوس و سرعت هوا در محدوده ۰/۶۴ تا ۱/۲۹ متر بر ثانیه انجام شد (Bizmark et al, 2010).

هدف از تحقیق حاضر، بررسی اصول و مشخصه‌های طراحی و همچنین ساخت یک خشک‌کن بستر سیال پیوسته جریان قالبی برای مواد دانه‌ای می‌باشد. در نهایت ارزیابی دستگاه از طریق خشک کردن شلتوک به عنوان یک محصول دانه‌ای کشاورزی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

سیال‌سازی، عملیات واحدی است که بستری از مواد دانه‌ای روی یک صفحه توزیع کننده قرار می‌گیرد که بر اثر عبور جریان گاز، رفتاری شبیه مایع از خود نشان می‌دهد. زمانی که سرعت گاز عبوری از بستر کم است، بستر در حالت سکون قرار دارد (شکل ۱-الف). با افزایش سرعت گاز، مواد درون بستر منبسط می‌شوند و به ترتیب شرایط حداقل سیال‌سازی (شکل ۱-ب)، سیال‌سازی حبابی (شکل ۱-ج) و حمل بادی مواد (شکل ۱-د) ایجاد خواهد شد. در حالت حداقل سیال‌سازی، افت فشار هوای عبوری از بستر به مقدار بیشینه خواهد رسید و مجموع نیروی پسا و نیروی شناوری با نیروی وزن مواد درون بستر به تعادل می‌رسد. در حالت سیال‌سازی حبابی، حباب‌های گاز در اندازه و شکل‌های گوناگون ایجاد می‌شود. در حالت حمل بادی مواد، سیال‌سازی به صورت فاز رقیق همراه با انتقال مواد به بیرون از بستر وجود دارد (Kunii & Levenspiel, 1991). (Gupta & Sathiyamoorthy, 1999).



شکل ۱- (حالت‌های گوناگون سیال‌سازی ماده جامد)

خشک کردن بستر سیال به طور گسترده به منظور خشک کردن مواد دانه‌ای با قابلیت سیال شدن استفاده می‌شود. از مهم‌ترین مزایای این روش را می‌توان سرعت بالای خشک شدن، سهولت جابجایی مواد درون بستر، کنترل آسان و هزینه نگهداری پایین دانست. محدودیت‌های این روش شامل افت فشار بالا، مصرف بالای انرژی الکتریکی، فرسایش دیواره‌های خشک‌کن و سایش مواد می‌باشند (Mujumdar, 2006).

کاهش سریع رطوبت در خشک‌کن‌های بستر سیال باعث افزایش تنش‌های حرارتی درون دانه خواهد شد که در نتیجه درصد برنج سالم، کاهش خواهد یافت. برای افزایش کیفیت، پیشنهاد شده است که خشک کردن شلتوک به صورت چند مرحله‌ای صورت گیرد. در این روش، ابتدا خشک کردن محصول توسط خشک‌کن بستر سیال صورت می‌گیرد و خشک کردن نهایی به روش هوادهی محیطی و بعد از مرحله استراحت حرارتی انجام می‌شود. پژوهش‌های متعددی در کشورهای تولیدکننده برنج مانند تایلند و مالزی در جهت بهینه‌سازی خشک کردن بستر سیال و همچنین روش چندمرحله‌ای انجام شده است (Soponronnarit et al, 1995. Cnossen et al, 2003. Tirawanichakul et al, 2004).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ محاسبات و شاخصه‌های طراحی

در طراحی خشک‌کن مورد نظر نکات مورد توجه عبارتند از: ۱- قابلیت استفاده خشک‌کن به منظور خشک کردن محصولات دانه‌ای مختلف کشاورزی و صنعتی، ۲- قابلیت تغییر و اندازه‌گیری پارامترهای کاری مانند سرعت، دما و رطوبت نسبی هوا با دقت مطلوب و ۳- سادگی، ایمنی و سهولت کار با خشک‌کن. محاسبات طراحی با در نظر گرفتن برخی پارامترهای کاری مانند سرعت سیال‌سازی و خواص فیزیکی شلتوک (شکل، ابعاد محصول، جرم مخصوص) انجام شد. این پارامترها در محدوده رطوبتی ۰/۱۰۲۹ - ۰/۳۰۶ بر پایه خشک در جدول (۱) ارائه شده است.

۲-۱-۱-۱- محفظه بستر سیال خشک‌کن

در ابتدا لازم بود با توجه به ظرفیت مورد نظر، ابعاد محفظه بستر سیال که دارای تأثیر مهمی بر هیدرودینامیک مواد درون خشک‌کن می‌باشد، تعیین گردد. در خشک‌کن‌های بستر سیال، به منظور کم کردن اثرات نامطلوب دیواره محفظه بر جریان

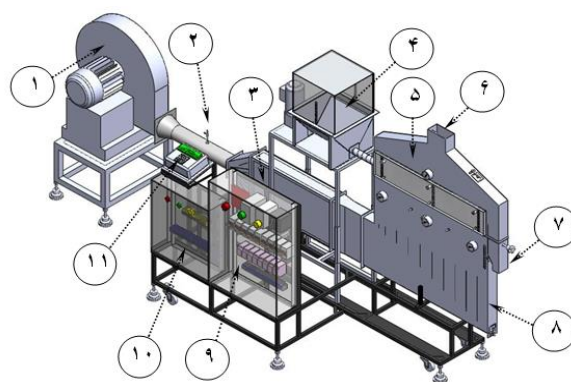


مواد، نسبت ابعاد خشک‌کن به قطر مواد به اندازه کافی بزرگ و حداقل، ۱۰ در نظر گرفته می‌شود (Taechapiroj et al, 2003). با در نظر گرفتن قطر معادل دانه‌های شلتوک، عرض محفظه خشک‌کن، ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و با در نظر گرفتن نسبت طول به عرض خشک‌کن برابر ۱۲/۵، طول خشک‌کن برابر ۱۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور مشاهده جریان مواد درون خشک‌کن، دریچه‌ای در وجه جلویی محفظه خشک‌کن تعبیه شد و توسط شیشه‌نشکن پوشانیده شد. سایر سطوح محفظه بستر سیال از ورق فولادی گالوانیزه ساخته شد. در محفظه بستر سیال دریچه خروجی هوا در بالای بستر و دریچه تغذیه ماده جامد در وجه کناری تعبیه شد. استخراج نمونه‌ها به منظور تعیین رطوبت محصول در حین خشک شدن و در طول بستر توسط نمونه‌گیرهایی با مکانیزم بازگشت فنری انجام شد. در انتهای بستر، دریچه خروجی مواد و سرریز با ارتفاع قابل تنظیم قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوای خروجی در طول بستر، سه مجرا بر روی وجه مقابل خشک‌کن در نظر گرفته شد. جهت اندازه‌گیری فشار هوا، سه مجرا در امتداد طول بستر به منظور نصب فشارسنج تعبیه گردید.

جدول ۱- (مقادیر میانگین برخی خواص فیزیکی شلتوک)

تخلخل بستر ساکن	جرم مخصوص دانه‌ای (kg/m ³)	جرم مخصوص خارجهای (kg/m ³)	ضریب اصطکاک خارجی با فولاد	قطر معادل (mm)	رطوبت (d.b.)
۰/۴۹۲۱	۹۴۵/۱۸	۴۸۰/۰۵	۰/۴۷۹	۳/۳۴	۰/۱۰۲۹
۰/۵۱۹۱	۱۰۳۱/۹۶	۴۹۶/۲۷	۰/۵۲۴	۳/۴۵	۰/۲۰۵
۰/۵۳۶۷	۱۰۹۲/۹۰	۵۰۶/۳۴	۰/۵۴۵	۳/۵۱	۰/۲۵۴
۰/۵۵۸۷	۱۱۶۱/۱۸	۵۱۲/۴۳	۰/۵۶۳	۳/۵۵	۰/۳۰۶

طرح‌واره خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی پیوسته جریان قالبی تهیه شده در نرم‌افزار SolidWorks در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- (طرح‌واره خشک‌کن بستر سیال پیوسته جریان قالبی (نمای ایزومتریک))



در شکل (۲) اجزای مختلف خشک‌کن از قبیل ۱، دمنده؛ ۲، لوله پیتو؛ ۳، گرم‌کن؛ ۴، سیستم تغذیه ماده جامد؛ ۵، محفظه هوا؛ ۶، دریچه خروجی هوا؛ ۷، دریچه خروجی ماده جامد؛ ۸، محفظه هوا؛ ۹، تابلوی کنترل؛ ۱۰، تابلوی اتصال المنت‌ها و ۱۱، صفحه کلید مشخص شده است.

۲-۱-۲- گرمکن هوا

توان حرارتی مورد نیاز گرم کردن جریان هوا با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (Mujumdar, 2006).

$$P_h = \rho_a W_{bed} L (C_a + C_v Y) (T_{a,in} - T_{a,s}) U_0 \quad (1)$$

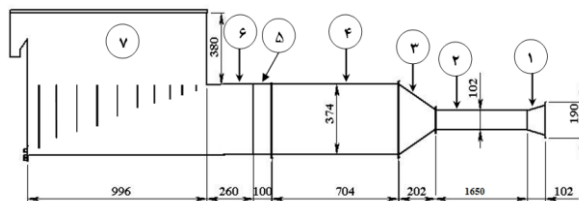
که در آن P_h توان حرارتی مورد نیاز (W)، ρ_a جرم مخصوص هوا (kg/m^3)، W_{bed} عرض خشک‌کن (m)، L طول خشک‌کن (m)، C_a ظرفیت گرمایی هوای خشک (J/kgK)، C_v ظرفیت گرمایی بخار آب (J/kgK)، Y رطوبت مطلق هوا بر حسب کیلوگرم آب بر کیلوگرم هوای خشک (kgwater/kgdry air)، $T_{a,in}$ دمای هوای ورودی به خشک‌کن (K)، $T_{a,s}$ دمای هوای محیط (K) و U_0 سرعت ظاهری سیال‌سازی (m/s) است. به منظور محاسبه توان مورد نیاز، دمای محیط و دمای هوای ورودی به ترتیب برابر ۲۹۸ و ۳۷۳ درجه کلوین و رطوبت مطلق هوای محیط برابر ۰/۰۰۴ کیلوگرم آب بر کیلوگرم هوای خشک در نظر گرفته شد. به منظور بالا بردن قابلیت و کارایی خشک‌کن (خشک‌کردن محصولات سنگین‌تر از شلتوک مانند ذرت)، بیشترین سرعت ظاهری سیال‌سازی برابر ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. توان حرارتی مورد نیاز تحت شرایط مذکور با استفاده از رابطه (۱) برابر ۳۵۸۰۵ وات محاسبه شد. بنابراین به منظور افزایش کارایی دستگاه در تأمین هوای مورد نیاز در دماهای بیشتر از ۳۷۳ درجه کلوین، ۲۱ المنت حرارتی سه فاز با توان ۲۰۰۰ وات (توان کل ۴۲ کیلووات) در گرمکن نصب گردید. تعداد المنت‌های حرارتی فعال در گرمکن به توان حرارتی مورد نیاز و همچنین نحوه اتصال المنت‌ها به اشکال سری، موازی، ستاره و مثلث، قابل تغییر می‌باشد. لازم به ذکر است که در این مطالعه حتی در بیشترین دمای هوای ورودی، تمام المنت‌ها به صورت فعال استفاده نشد.

۲-۱-۳- دمنده هوا

دمنده هوا باید به گونه‌ای انتخاب شود که قابلیت تأمین جریان هوای مورد نیاز سیال‌سازی و افت فشار حاصل را داشته باشد. دبی مورد نیاز با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (Mujumda, 2006).

$$Q = W_{bed} L U_0 = (0.08)(1)(5) = 0.4 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2)$$

افت فشار کلی جریان در طول مسیر برابر مجموع افت فشار ناشی از بستر و افت فشار ناشی از مسیر جریان است. به منظور محاسبه افت فشار ناشی از مسیر جریان، در شکل (۳) طرحواره مسیر هدایت جریان هوا و ابعاد کانال‌ها و اتصالات از خروجی دمنده تا ورودی خشک‌کن نشان داده شده است.



شکل ۳- (طرحواره مسیر عبور جریان هوا)

افت فشار ناشی از مسیر جریان برابر مجموع افت فشار در مسیر مستقیم و افت فشار ناشی از تغییر سطح مقطع یا تغییر مسیر جریان است. افت فشار بخش اول (رابطه ۳) بر اساس ضریب اصطکاک و افت فشار بخش دوم (رابطه ۴) بر اساس ضریب افت فشار محاسبه شد (Mills, 2004).

$$\Delta P_{da} = \frac{4fL_c}{d_h} \times \frac{\rho_a U_c^2}{2} \quad (3)$$

$$\Delta P_c = K \times \frac{\rho_a U_c^2}{2} \quad (4)$$

که در آن ΔP_{da} افت فشار در مسیر مستقیم (Pa)، ΔP_c افت فشار کانال (Pa)، f ضریب اصطکاک (بدون بعد)، L_c طول کانال (m)، U_c سرعت هوا (m/s)، K ضریب افت فشار (بدون بعد) و d_h قطر هیدرولیکی کانال (m) ($d_h = \frac{4A_c}{P_c}$) است. A_c سطح مقطع (m²) و P_c محیط خیس شده (m) کانال می‌باشد. ضریب اصطکاک بر حسب زبری نسبی و عدد رینولدز جریان و با استفاده از نمودار مودی در بخش‌های مختلف مسیر جریان شکل (۳) در محدوده ۰/۰۲-۰/۰۲۸ تعیین شد. ضریب افت فشار در بخش‌های مختلف مسیر جریان شکل (۳) در محدوده ۰/۰۶-۰/۵۴ محاسبه شد (Khanali, 2012).

افت فشار کل ناشی از مسیر عبور هوا معادل ۳۸۴۰ پاسکال محاسبه شد. افت فشار ناشی از بستر، برابر افت فشار در حالت حداقل سیال‌سازی بستری ساکن از یک محصول با ارتفاع ۰/۱ متر ($\Delta P_{bed} = \rho_{sb} g h_{sb} = (700)(9.81)(0.1)$)، برابر ۶۸۷ پاسکال محاسبه شد. پارامتر ρ_{sb} برابر جرم مخصوص ظاهری (kg/m^۳) می‌باشد که در این تحقیق بیشترین مقدار ممکن این پارامتر برای محصولات کشاورزی دانه‌ای برابر ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد (Mohsenin, 1986). افت فشار کل برابر مجموع افت فشار ناشی از مسیر عبور هوا و افت فشار بستر و معادل ۴۵۲۷ پاسکال می‌باشد.

با توجه به مقادیر محاسبه شده افت فشار کل و دبی هوا، نیاز به دمنده‌ای است که بتواند با بازده بالا، کمترین فشار استاتیک و دبی حجمی موردنیاز به ترتیب برابر ۴۵۲۷ پاسکال و ۰/۴ مترمکعب بر ثانیه را تأمین نماید. با توجه به این‌که دمنده‌های سانتریفیوژ پره عقب‌گرد نسبت به سایر دمنده‌ها قادر به تأمین فشار استاتیک بالاتری می‌باشند و علاوه بر تأمین دبی لازم، بازده بالایی نیز دارند، یک دمنده سانتریفیوژ پره عقب‌گرد با قطر پروانه ۰/۶ متر، فشار استاتیک ۵۰۰۰ پاسکال و دبی ۰/۵ متر مکعب بر ثانیه دارای یک الکتروموتور سه فاز با توان ۴ کیلووات انتخاب شد. تغییر دبی جریان هوا توسط باز و بسته شدن دریچه مکش هوای دمنده انجام شد (Kreith & Raton, 1999).



۲-۱-۴- بخش تغذیه ماده جامد

بخش تغذیه ماده جامد به دورن بستر متشکل از یک مخزن، نقاله ماریچی و مجموعه یک الکتروموتور-جعبه‌دنده می‌باشد. مخزن با گنجایش ۵۰ لیتر از جنس فولاد گالوانیزه ساخته شد. این ظرفیت برای انجام آزمایش‌های خشک‌کردن پیوسته در مقیاس آزمایشگاهی مناسب است. با توجه به این که نقاله ماریچی بدون محور کوچک‌تر از نقاله با محور است و برای ظرفیت‌های کم مناسب است، در این خشک‌کن از یک نقاله ماریچی بدون محور استفاده شد. به منظور تغذیه مواد از دیواره جانبی محفظه سیال، قطر خروجی نقاله، کوچک‌تر از عرض خشک‌کن انتخاب شد. بنابراین یک نقاله ماریچی بدون محور با قطر خارجی ۴۰، قطر داخلی ۲۴ و گام ماریچ ۴۰ میلی‌متر انتخاب گردید. توان مورد نیاز نقاله ماریچی تابعی از طول، مشخصات هندسی، سرعت دورانی، جرم مخصوص ماده و ضرایب اصطکاک داخلی و خارجی است. توان مورد نیاز نقاله ماریچی با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد (Srivastava et al, 2006).

$$P_{sc} = 3.54L_{sc}Q_s\rho_{sb}g \left(2\pi n_{sc}\sqrt{l_{p,sc}/g}\right)^{0.14} (d_{o,sc}/l_{p,sc})^{-10.12} (l_{i,sc}/l_{p,sc})^{0.11} f(\theta)\mu_{sc}^{2.05} \quad (5)$$

که در آن $f(\theta) = 6.94(1.3 - \cos^2\theta)$ ، Q_s دبی حجمی ماریچ (m³/s)، g شتاب گرانش (m²/s²)، n_{sc} سرعت دورانی (rps)، $l_{p,sc}$ طول گام (m)، $l_{i,sc}$ طول تغذیه (m)، $d_{o,sc}$ قطر خارجی (m)، $d_{i,sc}$ قطر داخلی ماریچ (m)، θ زاویه تمایل نقاله نسبت به سطح افقی (درجه) و μ_{sc} ضریب اصطکاک خارجی ماده است. به منظور تعیین بیشترین سرعت دورانی، لازم است که شرایط کاری متناظر با بیشترین سرعت (بیشترین انباشت ماده جامد و کمترین زمان ماند) مشخص شود. با در نظر گرفتن ارتفاع ماده ساکن درون بستر و میانگین زمان ماند به ترتیب برابر ۰/۱ متر و ۵ دقیقه، دبی حجمی ماریچ با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد.

$$Q_s = \frac{h_{sb}W_{bed}L}{\tau} = 2.66 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \quad (6)$$

در این صورت، سرعت دورانی ماریچ برابر ۴۲ دور در دقیقه تعیین شد. با توجه به مشخصات موجود، توان مورد نیاز نقاله ماریچی بر اساس رابطه (۵)، برابر ۰/۱۸ وات محاسبه شد. با توجه به مقدار کم توان مصرفی محاسبه شده و به منظور بررسی صحت محاسبات، از رابطه (۷) استفاده شد. این رابطه به منظور محاسبه توان مصرفی یک ماریچ افقی توسط باربوساکنوس و همکاران ارائه شده است (Barbosa-C'anvas et al, 2005).

$$P_{sc} = \frac{Q_s\rho_{sb}L_{sc}f_{sc}}{4500} \quad (7)$$

که در آن P_{sc} توان (hp)، Q_s دبی حجمی (m³/min) و f_{sc} ضریب ثابت وابسته به جنس ماده است. این ضریب برای شلتوک و سایر غلات ۱/۲ گزارش شده است. در استفاده از این رابطه، در صورتی که جواب حاصل کوچک‌تر از ۱ باشد، آن را در ضریب ۲ ضرب می‌کنیم؛ اگر جواب حاصل در محدوده ۱ تا ۲ باشد، در ضریب ۱/۵ ضرب می‌شود؛ اگر جواب حاصل بین ۲



تا ۴ باشد، در ضریب ۱/۲۵ ضرب می‌شود و در صورتی که جواب در محدوده ۴ تا ۵ اسب بخار باشد، در ضریب ۱/۱ ضرب می‌شود. توان مورد نیاز نقاله ماریپیچی بر اساس رابطه (۷)، برابر ۰/۱۸۷ وات محاسبه شد.

با توجه به سرعت دورانی و توان مورد نیاز، یک مجموعه الکتروموتور-جعبه‌دنده با توان ۰/۰۶ تا ۰/۲۵ کیلووات، سرعت دورانی موتور الکتریکی در محدوده ۶۷۵ تا ۲۶۷۰ دور در دقیقه و سرعت دورانی خروجی از جعبه‌دنده در محدوده ۱۴ تا ۵۶ دور در دقیقه و نسبت کاهش سرعت دورانی توسط جعبه‌دنده برابر ۴۸ انتخاب گردید. به منظور تغییر سرعت دورانی ماریپیچ از سامانه تغییر دور فرکانسی (اینورتر) استفاده شد. با توجه به توان مصرفی مجموعه الکتروموتور-جعبه‌دنده، از اینورتر LS مدل SV004iG5-4 استفاده شد.

۲-۱-۵- بخش الکترونیکی خشک‌کن

اهداف مورد نظر در طراحی و پیاده‌سازی سیستم الکترونیکی عبارتند از: کنترل دمای هوای ورودی به خشک‌کن از طریق روشن و خاموش نمودن المنت‌های حرارتی، اندازه‌گیری و ثبت دما و رطوبت نسبی هوا در نقاط مختلف خشک‌کن و اندازه‌گیری و ثبت سرعت جریان هوا. بخش الکترونیکی از سه زیر بخش اصلی حسگرها و مبدل، منبع تغذیه و سیستم ثبت اطلاعات و کنترل دما تشکیل شده است.

به منظور اندازه‌گیری رطوبت نسبی و دمای هوا از حسگر SHT15 استفاده شد. این حسگر از دو بخش اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوا تشکیل شده است که دارای خروجی دیجیتال است. این حسگر توانایی اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوا به ترتیب در محدوده‌های -40 تا 125°C و صفر تا 100% را دارا است. دقت اندازه‌گیری رطوبت نسبی هوا توسط این حسگر $\pm 2\%$ و دقت دمایی آن 0.3°C است. به منظور نصب آسان حسگر و جلوگیری از آسیب دیدن آن، حسگر درون غلاف استوانه‌ای جاسازی شده است.

اندازه‌گیری سرعت هوا توسط لوله پیتو Kimo مدل TPL-03-100 انجام شد. با استفاده از لوله پیتو، فشار دینامیکی (P_{dy}) جریان هوا (تفاضل فشار کل (P_t) و فشار استاتیکی (P_s)) اندازه‌گیری شد. سرعت جریان هوا بر اساس رابطه برنولی به صورت زیر محاسبه شد:

$$V = 1.291\sqrt{(P_t - P_s)} = 1.291\sqrt{P_{dy}} \quad (8)$$

به منظور اندازه‌گیری فشار دینامیکی از مبدل فشار تفاضلی Sensys مدل DPUH1000 استفاده شد. این مبدل توانایی اندازه‌گیری فشار در محدوده صفر تا ۱۰۰۰ پاسکال را دارد.

۳- نتایج و بحث

آزمایش‌های خشک‌شدن بستر سیال پیوسته جریان قالبی در شرایط پایا به منظور ارزیابی عملکرد خشک‌کن انجام شد. این آزمایش‌ها در سه سطح دمای هوا ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، سه سطح دبی تغذیه شلتوک خشک ۴۶، ۹۶ و ۱۳۵ گرم در



دقیقه، دو سطح ارتفاع سرریز ۰/۰۵ و ۰/۱ متر، سرعت ظاهری سیال‌سازی ۲/۵ متر بر ثانیه و رطوبت شلتوک ورودی به بستر در محدوده ۰/۲۹ تا ۰/۳۱ بر پایه خشک انجام شد. قبل از شروع آزمایش‌ها، خشک‌کن به مدت ۱۵ دقیقه در حالت روشن قرار گرفت تا شرایط کاری از قبیل دما و سرعت هوا تثبیت شود. سپس، تغذیه شلتوک مرطوب به درون بستر انجام شد و اندازه‌گیری زمان آغاز گردید و هم‌زمان، اندازه‌گیری و ثبت دما و رطوبت نسبی هوای خروجی در طول بستر در فواصل زمانی شش ثانیه انجام شد. زمانی که انباشت ماده جامد درون بستر از نظر ظاهری ثابت گردید، جمع‌آوری و توزین نمونه‌های شلتوک خروجی از خشک‌کن در فواصل زمانی یک دقیقه انجام شد و شرایط پایا با ثابت شدن دبی ماده خروجی تعیین گردید. کلیه پارامترهای مورد نظر از قبیل رطوبت شلتوک در خروجی و در طول بستر خشک‌کن، دما و رطوبت نسبی هوای خروجی در طول خشک‌کن و دما و رطوبت نسبی هوای خروجی از خشک‌کن در شرایط پایا اندازه‌گیری شد. به منظور اندازه‌گیری رطوبت شلتوک در طول بستر، نمونه‌های شلتوک توسط نمونه‌گیرهای با مکانیزم بازگشت فنری، از خشک‌کن خارج گردید.

به منظور بررسی شرایط کاری گوناگون، آزمایش‌های خشک‌کردن در سه سطح دمای هوا ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، سه سطح دبی تغذیه ماده خشک ۴۶، ۹۶ و ۱۳۵ گرم در دقیقه، دو سطح ارتفاع سرریز ۰/۰۵ و ۰/۱ متر، سرعت ظاهری سیال‌سازی ۲/۵ متر بر ثانیه و رطوبت شلتوک ورودی به بستر در محدوده ۰/۲۹ تا ۰/۳۱ بر پایه خشک انجام شد. در کل تعداد ۱۸ آزمایش خشک کردن انجام شد. در جدول (۲) شرایط کاری کلیه آزمایش‌ها از قبیل دمای هوای ورودی، دبی تغذیه ماده جامد و ارتفاع سرریز و همچنین رطوبت شلتوک ورودی و خروجی، مقدار انباشت ماده جامد و زمان ماند مواد درون بستر ارائه شده است.

انباشت ماده جامد در آزمایشات انجام شده در محدوده ۰/۶۹۰-۱/۷ کیلوگرم متغیر بود. انباشت ماده جامد ارتباط مستقیم با ارتفاع سرریز دارد. کمترین و بیشترین مقدار انباشت ماده جامد به ترتیب در آزمایش‌های شماره ۱ و ۱۸ حاصل شدند.

زمان ماند، میزان زمان اقامت محصول درون خشک‌کن را بیان می‌کند. این پارامتر حاصل تقسیم انباشت ماده جامد و دبی تغذیه ماده جامد می‌باشد. در این مطالعه کم‌ترین و بیشترین زمان ماند به ترتیب برابر ۶ و ۲۹/۹ دقیقه حاصل شدند.

رطوبت شلتوک خروجی در آزمایش‌های انجام شده در محدوده ۰/۱۲۹-۰/۲۱۰ بر پایه خشک تغییر نمود. زمان اقامت محصول و دمای هوا دو پارامتر تأثیرگذار بر رطوبت شلتوک خروجی می‌باشند. این دو پارامتر دارای تأثیر معکوس بر روی رطوبت محصول خروجی می‌باشند.

مشاهده بصری هیدرودینامیک بستر سیال در آزمایش‌های انجام شده بیانگر این مطلب است که جهش‌های ناگهانی در حین سیال‌سازی وجود ندارد. به عبارت دیگر، سیال‌سازی به صورت یکنواخت در طول بستر خشک‌کن انجام می‌شود. علاوه بر یکنواخت بودن تراکم توده‌ای ماده در راستای ارتفاع بستر، سطح بستر سیال کاملاً مشخص و بدون نوسان بود که این موضوع بیانگر کیفیت بالای سیال‌سازی است. همچنین تغییرات یکنواخت افت فشار هوا ناشی از بستر دلالت بر یکنواختی سیال‌سازی

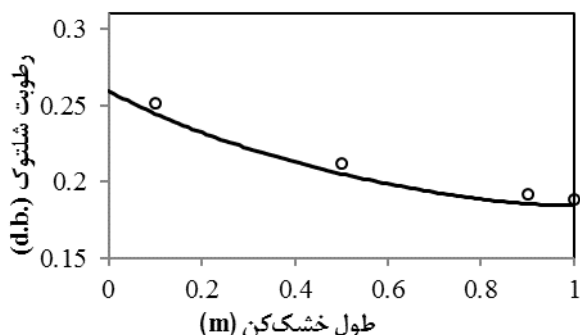


داشت. انجام آزمایش‌ها نشان داد که عمل تغذیه ماده جامد به درون بستر توسط نقاله ماریپیچی به صورت روان و بدون بازگشت ماده به درون نقاله انجام شد.

جدول ۲- (شرایط کاری و برخی نتایج آزمایش‌های خشک‌کردن)

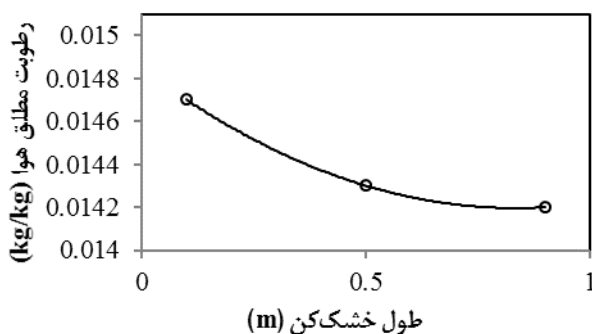
شماره آزمایش	دمای هوا (°C)	دبی تغذیه g/min	ارتفاع سرریز (m)	رطوبت ورودی (d.b.)	انباشت ماده جامد (kg)	زمان ماند min	رطوبت خروجی (d.b.)
۱	۵۰	۴۶	۰/۰۵	۰/۲۹۹	۰/۶۹۰	۱۵	۰/۱۸۸
۲	۵۰	۴۶	۰/۱	۰/۲۹۴	۱/۳۶۵	۲۹/۷	۰/۱۷۵
۳	۵۰	۹۶	۰/۰۵	۰/۲۹۷	۰/۷۶۶	۸	۰/۲۱۰
۴	۵۰	۹۶	۰/۱	۰/۲۹۶	۱/۵۵۸	۱۶/۲	۰/۱۹۰
۵	۵۰	۱۳۵	۰/۰۵	۰/۲۹۷	۰/۸۱۰	۶	۰/۲۱۵
۶	۵۰	۱۳۵	۰/۱	۰/۲۹۸	۱/۶۴۰	۱۲/۱	۰/۲۰۴
۷	۶۰	۴۶	۰/۰۵	۰/۲۸۹	۰/۶۸۵	۱۴/۹	۰/۱۶۵
۸	۶۰	۴۶	۰/۱	۰/۲۹۲	۱/۳۷۵	۲۹/۹	۰/۱۵۳
۹	۶۰	۹۶	۰/۰۵	۰/۲۹۶	۰/۷۵۴	۷/۸	۰/۱۹۳
۱۰	۶۰	۹۶	۰/۱	۰/۲۹۷	۱/۵۱۰	۱۵/۷	۰/۱۷۵
۱۱	۶۰	۱۳۵	۰/۰۵	۰/۲۹۹	۰/۸۲۰	۶/۱	۰/۲۰۳
۱۲	۶۰	۱۳۵	۰/۱	۰/۲۹۱	۱/۶۵۰	۱۲/۲	۰/۱۸۶
۱۳	۷۰	۴۶	۰/۰۵	۰/۳۰۸	۰/۶۷۵	۱۴/۷	۰/۱۴۶
۱۴	۷۰	۴۶	۰/۱	۰/۳۰۸	۱/۳۴۶	۲۹/۳	۰/۱۲۹
۱۵	۷۰	۹۶	۰/۰۵	۰/۲۹۸	۰/۷۶۵	۱۱/۱	۰/۱۷۲
۱۶	۷۰	۹۶	۰/۱	۰/۲۹۹	۱/۵۲۰	۱۵/۸	۰/۱۴۸
۱۷	۷۰	۱۳۵	۰/۰۵	۰/۲۹۶	۰/۸۱۵	۶	۰/۱۸۶
۱۸	۷۰	۱۳۵	۰/۱	۰/۲۹۳	۱/۷۰۰	۱۲/۶	۰/۱۶۰

به منظور بررسی تغییرات رطوبت در طول بستر، به عنوان نمونه مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت شلتوک در خروجی و در طول بستر به ازای آزمایش (۱) در شکل (۴) نشان داده است. در این آزمایش، مقدار رطوبت شلتوک ورودی به خشک‌کن برابر ۰/۲۹۹ بر پایه خشک می‌باشد. همان گونه که مشاهده می‌شود، رطوبت شلتوک در طول بستر به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در سایر آزمایش‌ها، تغییرات رطوبت در طول بستر رفتار مشابهی نشان داد.



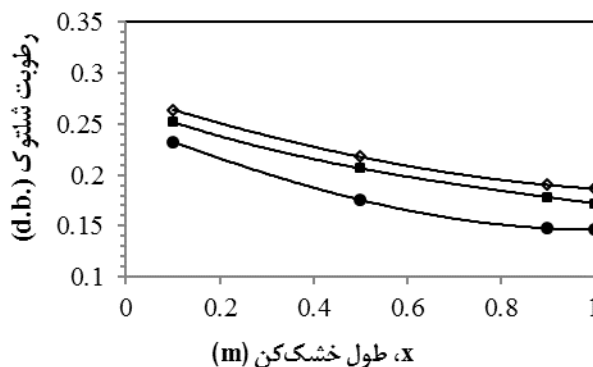
شکل ۴- (تغییر رطوبت شلتوک در طول بستر در آزمایش شماره ۱)

در شکل (۵) مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت مطلق هوای خروجی در طول بستر در آزمایش (۱) نشان داده است. در این آزمایش، رطوبت مطلق هوای ورودی برابر ۰/۰۱۴۱ است. رطوبت مطلق هوای خروجی از بستر بیشتر از رطوبت مطلق هوای ورودی است و در طول خشک‌کن به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. کاهش غیر خطی رطوبت مطلق هوای خروجی متناسب با تغییر رطوبت توده شلتوک درون بستر است.



شکل ۵- (تغییر رطوبت مطلق هوای خروجی در طول بستر در آزمایش شماره ۱)

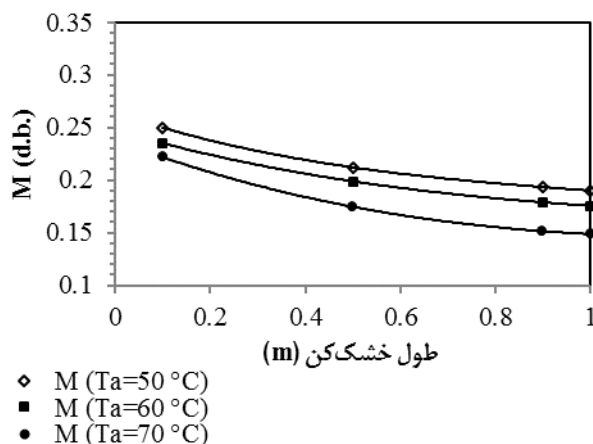
تغییر و کنترل دبی تغذیه ماده به دلیل سهولت و سادگی انجام آن، یکی از مناسب‌ترین روش‌های کنترل رطوبت در خشک‌کن پیوسته محسوب می‌شود (Mujumdar, 2006). در شکل (۶) تأثیر دبی تغذیه ماده بر نحوه تغییر رطوبت در سه سطح دبی تغذیه ۴۶، ۹۶ و ۱۳۵ گرم در دقیقه نشان داده شده است. به ازای مقادیر ثابت دمای هوا و ارتفاع سرریز، افزایش دبی تغذیه موجب افزایش رطوبت می‌شود. لازم به ذکر است که افزایش رطوبت به صورت غیرخطی است که ناشی از رفتار غیرخطی فرآیند می‌باشد. افزایش دبی تغذیه باعث کاهش زمان ماند خواهد شد که در نتیجه مدت زمان خشک‌شدن کاهش و رطوبت افزایش می‌یابد.



- M (mp,in=46 g/min)
- M (mp,in=96 g/min)
- ◇ M (mp,in=135 g/min)

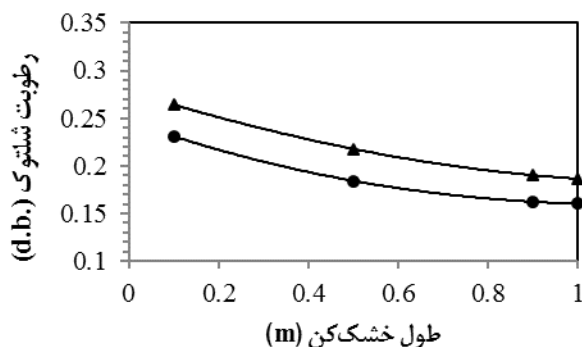
شکل ۶- تأثیر دبی تغذیه بر رطوبت شلتوک در طول خشک‌کن (دمای هوا 70°C و ارتفاع سرریز 0.5 m)

دمای هوای ورودی به خشک‌کن یکی از عوامل مؤثر بر آهنگ خشک‌شدن است. در شکل (۷) تأثیر دمای هوا بر تغییر رطوبت در سه سطح دمای هوا 50°C ، 60°C و 70°C درجه سلسیوس ارائه شده است. افزایش دمای هوا باعث افزایش شدت خشک‌شدن و کاهش بیشتر رطوبت خواهد شد. تغییر رطوبت شلتوک نسبت به تغییرات دما به صورت غیرخطی است.



شکل ۷- تأثیر دمای هوا بر رطوبت شلتوک در طول خشک‌کن (دبی تغذیه ماده 96 g/min و ارتفاع سرریز 0.1 m)

تغییر ارتفاع سرریز موجب تغییر حجم بستر و در نتیجه تغییر زمان ماند می‌شود. در شکل (۸) تأثیر ارتفاع سرریز بر نحوه تغییر رطوبت نشان داده شده است. به ازای مقادیر ثابت دمای هوا و دبی تغذیه، افزایش ارتفاع سرریز موجب کاهش رطوبت می‌شود. افزایش ارتفاع سرریز موجب افزایش زمان ماند خواهد شد که در نتیجه محصول مدت بیشتری خشک شده و رطوبت کاهش بیشتری خواهد یافت.



▲ M (hweir=0.05 m)

● M (hweir=0.1 m)

شکل ۸- (تأثیر ارتفاع سرریز بر رطوبت شلتوک در طول خشک‌کن (دمای هوا 70°C و دبی تغذیه 135 g/min))

۴- نتیجه‌گیری

خشک‌کن بستر سیال پیوسته جریان قالبی دارای سیالت یکنواخت و بدون جهش شلتوک می‌باشد، بنابراین امکان کاربرد خشک شدن بستر سیال پیوسته جریان قالبی شلتوک در مقیاس صنعتی برای سایر مواد دانه‌ای با قابلیت سیال شدن وجود دارد. عمل تغذیه ماده جامد به درون بستر توسط نقاله مارپیچی به خوبی امکانپذیر است. نتایج تحقیق حاکی از آن است که رطوبت ماده جامد در طول بستر به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. رطوبت شلتوک در ورودی بستر به صورت پیوسته نیست. به عبارت دیگر رطوبت شلتوک در ابتدای بستر کمتر از رطوبت شلتوک ورودی به بستر است که این مورد ناشی از پدیده پراکندگی محوری است. نتایج نشان داد که کاهش رطوبت مطلق هوای خروجی از بستر در طول خشک‌کن به صورت غیر خطی و متناسب با تغییر رطوبت شلتوک درون بستر است. به ازای مقادیر ثابت دمای هوا و ارتفاع سرریز، افزایش دبی تغذیه دانه موجب افزایش رطوبت شلتوک در خروجی و طول بستر شد. دمای هوای ورودی به خشک‌کن یکی از عوامل مؤثر بر آهنگ خشک شدن شلتوک بود. به ازای مقادیر ثابت دمای هوا و دبی تغذیه، افزایش ارتفاع سرریز موجب کاهش رطوبت شلتوک در خروجی و طول بستر شد. تغییر رطوبت شلتوک نسبت به تغییرات سه پارامتر دبی تغذیه، دمای هوا و ارتفاع سرریز به صورت غیرخطی مشاهده شد.

مراجع

- خوش تقاضا، م. ه. صادقی، م. امیری چایجان، ر. ۱۳۸۶. بررسی فرآیند خشک کردن شلتوک در شرایط بستر ثابت و سیال، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۴، شماره ۲.
- طباطبائی فر، ا. رفیعی، ش. ۱۳۸۱. چگونگی توزیع رطوبت در مخزن خشک‌کن نوع خوابیده طی فرآیند خشک کردن شلتوک، مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۳، شماره ۴، صفحه ۷۶۱-۷۷۵.
- Barbosa-Cánovas, G. V. Ortega-Rivas, E. Juliano, P. and Yan, H. 2005. Food powders, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Bizmark, N. Mostoufi, N. Sotudeh-Gharebagh, R. and Ehsani, H. 2010. Sequential modeling of fluidized bed paddy dryer, Journal of Food Engineering, 101, 303-308.



5. Cossen, A. G. Jimenez, M. J. and Siebenmorgen, T. J. 2003. Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures, *Journal of Food Engineering*, 59, 61-69.
6. FAOSTAT. Rice production. 2011. Available at <http://faostat.fao.org>.
7. Gupta, C. K. and Sathiyamoorthy, D. 1999. *Fluid bed technology in materials processing*, CRC Press LLC.
8. Khanali, M. 2012. Modeling and experimental investigation of continuous plug flow fluidized bed drying of rough rice, Ph.D. Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran.
9. Kreith, F. and Raton, B. 1999. *Mechanical engineering handbook*, CRC Press LLC.
10. Kunii, D. and Levenspiel, O. 1991. *Fluidization Engineering*, 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann.
11. Mills, D. 2004. *Pneumatic conveying design guide*. 2nd edition. Elsevier Butterworth-Heinemann.
12. Mohsenin, N. N. 1986. *Physical properties of plant and animal materials*, Gordon and Breach Science Publishers, New York.
13. Mujumdar, A. S. 2006. *Handbook of industrial drying*, Taylor and Francis Group, LLC.
14. Srivastava, A. Goering, C. Rohrbach, R. and Buckmaster, D. 2006. *Engineering principles of agricultural machines*, 2nd edition, American Society of Agricultural and Biological Engineers, USA.
15. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn, S. and Sripawatakul, O. 1996. Development of cross-flow fluidized bed paddy dryer, *Drying Technology*, 14, 2397-2410.
16. Soponronnarit, S. Yapha, M. and Prachayawarakorn, S. 1995. Cross-flow fluidized bed paddy dryer: prototype and commercialization, *Drying Technology*, 13, 2207-2216.
17. Taechapiroj, C. Dhuchakallaya, I. Soponronnarit, S. Wetchacama, S. and Prachayawarakorn, S. 2003. Superheated steam fluidized bed paddy drying, *Journal of Food Engineering*, 58, 67-73.
18. Tirawanichakul, S. Prachayawarakorn, S. Varayanond, W. Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S. 2004. Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy, *Drying Technology*, 22, 1731-1754.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



Design, development and evaluation of a continuous plug flow fluidized bed dryer

Abstract

In this study, the application of the continuous plug flow fluidized bed drying technique was investigated. For this purpose, a laboratory scale continuous plug flow fluidized bed dryer was designed and constructed. A backward-curved centrifugal fan with a 4 kW electromotor was selected based on the maximum pressure drop in the minimum fluidization state and the ability to produce the velocity required for fluidization of the most granular agricultural materials. The fluidization chamber was a rectangular cuboid with 100, 8, and 40 cm in length, width and height, respectively. The solid feed system was consisted of a bin, a screw conveyor, and an electromotor-gearbox. The uniform fluidization and appropriate drying confirmed that it is possible to develop the industrial prototype of the dryer based on the laboratory one. The decrease of solid moisture content along the dryer length was nonlinear. Increasing the inlet solid mass flow rate at constant inlet gas temperature and weir height increased the solid moisture content at the outlet and along the length of the dryer. At the fixed inlet gas temperature and solid mass flow rate, increasing the weir height led to decreasing the solid moisture content.

Keywords: Drying, Fluidized bed, Continuous, Plug flow, Moisture content