

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

مجید خانعلی^{۱*}، شاهین رفیعی^۲، و علی جعفری^۳

۱، استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع

طبیعی، دانشگاه تهران

۲، استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی،

دانشگاه تهران

۳، استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی،

دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۲/۱)

چکیده

در این مطالعه یک خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی پیوسته جریان قالبی طراحی و ساخته شد. دمنده سانتریفیوژ پره‌عقب‌گرد با توان موتور ۴ کیلووات براساس بیشترین افت فشار استاتیک در شرایط حداقل سیال‌سازی و قابلیت تأمین سرعت لازم سیال‌سازی اکثر محصولات دانه‌ای کشاورزی انتخاب شد. محفظه بستر سیال به صورت مکعب مستطیلی 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 ماریچی، 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 غیرخطی بود. به‌ازای مقادیر ثابت دمای هوا و ارتفاع سرریز، افزایش دبی تغذیه ماده خشک موجب افزایش رطوبت شلتوک در خروجی و طول بستر شد.

کلیدواژگان: بستر سیال، پیوسته، جریان قالبی، خشک‌کردن، رطوبت.

مقدمه

خشک‌کردن از رایج‌ترین عملیات واحد فراوری مواد گوناگون است. خشک‌کردن فرایندی پیچیده است که در آن پدیده‌های انتقال جرم و انتقال حرارت به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند. خشک‌کردن و طراحی خشک‌کن‌ها آمیزه‌ای از علم، تکنولوژی، و هنر است (Mujumdar, 2006).

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 ۴۵-۲۵ درصد بر پایه خشک برداشت می‌شود. ذخیره‌سازی شلتوک با این رطوبت قبل از سفیدکنی به‌دلیل 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 فرایند خشک‌کردن تحت‌تأثیر قرار می‌گیرند، می‌توان درصد برنج سالم،

درجه سفیدی، و کیفیت طبخ را نام برد. در ایران کاهش درصد برنج سالم از مشکلات عمده فراوری محصول است چراکه برای خشک‌کردن 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، ظرفیت محدود دارند و فرایند کنترل دقیق دما و رطوبت شلتوک برنج نیز امکان‌پذیر نیست (Tabatabaefar & Rafiee, 2002).

استفاده از خشک‌کن بستر سیال باعث کاهش معایب حاصل از کاربرد خشک‌کن‌های مخزنی می‌شود. Soponronnarit (1996) *et al.* 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 نصب‌شده در انتهای بستر انجام شد (Soponronnarit *et al.*, 1996). (Khoshtaghaza *et al.*, 2007) مطالعه فرایند خشک‌شدن شلتوک به دو روش بستر ثابت و بستر سیال را از نظر بازده حرارتی، روند خشک‌شدن، و میزان ترک‌خوردگی دانه

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 جابه‌جایی 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 هستند (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 چندمرحله‌ای انجام شود. در این روش، ابتدا خشک کردن محصول توسط خشک‌کن بستر سیال صورت می‌پذیرد 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 راستای بهینه‌سازی خشک کردن بستر سیال و همچنین روش چندمرحله‌ای انجام شده است (Tirawanichakul *et al.*, 2004; Cnossen *et al.*, 2003; Soponronnarit *et al.*, 1995).

مواد و روش‌ها

محاسبات و شاخصه‌های طراحی

در طراحی خشک‌کن مورد نظر نکات شایان توجه عبارت‌اند از: ۱. قابلیت استفاده خشک‌کن به منظور خشک کردن محصولات دانه‌ای گوناگون 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.

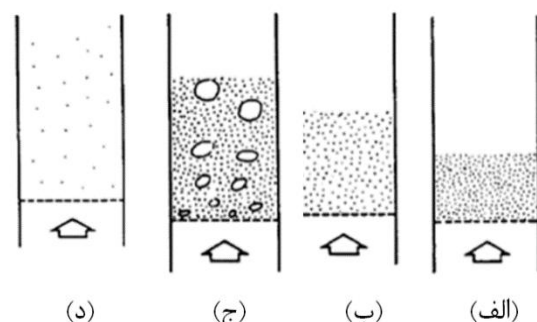
محفظه بستر سیال خشک‌کن

در ابتدا لازم بود با توجه به ظرفیت مورد نظر، ابعاد محفظه بستر سیال که دارای تأثیر مهمی بر هیدرودینامیک مواد درون خشک‌کن است، تعیین شود. در خشک‌کن‌های بستر سیال برای کم کردن تأثیرات 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

بررسی کردند. آزمایش‌ها با استفاده از خشک‌کن بستر سیال ناپیوسته و اعمال شرایط بستر ثابت و بستر سیال انجام شد. (Bizmark *et al.* (2010) مدل‌سازی خشک کردن بستر سیال جریان قالبی را به منظور پیش‌بینی رطوبت شلتوک خروجی مطالعه کردند و برای ارزیابی مدل از خشک‌کنی آزمایشگاهی با عرض و طول به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۳ متر استفاده کردند. 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.

هدف از تحقیق حاضر، بررسی اصول و مشخصه‌های طراحی و همچنین ساخت خشک‌کن بستر سیال پیوسته جریان قالبی برای مواد دانه‌ای است. سرانجام ارزیابی دستگاه از طریق خشک کردن شلتوک به عنوان محصول دانه‌ای کشاورزی بررسی خواهد شد.

سیال‌سازی، عملیات واحدی است که بستری از مواد دانه‌ای روی صفحه توزیع‌کننده‌ای 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 (Gupta & Sathiyamoorthy, 1999; Kunii & Levenspiel, 1991).



شکل ۱. حالت‌های گوناگون سیال‌سازی ماده جامد

گرمکن هوا

توان حرارتی لازم برای گرم کردن جریان هوا با رابطه ۱ محاسبه شد (Mujumdar, 2006).

(رابطه ۱)

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

که در آن: P_h توان حرارتی لازم (W)، ρ_a جرم مخصوص هوا (kg/m^3)، W_{bed} عرض خشک کن (m)، L طول خشک کن (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 ($\text{kg water/kg dry air}$)، $T_{a,in}$ دمای هوای ورودی به خشک کن (K)، $T_{a,e}$ دمای هوای محیط (K)، و U_0 سرعت ظاهری سیال سازی (m/s) است. به منظور محاسبه توان حرارتی لازم 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 بالابردن قابلیت و کارایی خشک کن (خشک کردن محصولات سنگین تر از شلتوک مانند ذرت)، بیشترین سرعت ظاهری سیال سازی برابر ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. توان حرارتی لازم در شرایط مذکور با رابطه ۱ برابر ۳۵۸۰۵ وات محاسبه شد. بنابراین به منظور افزایش کارایی دستگاه در تأمین هوای لازم در دماهای بیشتر از ۳۷۳ درجه کلوین، ۲۱ المنت حرارتی سه فاز با توان ۲۰۰۰ وات (توان کل ۴۲ کیلووات) در گرمکن نصب شد. تعداد المنتهای حرارتی فعال در گرمکن به توان حرارتی لازم و همچنین نحوه اتصال المنتها به اشکال سری، موازی، ستاره، و مثلث قابل تغییر است. شایان ذکر است که در این مطالعه حتی در بیشترین دمای هوای ورودی، تمام المنتها به صورت فعال استفاده نشد.

دمنده هوا

دمنده هوا باید به گونه‌ای انتخاب شود که قابلیت تأمین جریان هوای لازم برای سیال سازی و افت فشار حاصل را داشته باشد. دبی لازم با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (Mujumdar, 2006).

$$Q = W_{bed} L U_0 = (0.08)(1)(5) = 0.4 \quad (\text{رابطه ۲})$$

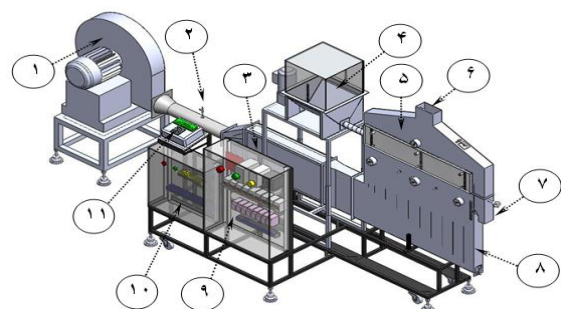
افت فشار کلی جریان در طول مسیر برابر مجموع افت فشار ناشی از بستر و افت فشار ناشی از مسیر جریان است. به منظور محاسبه افت فشار ناشی از مسیر جریان در شکل ۳ طرح‌واره مسیر هدایت جریان هوا و ابعاد کانالها و اتصالات از خروجی دمنده تا ورودی خشک کن نشان داده شده است.

در نظر گرفتن قطر معادل دانه‌های شلتوک عرض محفظه خشک کن ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و با در نظر گرفتن نسبت طول به عرض خشک کن برابر ۱۲/۵، طول خشک کن برابر ۱۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور مشاهده جریان مواد درون خشک کن، دریچه‌ای در وجه جلویی محفظه خشک کن تعبیه شد و توسط شیشه نشکن 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 روی وجه مقابل خشک کن در نظر گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری فشار هوا، سه مجرا در امتداد طول بستر برای نصب فشارسنج تعبیه شد.

طرح‌واره خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی پیوسته جریان قالبی تهیه شده در نرم‌افزار SolidWorks در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل اجزای گوناگون خشک کن مانند 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.

جدول ۱. مقادیر میانگین برخی خواص فیزیکی شلتوک

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



شکل ۲. طرح‌واره خشک کن بستر سیال پیوسته جریان قالبی (نمای ایزومتریک)

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 بازوبسته شدن دریچه مکش هوای دمنده انجام شد (Kreith & Raton, 1999).

بخش تغذیه ماده جامد

بخش تغذیه ماده جامد به دورن بستر متشکل از یک مخزن، نقاله مارپیچی، و مجموعه یک الکتروموتور-جعبه دنده است. مخزن با گنجایش ۵۰ لیتر از جنس فولاد گالوانیزه ساخته شد. این ظرفیت برای انجام آزمایش‌های خشک کردن پیوسته در مقیاس آزمایشگاهی مناسب است. با توجه به این که نقاله مارپیچی بدون محور کوچک‌تر از نقاله با محور است و برای ظرفیت‌های کم مناسب است، در این خشک‌کن از یک نقاله مارپیچی 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 مارپیچی بدون محور با قطر خارجی ۴۰، قطر داخلی ۲۴، و گام مارپیچ ۴۰ میلی‌متر انتخاب شد. توان لازم برای نقاله مارپیچی تابعی از طول، مشخصات هندسی، سرعت دورانی، جرم مخصوص ماده، و ضرایب اصطکاک داخلی و خارجی است. توان لازم برای نقاله مارپیچی با رابطه ۵ محاسبه شد (Srivastava et al., 2006).

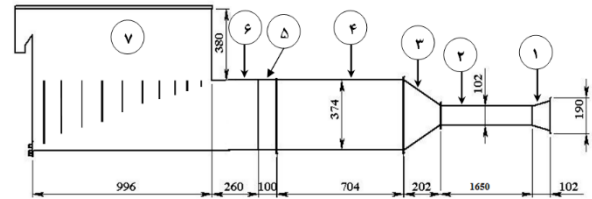
$$P_{sc} = 3.54 I_{sc} Q_s \rho_{sb} g (2\pi n_{sc} \sqrt{l_{p,sc}/g})^{0.14} (d_{o,sc}/l_{p,sc})^{-10.12} (l_{i,sc}/l_{p,sc})^{0.11} f(\theta) \mu_{sc}^{2.05}$$

که در آن: $f(\theta) = 6.94(1.3 - \cos^2\theta)$ ، Q_s دبی حجمی مارپیچ (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 مارپیچ (m)، θ زاویه تمایل نقاله به نسبت 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 مارپیچ با رابطه ۶ محاسبه شد.

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

در این صورت، سرعت دورانی مارپیچ برابر ۴۲ دور در



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) براساس ضریب اصطکاک و افت فشار بخش دوم (رابطه ۴) براساس 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 خیس‌شده (m) کانال است. ضریب اصطکاک برحسب زبری نسبی و عدد رینولدز جریان و با استفاده از نمودار مودی در بخش‌های متفاوت مسیر جریان شکل ۳ در محدوده ۰/۰۲-۰/۲۸ تعیین شد. ضریب افت فشار در بخش‌های گوناگون 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) است 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 است.

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 لازم به ترتیب برابر ۴۵۲۷ پاسکال و ۰/۴ مترمکعب بر ثانیه را تأمین کند. با توجه به این که دمنده‌های سانتریفیوژ پره‌عقب‌گرد به نسبت سایر دمنده‌ها قادر به تأمین فشار استاتیک بالاتری هستند و علاوه بر تأمین دبی لازم بازده بالایی نیز دارند، یک دمنده سانتریفیوژ پره‌عقب‌گرد با

۱۰۰ درصد را دارد. دقت اندازه‌گیری رطوبت نسبی هوا توسط این حسگر ± 2 درصد و دقت دمایی آن ± 0.3 °C است. به‌منظور نصب آسان حسگر و جلوگیری از آسیب دیدن آن، حسگر درون غلاف استوانه‌ای جاسازی شده است.

اندازه‌گیری سرعت هوا با 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 براساس رابطه برنولی به‌صورت رابطه ۸ محاسبه شد:

$$V = 1.291\sqrt{(P_t - P_s)} = 1.291\sqrt{P_{dy}} \quad (\text{رابطه ۸})$$

به‌منظور 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.

نتایج و بحث

آزمایش‌های خشک‌شدن بستر سیال پیوسته جریان قالبی در شرایط پایا به‌منظور ارزیابی عملکرد خشک‌کن انجام شد. این آزمایش‌ها در سه سطح دمایی 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 آزمایش‌ها، خشک‌کن به‌مدت ۱۵ دقیقه در حالت روشن قرار گرفت تا شرایط کاری مانند دما و سرعت هوا تثبیت شود. سپس، تغذیه شلتوک مرطوب به درون بستر انجام شد و اندازه‌گیری زمان آغاز شد 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 شد، جمع‌آوری و توزین نمونه‌های شلتوک خروجی از خشک‌کن در فواصل زمانی یک دقیقه انجام شد و شرایط پایا با ثابت‌شدن دبی ماده خروجی تعیین شد. همه 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. به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت شلتوک در طول بستر، نمونه‌های شلتوک توسط نمونه‌گیرهایی با مکانیزم بازگشت فنی، از خشک‌کن خارج شد. به‌منظور بررسی شرایط کاری گوناگون، آزمایش‌های خشک‌کردن در سه سطح دمایی هوا ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه

دقیقه تعیین شد. با توجه به مشخصات موجود، توان لازم نقاله ماریپیج براساس رابطه ۵ برابر ۰/۱۸ وات محاسبه شد. با توجه به مقدار کم توان مصرفی محاسبه‌شده و به‌منظور بررسی صحت محاسبات، از رابطه ۷ استفاده شد. در این رابطه به‌منظور محاسبه توان مصرفی (Barbosa-Cánovas et al. (2005) یک ماریپیج افقی را ارائه کرده‌اند.

$$P_{sc} = \frac{Q_s \rho_s b L_{sc} f_{sc}}{4500} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن: P_{sc} توان (hp)، Q_s دبی حجمی (m^3/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 لازم نقاله ماریپیج براساس رابطه ۷ برابر ۰/۱۸۷ وات محاسبه شد.

با توجه به سرعت دورانی و توان لازم، 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 شد. به‌منظور تغییر سرعت دورانی ماریپیج از سامانه تغییر دور فرکانسی (اینورتر) استفاده شد. با توجه به توان مصرفی مجموعه الکتروموتور-جعبه‌دنده، از اینورتر LS مدل SV004iG5-4 استفاده شد.

بخش الکترونیکی خشک‌کن

اهداف مورد نظر در طراحی و پیاده‌سازی سیستم الکترونیکی عبارت‌اند از: کنترل دمایی هوای ورودی به خشک‌کن از طریق روشن‌وخاموش کردن المنت‌های حرارتی، اندازه‌گیری و ثبت دما و رطوبت نسبی هوا در نقاط گوناگون خشک‌کن، و اندازه‌گیری و ثبت سرعت جریان هوا. بخش الکترونیکی از سه زیربخش اصلی حسگرها و مبدل، منبع تغذیه T و سامانه ثبت اطلاعات و کنترل دما تشکیل شده است.

به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت نسبی و دمایی 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 ۱۲۵-۴۰ درجه سلسیوس و صفر تا

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 سیال سازی 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 همه آزمایش ها همچون دمای هوای ورودی، دبی تغذیه ماده جامد، 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 آزمایش های انجام شده در محدوده ۱/۷-۰/۶۹۰ کیلوگرم متغیر بود. انباشت ماده جامد ارتباط مستقیم با ارتفاع سرریز دارد. کمترین و بیشترین مقدار انباشت ماده جامد به ترتیب در آزمایش های شماره ۱ و ۱۸ حاصل شدند.

زمان ماند، میزان زمان اقامت محصول درون خشک کن را بیان می کند. این پارامتر حاصل تقسیم انباشت ماده جامد و دبی تغذیه ماده جامد است. در این مطالعه کمترین و بیشترین زمان

ماند به ترتیب برابر ۶ و ۲۹/۹ دقیقه حاصل شدند. رطوبت شلتوک خروجی در آزمایش های انجام شده در محدوده ۰/۱۲۹-۰/۲۱۰ بر پایه خشک تغییر کرد. زمان اقامت محصول و دمای هوا دو پارامتر تأثیرگذار بر رطوبت شلتوک خروجی هستند. این دو پارامتر دارای تأثیر معکوس بر رطوبت محصول خروجی هستند.

مشاهده بصری هیدرودینامیک بستر سیال در آزمایش های انجام شده بیانگر آن است که جهش های ناگهانی در حین سیال سازی وجود ندارد. به عبارت دیگر، سیال سازی به صورت یکنواخت در طول بستر خشک کن انجام می شود. علاوه بر یکنواخت بودن تراکم توده ای ماده در راستای ارتفاع بستر و سطح بستر سیال کاملاً مشخص و بدون نوسان بود که این موضوع بیانگر کیفیت بالای سیال سازی است. همچنین تغییرات یکنواخت افت فشار هوا ناشی از بستر دلالت بر یکنواختی سیال سازی داشت. انجام آزمایش ها نشان داد که عمل تغذیه ماده جامد به درون بستر با نقاله مارپیچی به صورت روان و بدون بازگشت ماده به درون نقاله انجام شد.

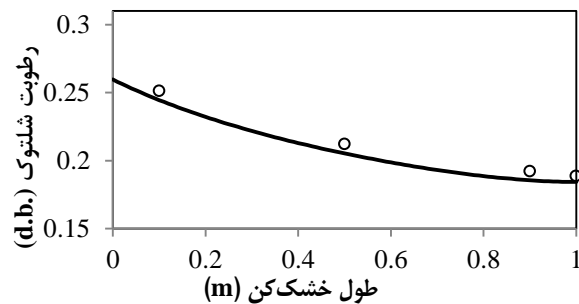
جدول ۲. شرایط کاری و برخی نتایج آزمایش های خشک کردن

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

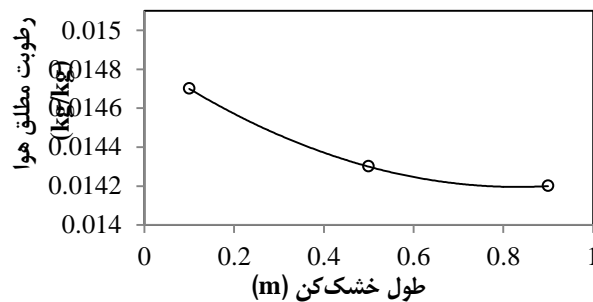
می‌یابد. کاهش غیر خطی رطوبت مطلق هوای خروجی متناسب با تغییر رطوبت توده شلتوک درون بستر است. تغییر و کنترل دبی تغذیه ماده به دلیل سهولت و سادگی انجام آن، یکی از مناسب‌ترین روش‌های کنترل رطوبت در خشک‌کن پیوسته محسوب می‌شود (Mujumdar, 2006). در شکل ۶ تأثیر دبی تغذیه ماده بر نحوه تغییر رطوبت در سه سطح دبی 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. شایان ذکر است که افزایش رطوبت غیرخطی است که ناشی از رفتار غیرخطی فرایند است. افزایش دبی تغذیه باعث کاهش زمان ماند خواهد شد که در نتیجه مدت زمان خشک‌شدن کاهش و رطوبت افزایش می‌یابد.

به‌منظور بررسی تغییرات رطوبت در طول بستر، به‌عنوان نمونه مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت شلتوک در خروجی و در طول بستر به‌ازای آزمایش ۱ در شکل ۴ نشان داده است. در این آزمایش، مقدار رطوبت شلتوک ورودی به خشک‌کن برابر ۰/۲۹۹ بر پایه خشک است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود رطوبت شلتوک در طول بستر به‌صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. شایان ذکر است که در سایر آزمایش‌ها، تغییرات رطوبت در طول بستر رفتار مشابهی نشان داد.

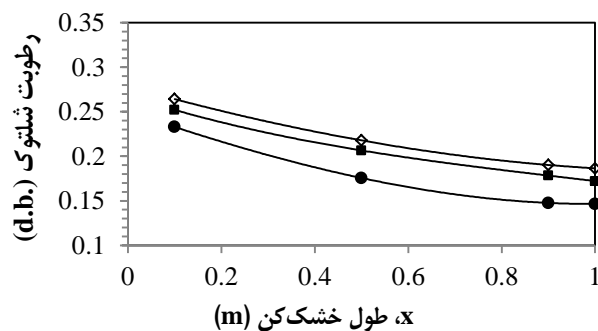
در شکل ۵ مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت مطلق هوای خروجی در طول بستر در آزمایش ۱ نشان داده است. در این آزمایش رطوبت مطلق هوای ورودی برابر ۰/۰۱۴۱ است. رطوبت مطلق هوای خروجی از بستر بیشتر از رطوبت مطلق هوای ورودی است و در طول خشک‌کن به‌صورت غیر خطی کاهش



شکل ۴. تغییر رطوبت شلتوک در طول بستر در آزمایش شماره ۱



شکل ۵. تغییر رطوبت مطلق هوای خروجی در طول بستر در آزمایش شماره ۱

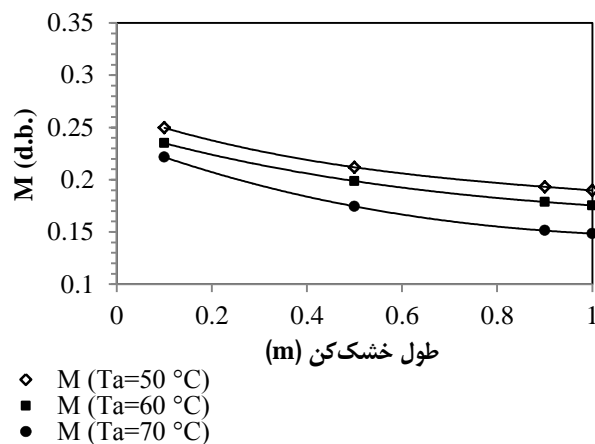


- M (mp,in=46 g/min)
- M (mp,in=96 g/min)

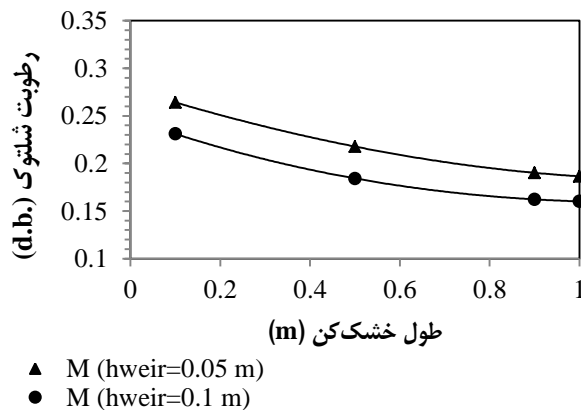
شکل ۶. تأثیر دبی تغذیه بر رطوبت شلتوک در طول خشک‌کن (دمای هوا ۷۰ °C و ارتفاع سرریز ۰/۰۵m)

تغییر زمان ماند می‌شود. در شکل ۸ تأثیر ارتفاع سرریز بر نحوه خشک شدن است. در شکل ۷ تأثیر دمای هوا بر تغییر رطوبت در سه سطح دمای هوا ۵۰، ۶۰، و ۷۰ درجه سلسیوس ارائه شده است. افزایش دمای هوا باعث افزایش شدت خشک شدن و کاهش بیشتر رطوبت خواهد شد. تغییر رطوبت شلتوک به نسبت تغییرات دما به صورت غیرخطی است. تغییر ارتفاع سرریز موجب تغییر حجم بستر و در نتیجه

دمای هوای ورودی به خشک کن از عوامل مؤثر بر روند خشک شدن است. در شکل ۷ تأثیر دمای هوا بر تغییر رطوبت در سه سطح دمای هوا ۵۰، ۶۰، و ۷۰ درجه سلسیوس ارائه شده است. افزایش دمای هوا باعث افزایش شدت خشک شدن و کاهش بیشتر رطوبت خواهد شد. تغییر رطوبت شلتوک به نسبت تغییرات دما به صورت غیرخطی است. تغییر ارتفاع سرریز موجب تغییر حجم بستر و در نتیجه



شکل ۷. تأثیر دمای هوا بر رطوبت شلتوک در طول خشک کن (دبی تغذیه ماده ۹۶ g/min و ارتفاع سرریز ۰/۱ m)



شکل ۸. تأثیر ارتفاع سرریز بر رطوبت شلتوک در طول خشک کن (دمای هوا ۷۰ °C و دبی تغذیه ۱۳۵ g/min)

است که این مورد ناشی از پدیده پراکندگی محوری است. نتایج نشان داد که کاهش رطوبت مطلق هوای خروجی از بستر در طول خشک کن 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 خشک کن 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 در مقایسه با تغییرات سه پارامتر دبی تغذیه، دمای هوا، و ارتفاع سرریز به صورت غیرخطی مشاهده شد.

نتیجه گیری

خشک کن بستر سیال پیوسته جریان قالبی دارای سیالیت یکنواخت و بدون جهش شلتوک است، 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 با نقاله مارپیچی به خوبی امکان پذیر 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 پیوسته نیست. به عبارت دیگر رطوبت شلتوک در ابتدای بستر کمتر از رطوبت شلتوک ورودی به بستر

REFERENCES

- Barbosa-C´anovas, G. V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P. & Yan, H. (2005). *Food powders*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Bizmark, N., Mostoufi, N., Sotudeh-Gharebagh, R. & Ehsani, H. (2010). Sequential modeling of fluidized bed paddy dryer. *Journal of Food Engineering*, 101, 303-308.
- Cnossen, A. G., Jimenez, M. J. & Siebenmorgen, T. J. (2003). Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. *Journal of Food Engineering*, 59, 61-69.
- Food and Agriculture Organization. (2011). *Rice production*. Retrieved September 10, 2014, from <http://faostat.fao.org>.
- Gupta, C. K. & Sathiyamoorthy, D. (1999). *Fluid bed technology in materials processing*. CRC Press LLC.
- Khanali, M. (2012). Modeling and experimental investigation of continuous plug flow fluidized bed drying of rough rice. Ph. D. dissertation, University of Tehran, Teharn, Iran.
- Khoshtaghaza, M. H., Sadeghi M. & Amirichayjan, R. (2007). Study of rough rice drying process in fixed and fluidized bed conditions. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(2). (In Farsi)
- Kreith, F. & Raton, B. (1999). *Mechanical engineering handbook*. CRC Press LLC.
- Kunii D. & Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*. (2nd ed.). Boston: Butterworth-Heinemann.
- Mills, D. (2004). *Pneumatic conveying design guide*. (2nd ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of industrial drying*. (3rd ed.). Poland: Taylor and Francis Group, LLC.
- Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. & Sripawatakul, O. (1996). Development of cross-flow fluidized bed paddy dryer. *Drying Technology*, 14, 2397-2410.
- Soponronnarit, S., Yapha, M. & Prachayawarakorn, S. (1995). Cross-flow fluidized bed paddy dryer: prototype and commercialization. *Drying Technology*, 13, 2207-2216.
- Srivastava, A., Goering, C., Rohrbach, R. & Buckmaster, D. (2006). *Engineering principles of agricultural machines*. (2nd ed.). American Society of Agricultural and Biological Engineers, USA.
- Tabatabaeefar, A. & Rafiee, S. H. (2002). Moisture content distribution across a batch-type rough rice dryer. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 33(4), 761-775. (In Farsi)
- Taechapairoj, C., Dhuchakallaya, I., Soponronnarit, S., Wetchacama, S. & Prachayawarakorn, S. (2003). Superheated steam fluidized bed paddy drying. *Journal of Food Engineering*, 58, 67-73.
- Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul, P. & Soponronnarit, S. (2004). Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy. *Drying Technology*, 22, 1731-1754.