Archive of SID

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ – ۰۲۱
www.Reservoir.ir

مطالعه آزمایشگاهی عملکرد یک خشک کن سینی دار خورشیدی در حالت استفاده ازمواد تغییر فاز دهنده

مجتبی مجرد[۱]، امیر رحیمی[۲]، امین نوروزی[۳]، امان اله تک زاده[۴]
اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی
Mojtaba.mojarrad@gmail.com

چکیده: در این تحقیق که در آن از مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌سازی انرژی بهره گرفته شده، عملکردیک خشک‌کن سینی‌دار خورشیدی غیرمستقیم با جریان اجباری مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی این خشک‌کن خورشیدی استفاده از قابلیت ذخیره‌سازی انرژیدر بخش جمع‌کننده آن می‌باشد. اثر متغیرهایی مانند سرعت هوای ورودی و سطح جمع‌کننده بر محتوای رطوبت نهایی نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، مقدار این پارامترها در دو سطح در نظر گرفته شد. سطوح انتخاب شده برای سرعت هوای ورودی ۱ و ۳ متر بر ثانیه و برای سطح جمع کننده ۲ و ۴/۲ متر مربع بودند، همچنین تأثیر استفاده یا عدم استفاده از مواد ذخیره ساز انرژی مطالعه گردید. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از مواد ذخیره‌ساز انرژی در سرعت‌های کمتر هوای ورودی و با استفاده از جمع‌کننده با سطح بیشتر محتوی رطوبت محصول نهایی کمتر خواهد بود. از سوی دیگر اگر دمای محیط بالاتر باشد، حتی در سرعت‌های بالاتر هوای ورودی، می‌توان به محصولی با رطوبت کمتر دست یافت. همچنین اثر استفاده از مواد ذخیره‌ساز انرژی در تغییرات دمای خروجی از جمع‌کننده در سرعت‌های مختلف هوا مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، خشک‌کنسینی‌دار خورشیدی، جمع‌کننده، ذخیره‌سازی انرژی

---

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی،گروه مهندسی شیمی
[۲] دانشیار، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی،گروه مهندسی شیمی
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی،گروه مهندسی شیمی
[۴] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی،گروه مهندسی شیمی

www.SID.ir

Archive of SID

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ – ۰۲۱
www.Reservoir.ir

۱. مقدمه

بحران انرژی از مسائل مهم جوامع بشری است و یافتن راهی برای تهیه‌آسان انرژی پاک، ایمن، پایا و همیشگی یکی از اهداف اساسی محققان بوده است. از آنجا که سوخت های فسیلی و هسته ایبه صورت بالفعل یا بالقوه قابلیت ایجاد آلودگی های زیست محیطی دارند و استفاده دائمی از آنها مقدور نیست،تمایل برای استفاده از منابع انرژیتجدید پذیر از جمله خورشید، آب و باد افزایشیافته است. در این میان استفاده از انرژی خورشیدیبیشترین توجه را به خود جلب کرده است.بر اساس مطالعات انجام شده مصرف انرژی در جهان هر ۲۰ سال دو برابر می‌شود. این مسئله اهمیتاستفاده از منابع تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیسترا بیش از پیش روشن می‌کند. در ایران به دلیل زیاد بودن روزهای آفتابی، رطوبت کم و پائین بودن ارتفاع بسیاری از مناطق، انرژی خورشیدی می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت های فسیلی و هسته‌ای باشد[۱]. از سویی ذخیره‌سازیانرژی گرمایی خورشید نه تنها نقش مهمی در حفظ انرژیو توزیع مناسب زمان بهره‌برداری دارد بلکه کارایی و قابلیت اطمینان گستره‌ی وسیعی از سامانه‌های انرژی را بهبود می‌بخشد. این مسئله در مواردیمانند خورشید که منبع انرژی منبع با دسترسی متناوب باشد، اهمیت بیشتری می‌یابد.ذخیره انرژی حرارتی[۵] در مکان‌هاییکه میزان انرژی خورشیدی در آن‌ها دارای نوسان استو یا در مناطقی که اختلاف دمای زیادی بین روز و شب وجود دارد، بسیار مفید است. در سامانه‌های گرمایشی خورشیدی، آب به عنوان ماده‌ی ذخیرهکننده حرارتمورد استفاده قرار می‌گیرد در حالیکه برایسامانه‌هایی با سیال عامل هوا از یک بستر جامد نظیر سنگ استفاده می‌شود. یکی از مسائل مهم در هنگام استفاده از مواد ذخیره کننده انرژی حرارتی، فضای مورد نیاز برای نگه‌داری آن‌ها می‌باشد. به عنوان مثال فضای حجمی مورد نیاز به هنگام استفاده از آب تقریباً ۵ برابر بیش از فضای مورد نیاز برای نمک سولفات سدیم است. کاهش فضای مورد نیاز برای نگه‌داری این مواد منجر به کاهش هزینه‌های عایق‌کاری و ساخت خواهد شد. ذخیره انرژی حرارتی به عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی برای تامین انرژی در آینده شناخته می‌شود. انرژی حرارتی را می‌توان با ذخیره گرمای محسوس، ذخیره گرمای نهان و ذخیره گرمای واکنش شیمیایی برگشت‌پذیر، ذخیره نمود. از بین این روش‌ها،ذخیره انرژی گرمای نهان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM[۶]) موثرترین تکنیک به شمار می‌آید. مؤثر بودن این روش ناشی از بهره‌مندی از شرایط دما ثابت در دوره‌ای طولانی از فرآیند ذخیره‌سازی و قابلیت بالای ذخیره انرژی است. در میان مواد تغییر فاز دهنده پلی‌اتیلن گلایکول مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌است. خصوصیات مناسباین ماده مانند دمای تغییر فاز مطلوب، ظرفیت گرمای نهان بالا، ذوب متجانس، غیر سمی بودن، عدم فوق سرمایش، فشار بخار کم، مقدار کم تغییر حجم حین تغییر فاز جامد-مایع و پایداری حرارتی و شیمیایی بالا علاقه‌مندی به استفاده از این ماده را افزایش داده‌است[۲].

دواهاستین و همکاران (۲۰۰۶) امکان استفاده از ذخیره حرارتی در پارافین جامد به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده را بررسی کردند. آن‌ها از این ماده به منظور حفظ انرژی خورشیدی حین خشک کردن و آزاد کردن در شرایطی که دسترسی به انرژی ناکافی یا غیرممکن است، مورد استفاده قرار دادند و اثر آن روی سینتیک خشک کردن سیب‌زمینی شیرین را بررسی کردند. خصوصیات انتقال حرارت، پروفیل‌های دما و همچنین اثر سرعت و دمای هوای ورودی بر دوره‌های شارژ و تخلیه بررسی شد[۳]. کنیسارین و همکاران نیز در سال ۲۰۱۰ بررسی جامعی در رابطه با موادی که می توانند به عنوان PCMدر دماهای بالاتر از ۱۲۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به کار گرفته شوند انجام دادند. باید گفت مسلما هیچ ماده‌ای همه مشخصات مورد انتظار لازم به عنوان یک PCM را ندارد و انتخاب یک PCM برای کاربردی معین لازمه تامل دقیق

---

[۵] Thermal energy saving

[۲] Phase change material

www.SID.ir

Archive of SID

www.Reservoir.ir

بر روی خواص مختلف مواد است. طراحی و تعیین ظرایف عملیاتی یک سامانه ذخیره‌ساز انرژی به صورت گرمای نهان به خواص فیزیکی و شیمیایی PCM مورد استفاده بستگی دارد که از آن جمله می توان به نسبت دانسیته ی ذخیره سازی انرژی به حجم مورد نیاز اشاره نمود[۴].

خشک‌کن‌هایخورشیدی نمونه‌ای از سامانه‌های خورشیدی هستند که قابلیت بکارگیری مواد همراه با تغییر فاز دهنده را به خوبی دارا هستند. بهره‌گیری از PCM ها در این سامانه‌ها با هدف ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی و پیوسته سازی فرایند خشک شدن در ساعات عدم حضور خورشید می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای در خصوص این نوع خشک‌کن‌ها و برای انواع مواد خشک کننده صورت گرفته است.[۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱]

مطالعه و بررسی فرایند خشک کردن در سامانه‌های خورشیدی بدلیل بروز و وجود همزمان پدیده‌های انتقال حرارت و انتقال جرم از پیچیدگی و جذابیت فراوانی برخوردار است. خواص جامد خشک شونده و رفتار PCM مورد استفاده در این تحلیل‌ها بسیار مؤثر می‌باشد. مطالعه عملکرد سامانه‌های خورشیدی بهرمند از PCM با هدف افزایش راندمان عملکرد انرژی و اکسرژی نیز حائز اهمیت است.

هدف از انجام این تحقیق بررسی عملی وتئوری کارایی و عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی سینی‌دار بهرمند از فرایند ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی در مواد تغییر فاز دهنده (PCM) می‌باشد. به بیان دیگر این تحقیق با هدف مطالعه میزان افزایش کارایی سامانه خشک‌کنخورشیدی با افزایش مدت زمان بهره‌گیری از انرژی خورشیدی صورت می‌گیرد. پیشتر ذکر گردید کاربرد مواد PCM باعث ذخیره‌سازی انرژی در طی مدت تابش خورشید و استفاده از آن در طول شب می‌شود. این ویژگی بهره‌گیری از انرژی خورشیدی را برای محصولات کشاورزی که نیاز به خشک شدن در شرایط متعادل وآرام دارند نیز فراهم می‌سازد.

۲. مواد و روش‌ها

۱،۲. خشک‌کن خورشیدی

شماتیک سامانه مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است. این سامانه شامل محفظه‌ی خشک-کن، دو جمع‌کننده‌یخورشیدی به شکل صفحه تخت و ترموکوپل‌های لازم برای اندازه‌گیری دما می‌باشد. در درون خشک‌کن از دو سینی به طور همزمان استفاده شده و هوا با استفاده از یک دمنده به گردش در می‌آمد. این فن در ابتدای جمع‌کننده اول نصب شد. سه سبد کوچک جهت قرار دادن نمونه‌ها برای هر سینی در نظر گرفته شد. تمامی دیواره‌های خارجی سامانهرای هرادن نمونه انرژی بسیار بالا است.هی زیاد ین بحث بشه،نمیدونم حالا خودتون ببینی) نکک سولفات سدیم است. عایقشدند تا از اتلاف حرارت جلوگیری شود. در زیرپایه‌هایخشک‌کن چهار عدد چرخ تعبیهگردیده است که امکان تغییر مکان جمع‌کننده‌ها در زاویه‌ای مناسب به منظورجذب حداکثری تشعشع خورشیدی فراهم شود. آزمایش‌های خشک شدندرحضورموادذخیره‌ساز انرژی و همچنینبدون استفاده از این مواد انجام شدند.در آزمایش‌هایی که با استفاده از ماده ذخیره‌ساز انرژی انجام گردید از نوعی پارافین استفاده شد. مقدار پارافین مورد استفاده ۶۵/۶ کیلوگرم بود.

پارافین در ظروفی از جنس آهن گالوانیزه با ضخامت پوسته ۰/۹ میلی‌متربا ابعاد ۱ متر طول، ۲۰ سانتی‌متر عرض و ۴ سانتی‌متر ارتفاع قالب‌گیری شد. ۱۰ عدد از این جعبه‌هاساختهودرکف جمع‌کنندهشماره ۱ قراردادهشدند. فاصله بالای جعبه‌هاتاشیشه جمع‌کنندهشماره ۱، ۱۶ سانتی‌متر می‌باشد، که هوای دمیده شده از فن از اینفضا عبور می‌کند. نحوه قرارگیری جعبه‌هادرجمع‌کنندهدرشکل (۱) نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل (۱): نمای شماتیک خشک کن خورشیدی

۱. جهت تابش خورشید به جمع‌کننده
۲. هوای ورودی به جمع‌کننده
۳. جمع‌کننده شماره ۱
۴. جعبه‌های مواد ذخیره‌ساز انرژی
۵. لوله آلومینیومی
۶. صفحه جاذب جمع‌کننده شماره۲
۷. شیشه جمع‌کننده شماره ۲
۸. نمونه‌ها
۹. دریچه‌های ورود و خروج
۱۰. خروجی هوا از خشک کن

۲,۲. مواد

ماده خشک شونده منتخب در این تحقیق میوه موز می‌باشد. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها،ابتداپوستموزهاگرفته شد و از هر نمونه ۶ قسمت با ابعاد برابر انتخاب شد.برای هر آزمایش ۷۰ گرم از نمونه‌هاوزنودرسبدها قرار داده شد. نمونه‌ها بر روی سبدها گذاشته شده و از طریق دریچه‌هایی که در درب خشک‌کن تعبیه شده بودند، در محفظه خشک‌کن قرار داده می‌شدند. به منظور تعیین وزن محصول از یک ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم (model: AND CF-300) استفاده شد. دمای هوای محیط توسط دماسنج دیجیتالی مخصوص (مدل:P 300w temp) با دقت یک دهم درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری سرعت هوا از یک بادسنج (model: Testo 425) با دقت یک صدم متر بر ثانیه استفاده شد. از یک سیستم اندازه‌گیری دمای هوا شامل یک ثبت کننده داده که به تعدادی حسگر دمایی متصل است به منظور تعیین دما در قسمت‌های مختلف داخل محفظه، جمع‌کننده و محیط استفاده گردید. فاصله زمانی ثبت داده‌ها در ابتدا ۳۰ دقیقه و به تدریج با کاهش سرعت خشک شدن افزایش یافت. پس از آزمایش، داده‌های آزمایشگاهی به صورت منحنی‌های سنیتیکی خشک شدن تهیه گردید.

مشخصات ماده ذخیره‌ساز انرژی مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): خواص ترموفیزیکی پارافین مورد استفاده در این تحقیق

خاصیت	واحد	مقدار
دمای ذوب	^{o}C	۶۰
دانسیته فاز جامد	kg/m^3	۹۱۰

www.SID.ir

Archive of SID

www.Reservoir.ir

دانسیته فاز مایع	kg/m^3	۸۲۰
ضریب هدایت حرارتی فاز جامد	W/m.K	۰/۲۴
ضریب هدایت حرارتی فاز مایع	W/m.K	۰/۲۲
ظرفیت گرمای ویژه فاز جامد	J/kg.K	۲۰۰۰
ظرفیت گرمای ویژه فاز مایع	J/kg.K	۲۱۵۰
گرمای نهان ذوب	J/kg	۱۹۰۰۰۰

۲،۳. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در تابستان ۱۳۹۳ انجام شد. یکی از اهداف این تحقیق بررسی اثر سرعت هوای ورودی و سطح جمع کننده بر کارایی خشک‌کن در یک بازه‌ی سه روزه بود. سطوح انتخاب شده برای این پارامترها در جدول (۳) نشان داده شده است. در طی آزمایش‌ها محتوای رطوبت مطلق هوای خشک‌کنندهاندازه‌گیری و ثبت می‌گردید.

جدول (۳): پارامترهای انتخاب شده و سطوح آن‌ها

پارامتر و واحد	سطوح	
سرعت هوای ورودی (m/s)	۱	۳
سطح جمع کننده (m^2)	۲	۴/۲

۳. نتایج و بحث

در این بخش، به ارائه و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها پرداخته شده است. لازم به ذکر است که به منظور جلوگیری از خطای سیستماتیک، آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شدند. از طرفی هر آزمایش ۲ بار تکرار شده و مقادیر متوسط بدست آمده گزارش شده است.

۱،۳. اثر سرعت هوا بر فرایند خشک شدن در شرایط استفاده از یک جمع کننده بدون حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی

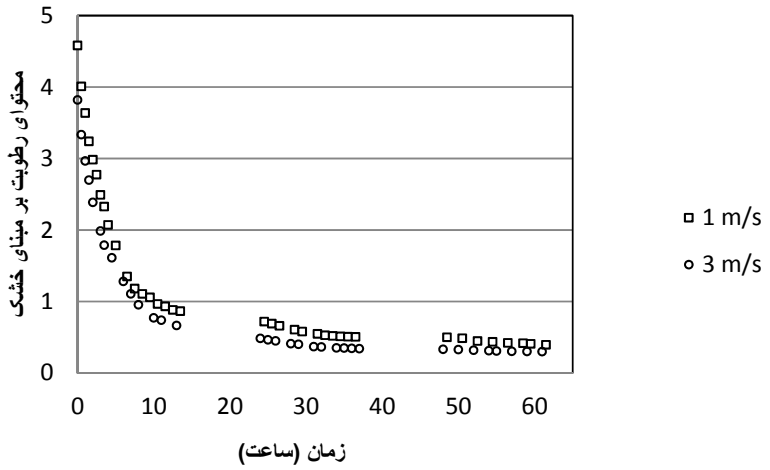
در این حالت از ورودی مستقیم انرژی خورشید به درون خشک‌کن با پوشاندن سطح شیشه‌ای خشک‌کن جلوگیری به عمل آمد. به عبارت دیگر هوای خشک صرفاً در جمع‌کننده اول گرم گردید.

شکل(۲) اثر سرعت هوای ورودی بر تغییر محتوای رطوبت با زمان را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل اگر سرعت هوای ورودی کمتر باشد، محتوای رطوبت لحظه‌ای و نهایی کمتر خواهد بود. نتایج به دست آمده تنها برایبک جمع‌کننده (جمع‌کننده اول) در شکل(۲) نشان داده شده است.

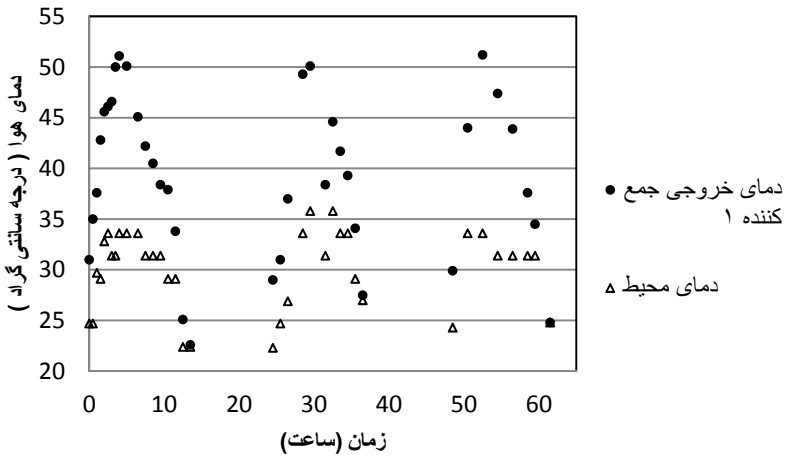
www.SID.ir

Archive of SID

www.Reservoir.ir



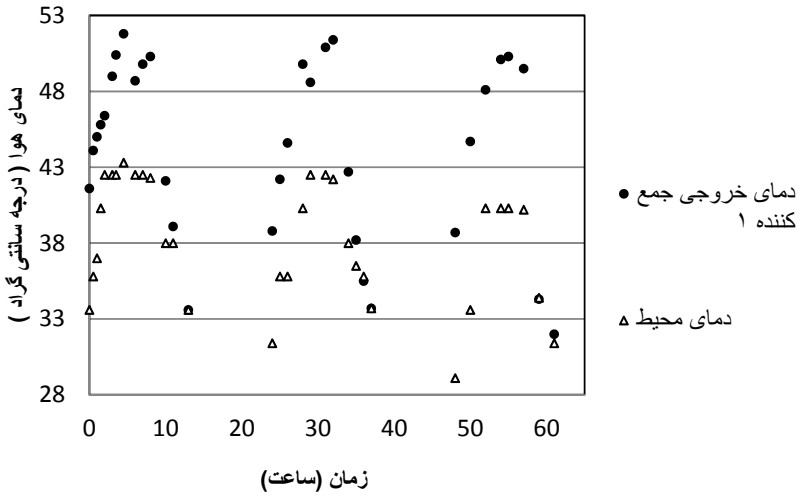
شکل (۲): تغییرات محتوای رطوبت بدون حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی (سرعت هوای ورودی: ۱m/s و ۳m/s، سطح جمع‌کننده: ۲m^2)



شکل (۳): تغییرات دمایهوای خروجی جمع‌کننده و محیط بدون حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی (سرعت هوای ورودی: ۱m/s، سطح جمع‌کننده: ۲m^2)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۴): تغییرات دمایهوای خروجی جمع‌کننده و محیط بدون حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی (سرعت هوای ورودی: ۳m/s، سطح جمع‌کننده: $۲m^2$)

در سرعت‌های کم هوای عبوری، افزایش دمای هوا در جمع‌کننده خورشیدی اول بیشتر است، لذا محیط خشک‌کن گرمتر و طبعاً سرعت تبخیر و کاهش رطوبت جامد بیشتر خواهد بود. به عبارت دیگر به دلیل اینکه فرایند خشک شدن از موز فرایندی است که توسط نفوذ مولکولی درون نمونه کنترل می‌شود، افزایش سرعت سیال که به معنی کاهش مقاومت انتقال جرم بیرونی است، تاثیری بر سرعت خشک شدن ندارد. در حالیکه افزایش دمای محفظه و به طور طبیعی افزایش دمای جامد خشک شونده باعث افزایش ضریب نفوذ مولکولی درون نمونه و افزایش سرعت خشک شدن می‌شود.

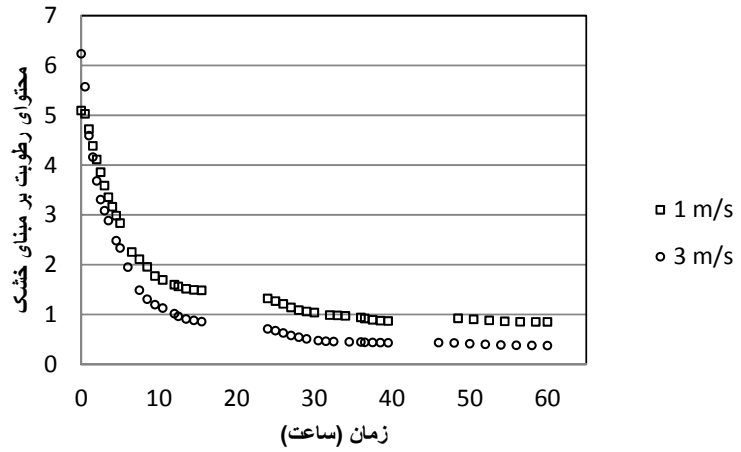
در شکل‌های (۳) و (۴) تغییرات دمای محیط و دمای خروجی از جمع‌کننده اول برای مدت زمان خشک شدن نشان داده شده است. در هر دو نمودار حداکثر دمای ۵۲ درجه سانتی‌گراد برای خروجی از جمع‌کننده اول قابل مشاهده است. در شکل (۴) علیرغم افزایش دبی جرمی هوای عبوری، دمای حداکثری حاصله بالاتر از حالتی است که دبی جرمی عبوری یک سوم مقدار حالت قبل است، که البته دلیل این امر بالاتر بودن دمای محیط نسبت به آزمایش مربوط به دبی جرمی kg/s ۰/۰۱۷۷ می‌باشد.

۲,۳. اثر سرعت هوا در شرایط استفاده از یک جمع کننده و در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی

شکل(۵) اثر سرعت هوای ورودی بر تغییر محتوای رطوبت با زمان را در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی نشان می‌دهند.

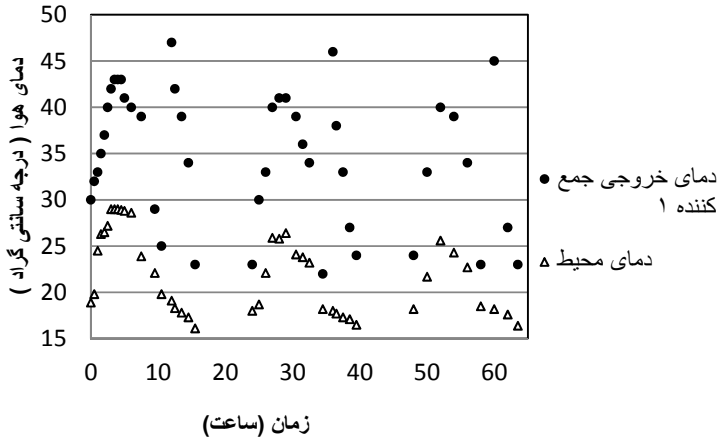
www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۵): تغییرات محتوای رطوبت در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی (سرعت هوای ورودی: ۱m/s و ۳m/s، سطح جمع‌کننده: $۲m^2$)

همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است، کاهش سرعت منجر به کاهش سریع‌تر محتوای رطوبت نمونه شده است. آزمایش‌های بدون ماده ذخیره‌ساز که نتایج آن در شکل (۲) ارائه شده است در گرم‌ترین ماه‌های سال (تیر و مرداد ماه) انجام شده‌اند، در حالیکه آزمایش‌ها در حضور ماده ذخیره ساز در فصل پاییز انجام شده است. از مقایسه شکل (۲) با شکل (۵) مشاهده می‌شود که مقدار کاهش رطوبت در شکل (۵) (خشک کردن با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده) برابر با ۰/۵۸ و ۰/۶۱بر مبنای خشک و در شکل (۲) (خشک کردن بدون استفاده از ماده تغییر فاز دهنده) برابر با ۰/۳۹ و ۰/۲۹ بر مبنای خشک می‌باشد،و این موضوع بیانگر تاثیر مثبت ذخیره‌سازی انرژی است. لازم به ذکر است که آزمایش‌های صورت گرفته با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در فصل سردتری از سال انجام شد (با تفاوت دمایی ۱۴ درجه سانتی‌گراد) و این در حالی است که سرعت خشک شدن اختلاف بسیار کمی با مقدار این کاهش در آزمایش‌ها بدون ماده ذخیره‌ساز (در گرم‌ترین ماه-های سال) دارد. از این مقایسه می‌توان عملکرد ماده ذخیره ساز را بسیار مطلوب ارزیابی نمود.

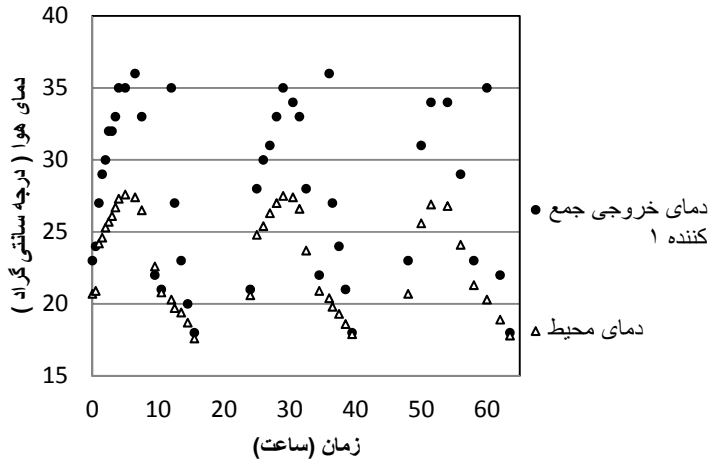


شکل (۶): تغییرات دمایهوای خروجی جمع‌کننده و محیطدر حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی (سرعت هوای ورودی: ۱m/s، سطح جمع-کننده: ۲m2)

www.SID.ir

Archive of SID

www.Reservoir.ir



شکل (۷): تغییرات دمایهوای خروجی جمع‌کننده و محیطدر حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی (سرعت هوای ورودی: ۳m/s، سطح‌جمع-کننده: $۲m^2$)

در شکل (۶)، حداکثر و حداقل دمای محیط به ترتیب ۲۹ و $۱۶/۴^oC$ بوده و حداکثر دمای خروجی جمع‌کننده ۴۶^oC می‌باشد. از طرفی، در شکل (۷)، حداکثر و حداقل دمای محیط به ترتیب ۲۷/۶ و $۱۷/۸^oC$ بوده و حداکثر دمای خروجی جمع‌کننده ۳۶^oC می‌باشد. بنابراین در شکل (۷) دمای خروجی جمع‌کننده به دلیل افزایش سرعت هوای ورودی کاهش یافته است. همان‌طور که مشخص است، در سرعت کمتر، می‌توان به دمای خروجی بالاتری دست یافت و کاهش محتوای رطوبت سریع‌تر خواهد بود.

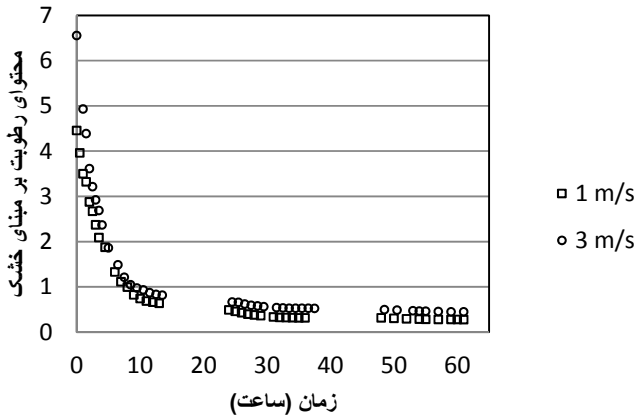
۳,۳. بررسی سرعت خشک شدن در شرایط استفاده از دو جمع‌کننده بدون حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی

در این حالت هم از جمع‌کننده خشک‌کن خورشیدی و هم از جمع‌کننده اول که به خشک‌کن متصل شده است همزمان استفاده شده است. هوای خروجی از هر دو جمع‌کننده در بالای سینی اول با هم ترکیب و به درون خشک‌کن وارد می‌شود.

. نتایج به دست آمده برای دو جمع‌کننده (جمع‌کننده‌های اول و دوم) در شکل(۸) نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

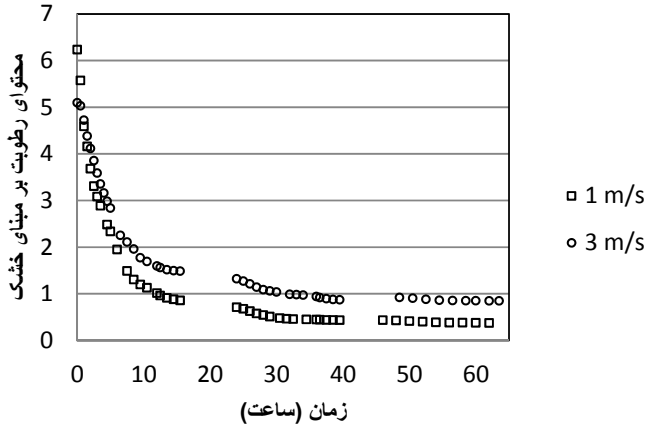


شکل (۸): تغییرات محتوای رطوبت بدون استفاده از مواد ذخیره‌ساز انرژی (سرعت هوای ورودی: ۱m/s و ۳m/s، سطح جمع کننده: ۴/۲m²)

مقایسه شکل‌های(۲) با (۸)نشان می‌دهد، پس از ۱۰ ساعت از فرآیند خشک شدن محتوای رطوبت بر مبنای خشک در سرعت ۱ متر بر ثانیه از هوای عبوری در شکل (۲) به ۰/۹۶ و در شکل (۸) به ۰/۷۴ رسیده است و در سرعت ۳ متر بر ثانیه از هوای عبوری پس از ۱۰ ساعت از فرآیند خشک شدن محتوای رطوبت بر مبنای خشک در شکل (۲) از ۳/۸۲ به ۰/۷۷ و در شکل (۸) از ۴/۹۳ به ۰/۹۳ رسیده است. با افزایش سطح جمع‌کننده دمای هوای درون محفظه‌ی خشک‌کن افزایش یافته و محتوای رطوبت ماده در حال خشک شدن در هنگام استفاده از دو جمع‌کننده کاهش بیشتری می‌یابد.

۴،۳. اثر سرعت هوای ورودی با استفاده از دو جمع کننده در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی

نتایج به دست آمده برای این شرایط در شکل (۹) ارایه شده است.



شکل (۹): تغییرات محتوای رطوبت در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی (سرعت هوای ورودی: ۱m/s و ۳m/s، سطح جمع‌کننده: ۴/۲m²)

مقایسه شکل‌های(۵) با (۹)نشان می‌دهد پس از ۱۰ ساعت از فرایند خشک شدن محتوای رطوبت بر مبنای خشک در سرعت ۱ متر بر ثانیه از هوای عبوری در شکل (۵) به ۱/۳۵ و در شکل (۹) به ۱/۱۳ رسیده،و در سرعت ۳ متر بر ثانیه از

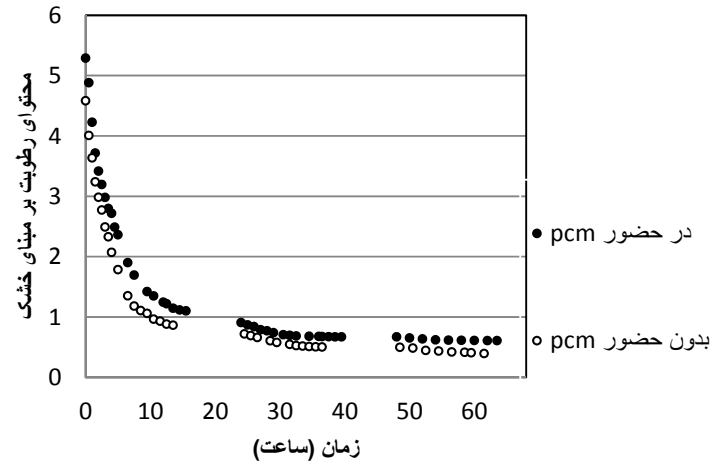
www.SID.ir

Archive of SID

هوای عبوری پس از ۱۰ ساعت از فرایند خشک شدن محتوای رطوبت در شکل (۵) از ۴/۵ به ۱/۴۲ و در شکل (۹) از ۵ به ۱/۶۹ بر مبنای خشک رسیده است. با افزایش سطح جمع‌کننده تغییر محتوای رطوبت ماده‌ی در حال خشک شدن تسریع می‌شود. افزایش سطح، افزایش هزینه را در بردارد و باید نقطه‌ی بهینه‌ی اقتصادی بین افزایش سطح جمع‌کننده (افزایش سرعت خشک شدن) و افزایش هزینه تعیین شود. سطح بهینه باید با در نظر گرفتن مسائل مربوط به طراحی، هزینهو شرایط مطلوب برای محصول تعیین شود.

۵,۳. مقایسه عملکرد در حضور مواد ذخیره ساز انرژی و بدون حضور این مواد

شکل (۱۴) محتوای رطوبت خشک شدن بر مبنای خشک را در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی و بدون حضور این مواد نشان می‌دهد. این شکل نتایج حاصل از این دو حالت استفاده از یک جمع‌کننده خورشیدی با سرعت ۱ متر بر ثانیه برای هوای عبوری نشان می‌دهد.



شکل (۱۴): تغییرات محتوای رطوبت در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی و بدونحضور این مواد (سرعت هوای ورودی: ۱m/s، سطح جمع-کننده: ۲m^2)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار رطوبت در حضور مواد ذخیره ساز انرژی از ۶ به ۰/۷ بر مبنای خشک رسیده است، در حالیکه بدون مواد ذخیره‌ساز انرژی مقدار رطوبت از ۵ به ۰/۶۸ بر مبنای خشک رسیده است. در ضمن همان‌طور که قبلاً گفته شد آزمایش‌های بدون ماده ذخیره‌ساز انرژی در گرم‌ترین ماه‌های سال (تیر و مرداد) انجام شده‌اند، در حالیکه آزمایش‌ها در حضور ماده ذخیره‌ساز در فصل پاییز انجام شدند. مقدار راندمان جمع‌کننده در ۱۰ ساعت اولیه خشک شدن در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی ٪ ۶/۶۶ و این مقدار برای بدون حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی ٪ ۴/۳۹ و مقدار راندمان جمع-کننده پس از ۲۴ ساعت از شروع آزمایش در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی به ٪ ۹/۷۱ و مقدار راندمان جمع‌کننده برای بدون حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی پس از ۲۴ ساعت به ٪ ۴/۶۲ رسید. مقدار راندمان جمع‌کننده پس از سه روز آزمایش در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی ٪ ۵/۳۹ می‌باشد، در حالیکه این مقدار در آزمایش بدون مواد ذخیره‌ساز انرژی ٪ ۲/۴۵ به دست آمد. دلیل راندمان بیشتر انرژی در حضور مواد ذخیره ساز انرژی این است که در این آزمایش‌ها اگر فرض کنیم ۱۰۰ کیلوژول انرژی خورشید به جمع‌کننده برسد، ۵۰ کیلوژول انرژی صرف گرم کردن هوای عبوری در جمع‌کننده می‌شود، ۳۰

www.SID.ir

Archive of SID

کیلوژول انرژی صرف ذوب شدن مواد ذخیره‌ساز انرژی می‌شود که این ۳۰ کیلوژول انرژی خود پس از ذوب کامل سبب افزایش دمای هوای عبوری از درون جمع‌کننده می‌شود و ۲۰ کیلوژول انرژی به هدر می‌رود. در حالیکه بدون حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی ۵۰ کیلوژول انرژی صرف گرم کردن هوای عبوری در جمع‌کننده می‌شود و ۵۰ کیلوژول انرژی به هدر می‌رود. می‌توان گفت در حضور مواد ذخیره‌ساز انرژی با محتوای انرژی کمتر به راندمان بیشتری می‌توان دست یافت.

۶،۳. برازش منحنی‌های خشک شدن با مدل سینتیکی

با برازش منحنی‌های خشک شدن در سرعت‌های مختلف، رابطه‌ی زیر برای مدل سینتیکی خشک شدن سیر به دست آمد:

$$\frac{dX}{dt} = a_1 T^{a_2} X^{a_3} \qquad (۳)$$

که در آن T نشان دهنده‌ی دما بر حسب درجه سانتی‌گراد، X محتوای رطوبت بر مبنای خشک و ai نماد ثابت‌های سینتیکی است. از آن جا که آزمایش‌ها در سرعت‌های مختلفی از هوا انجام شده‌اند، سه مقدار متفاوت برای ai به دست آمده‌اند. این مقادیر در جدول نشان داده شده است. ارزیابی مدل مذکور بر اساس انتخاب معیار آماری ضریب همبستگی (R^2) انجام شده و این مقدار برابر با ۹۱/۲۷٪ به دست آمد.

جدول (۴): مقادیر ثوابت مدل سینتیکی

ثابت	مقدار
a_1	۰/۰۰۰۰۰۰۳۵
a_2	۲/۹۱۳
a_3	۲/۷۷

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم برای خشک کردن تکه‌های موز مورد بررسی قرار گرفت. اثر سه عامل بر محتوای رطوبت نهایی نمونه‌هامطالعهشد. این پارامترها سرعت هوای ورودی، استفاده و عدم استفاده از مواد ذخیره-ساز انرژی و سطح جمع‌کننده بودند. اثر سرعت هوای ورودی در دو سطح بررسی شد. مشخص شد که در سرعت هوای کمتر، محتوای رطوبت نمونه‌هابیشتر کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از مواد ذخیره‌ساز میزان کاهش رطوبت برابر یا اندکی بیشتراز حالتی است که از این مواد استفاده نشودالبته انتظار می‌رود در صورت استفاده از این مواد کاهش بیشتری در محتوی رطوبت ایجاد گردد. اما باید این نکته یادآور شد که آزمایش‌هایی که در آن‌ها از ماده ذخیره‌ساز انرژی استفاده نشده بود، در گرم‌ترین فصل‌های سال (تیر و مرداد ماه) انجام شدند، در حالی که آزمایش‌هایی که در آن‌ها از ماده ذخیره‌ساز استفاده گردید، در مهر ماه انجام گرفت. همان‌طورکهدرنمودارهای دما (۸ و۹) نشان داده شده‌اند،دراین فصل دمای هوای محیط کمتر می‌باشد. با در نظر گرفتن این مطلب می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد ماده ذخیره‌ساز در فرایند خشک شدن بسیار قابل قبول بوده است.

واضح است که هر چه سطح جمع‌کننده بیشترباشد، محتوای رطوبت نمونه‌ها کمتر خواهد شد. ولی افزایش سطح جمع‌کننده، افزایشهزینه‌ها را به دنبال خواهد داشت. بنابراین،یافتن سطح بهینهامری ضروری در طراحی خشک‌کن به شمار می‌رود.

www.SID.ir

Archive of SID

مراجع

[1] Bal, Lalit M., Santosh Satya, and S. N. Naik. "Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, no. 8 (2010): 2298-2314.

[2] Alkilani, M. M., Sopian, K., Alghoul, M. A., Sohif, M., & Ruslan, M. H. "Review of solar air collectors with thermal storage units. Renewable and Sustainable Energy Reviews", 15(3), (2011): 1476-1490.

[3] Devahastin, Sakamon, and Saovakhon Pitaksuriyarat."Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product." Applied thermal engineering 26, no. 14 (2006):1705-1713.

[4] Kenisarin, Murat M. "High-temperature phase change materials for thermal energy storage." Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, no. 3 (2010): 955-970. [5] Imre, L., "Solar drying. Handbook of Industrial Drying", CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, pp. 307–361, 2007.

[6] Hossain, M. A., and B. K. Bala. "Drying of hot chilli using solar tunnel drier."Solar Energy 81, no. 1 (2007): 85-92.

[7] Chen, Ho-Hsien, Carlos Eduardo Hernandez, and Tzou-Chi Huang. "A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer." Solar Energy 78, no. 1 (2005): 97-103.

[8] Condorı, M., R. Echazu, and L. Saravia. "Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse drier." Renewable Energy 22, no. 4 (2001): 447-460.

[9] Gallali, Yahya M., Yahya S. Abujnah, and Faiz K. Bannani. "Preservation of fruits and vegetables using solar drier: a comparative study of natural and solar drying, III; chemical analysis and sensory evaluation data of the dried samples (grapes, figs, tomatoes and onions)." Renewable Energy 19, no. 1 (2000): 203-212.

[10] Pangavhane, D. R., and R. L. Sawhney. "Review of research and development work on solar dryers for grape drying." energy Conversion and Management 43, no. 1 (2002): 45-61.

[11] Amer, B. M. A., M. A. Hossain, and K. Gottschalk. "Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana." Energy Conversion and Management 51, no. 4 (2010): 813-820.

www.SID.ir