

ضریب پخش موثر و انرژی فعالسازی کیوی در خشک کردن با هوای داغ (۴۸۷)

علی محمدی^۱، شاهین رفیعی^۲، علیرضا کیهانی^۳، زهرا امام جمعه^۳

چکیده

هدف از انجام این مطالعه ارزیابی آزمایشگاهی سینتیک خشک کردن ورقه های نازک کیوی برای محاسبه ضریب پخش موثر و انرژی فعالسازی آن می باشد. آزمایشات خشک کردن لایه نازک تحت پنج سطح دمای خشک کن ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی ۱ m/s و سه ضخامت ۲، ۴ و ۶ میلی متر انجام شد. آزمایش خشک کردن توده بستر نازک کیوی در مرحله نرخ کاهنده خشک شدن بود. برای توضیح انتقال رطوبت از لایه های نازک کیوی، مدل فیک پخش مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد مقدار ضریب پخش موثر در نمونه های خشک شده در دماهای بین ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد، از $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $4/38 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تغییر می کند. با استفاده از رابطه آرنیوس انرژی لازم برای فعالسازی از $21/4$ تا $23/86 \text{ kJ/mol}$ و ثابت ضریب پخش $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $4/38 \times 10^{-7}$ به دست آمد، که نشان دهنده اثر دمای خشک کن و ضخامت لایه ها روی پدیده پخش می باشد.

کلیدواژه: خشک کردن، مدل فیک، انرژی فعالسازی، کیوی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه تهران، پست الکترونیک: Mohammadi_017@yahoo.com

۲- دانشیار گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشکده مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تهران

۳- دانشیار گروه مهندسی صنایع غذایی، دانشکده مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تهران

مقدمه

مبدا اصلی کیوی (*Actinidia deliciosa*) جنگل های مناطق معتدل اطراف رودخانه یانگ تسه در جنوب چین است و ارقام مختلف آن به صورت پراکنده از سیبری تا اندونزی وجود دارد. از نظر میزان تولید سالانه کیوی کشور زلاند نو تا سال ۱۹۹۰ در مرتبه اول قرار داشت ولی از آن سال به بعد ایتالیا از زلاند نو پیشی گرفت. در سال ۱۹۹۵ ایتالیا با تولید ۳۵۰ هزار تن مقام اول تولید کیوی را به خود اختصاص داد و زلاند نو با تولید ۲۲۰ هزار تن در مقام دوم قرار گرفت. در سال ۲۰۰۵ کشور ایتالیا با صادرات ۲۸۱ هزار تن، رتبه اول را در دنیا حفظ کرد [۱]. ورود کیوی به ایران در سال ۱۳۴۷ توسط مرحوم پناهی صورت گرفت [۲] و در حال حاضر ایران با اختصاص ۳۵۳۰ هکتار سطح زیر کشت و تولید حدود ۸۷ هزار تن (در سال ۱۳۸۴) رشد قابل توجهی در تولید این میوه داشته است [۳]. استفاده عمده این محصول در کشور به صورت تازه خوری است در حالیکه امروزه از کیوی در دیا استفاده های صنعتی متعددی به عمل می آید که از آن جمله می توان به کنسرو کیوی [۴ و ۵]، پالپ کردن کیوی [۶]، کیوی منجمد [۶]، لواشک کیوی [۷]، نوشیدنی های حاصل از کیوی [۸]، مواد مستخرج از کیوی (انند پروتئاز و موسیلاژ و آرومای کیوی) و برگه های خشک شده کیوی اشاره نمود.

خشک کردن یکی از قدیمی ترین روشهای نگهداری مواد غذایی است. با استفاده از این روش علاوه بر جلوگیری از فساد ماده غذایی بوسیله میکرو ارگانیسمها ویا واکنش های شیمیایی، وزن ماده غذایی کاهش یافته و صرفه جویی بسیاری در هزینه های حمل و نقل و نگهداری حاصل می شود. انجام صحیح عملیات خشک کردن به علت امکان بروز برخی تغییرات نامطلوب در ماده غذایی اهمیت زیادی دارد. برای کاهش آب مواد غذایی تا حدی که در طولانی مدت قابل نگهداری باشند، بویژه آنها یکبار دارای ترکیبات قندی هستند (نظیر میوه ها)، زمانی طولانی و دمایی نسبتاً بالا مورد نیاز است. که همین عوامل موجب بروز برخی تغییرات نامطلوب می شود که از جمله می توان به تغییرات رنگ، طعم، عطر، کاهش مواد مغذی، افزایش وزن مخصوص (بعلت چروکیدگی شدید) و کاهش ظرفیت آگیری مجدد^۱ محصول خشک شده اشاره کرد [۹-۱۰]. خشک کردن میوه ها به مشخصات مربوط به انتقال جرم و حرارت در محصولی که خشک می شود، بستگی دارد. دانستن پخش رطوبت و دمای محصولات، برای طراحی پروسه، کنترل کیفی، انتخاب نوع انبار کردن مناسب و چگونگی جا به جایی مناسب محصولات، لازم می باشد. ضریب پخش یکی از مشخصات محصولات کشاورزی است و مقدار آن بستگی به شرایط داخل ماده، دارد. پخش رطوبت موثر، همه مکانیزم های ممکن حرکت رطوبت در ماده را توصیف می کند، مثل: پخش مایع، پخش بخار، پخش سطحی، جریان کاپیلاری و جریان هیدرودینامیکی. حرکت رطوبت که شامل پخش رطوبت در ماده جامد می باشد؛ دارای پروسه پیچیده ای است. دانستن درباره پخش رطوبت موثر برای ط حی و مدل سازی پروسه انتقال جرم، مثل آب زدایی، جذب سطحی و دفع رطوبت در طول انبارداری، لازم می باشد [۱۲].

موهاپاترا و سرینیواسا (۲۰۰۵) خشک شدن گندم نیم جوش شده را در دماهای ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس مورد آزمایش قرار دادند. داده های حاصل از آزمایش با مدل های تجربی و نیمه تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پایان خشک شدن در مرحله نزولی خشک شدن صورت گرفت که نشان دهنده اثر پخش رطوبت در دوره خشک شدن بود. پخش^۲ از 10^{-10} تا $1/218 \text{ m}^2/\text{s}$ در محدوده دمایی آزمایش شده متغیر بود. وابستگی پخش به دما به درستی توسط رابطه آرنهوس^۳ توضیح داده شد. انرژی فعال سازی برای پخش رطوبت در طول خشک شدن $370/13 \text{ KJ/kmol}$ به دست آمد. خشک شدن لایه نازک گندم نیم جوش شده به طور کاملاً دقیق به وسیله مدل دوجمله ای که ثابت های خشک شدن در آن رابطه ای خطی با دما داشتند بیان شد [۱۳]. باس نیا و آبه (۲۰۰۱) با انجام آزمایش خشک کردن لایه نازک شلتوک برنج در محدوده دمای ۱۲ تا ۵۱ درجه سلسیوس هوای خشک کن، ضریب پخش رطوبت را به دست آوردند و گزارش کردند که این ضریب وابستگی زیادی به زمان خشک کردن دارد [۱۴]. برای تعیین ضریب پخش موثر میوه ها و سبزیجات در هنگام خشک شدن نیز مطالعات زیادی صورت گرفته است [۱۵-۲۲]. در مورد محصول کیوی تحقیقاتی انجام شده بسیار کم می باشد، از جمله این تحقیقات، مطالعه سیمال و

1 Rehydration Capacity
2 Diffusivity
3 Arrhenios

همکاران (۲۰۰۵)، می باشد که ضریب پخش موثر را برای خشک کردن ورقه کیوی در ظرفیت رطوبت ۴/۶۵ تا ۰/۱۵ (بر پایه خشک) محاسبه کردند [۲۳].

هدف از انجام این تحقیق محاسبه ضریب پخش موثر و انرژی فعالسازی ورقه نازک کیوی در هنگام خشک کردن با هوای داغ می باشد.

مواد و روش ها

آماده سازی نمونه ها

در ابتدا میوه کیوی رقم هایوارد (Hayward) از بازار میوه و تره بار کرج تهیه شد و سپس برای جلوگیری از تغییرات فیزیکی و شیمیایی به انبار با دمای $4 \pm 0/5$ درجه سلسیوس منتقل شدند [۲۴]. برای تهیه ورقه های نازک کیوی با ضخامت های مورد نظر (۲، ۴ و ۶ میلی متر) از دستگاه ورقه بر (کالباس بر) استفاده گردید. برای انجام این آزمایش از خشک کن آزمایشگاهی که در گروه ماشین های کشاورزی دانشکده مهندسی بیو سیستم دانشگاه تهران طراحی و ساخته شده بود، استفاده گردید [۲۵]. برای آماده کردن خشک کن، پس از روشن کردن رایانه، فن، ترازو، المنت ها و سیستم جمع آوری داده، سرعت فن برای آزمایش مورد نظر تنظیم می شد. برای اندازه گیری سرعت از یک حسگر دستی مدل *TESTO405-V1* و یک سرعت سنج پروانه ای استفاده شد. بعد از آن نرم افزار پایش و کنترل اجرا شده و دمای مورد نظر برای آزمایش در نرم افزار تنظیم می گردید. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار کلیه آزمایش ها ۳۰ دقیقه بعد از روشن کردن سیستم شروع می شد. سپس سینی حاوی نمونه ها (حاوی ۱۵۰ گرم نمونه) با احتیاط در محفظه خشک کن قرار داده می شد. دماهای مورد بررسی در این تحقیق ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی 1 m/s در نظر گرفته شد. تمامی آزمایش ها در سه تکرار صورت گرفت.

مدلسازی منحنی خشک شدن

قانون دوم فیک پخش، که در معادله (۱) نشان داده شده است؛ به طور وسیعی برای توصیف پروسه خشک کردن در طول کاهش نرخ رطوبت برای بیشتر مواد بیولوژیکی استفاده می شود [۱۲ و ۲۶]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla [D_{eff} (\nabla M)] \quad (1)$$

که در آن:

D ضریب پخش رطوبت موثر (m^2/s)، M محتوی رطوبت ($\text{kg water/kg dry solid}$) و t زمان (s) می باشد. D نشان دهنده قسمت هدایت در تمام مکانیزم های انتقال رطوبت است. این پارامتر معمولاً از منحنی های خشک کردن آزمایشگاهی تعیین می شود. بیشترین فرض در تعیین این پارامتر این است که خشک کردن به انتقال فقط جرم محدود می شود و نیز پروسه خشک کردن به صورت ایزوترم (هم دما) در تمام نمونه ها اتفاق می افتد.

رابطه بین دما و ضریب پخش موثر در معادله (۲) نشان داده شده است [۱۲ و ۱۵]:

که در آن:

D_0 ثابت ضریب پخش m^2/s ، E_a انرژی فعال سازی kJ/mol ، R ثابت جهانی گازها kJ/mol K و T_a دمای مطلق

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (2)$$

هوا K می باشد. انرژی فعال سازی از طریق نمودار $\ln(D)$ در مقابل $(1/T)$ به دست می آید. دمای استفاده شده در معادله فوق دمای محصور شده در محیط خشک کردن می باشد بنابراین می باید فرض هم دما بودن هم در پخش موثر و هم در انرژی فعال سازی مد نظر قرار گیرد. ورقه های کیوی باید به صورت باریکه های نامحدود مورد بررسی قرار گیرند زیرا ضخامت این ورقه ها (۲، ۴ و ۶ میلی متر) در برابر قطر میوه (حدود ۴۵ میلی متر) بسیار کوچک می باشد.

- پخش رطوبت برای باریکه نامحدود توسط معادله (۳) که توسط کرانک (۱۹۷۵) [۲۷]، پیشنهاد شده است، محاسبه می شود که فرض هایی که برای این معادله در نظر گرفته می شود به شرح زیر است:
- (۱) رطوبت در ابتدا به صورت یکنواخت درون جرم نمونه پخش می شود.
 - (۲) انتقال جرم به صورت منظم به طرف مرکز انجام می گیرد.
 - (۳) محتوی رطوبت سطحی نمونه آنها با شرایط هوای محیط به تعادل می رسد.
 - (۴) مقاومت سطح نمونه در برابر انتقال جرم تفاوت قابل اغمازی با مقاومت داخلی آن دارد.
 - (۵) انتقال جرم فقط با پخش انجام می گیرد.
 - (۶) ضریب پخش ثابت می باشد و افت آن قابل چشم پوشی است.

$$MR = \frac{M}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 Dt}{4L^2}\right) \quad (3)$$

که در آن:

MR نسبت رطوبت، L ضخامت ورقه ها (m) و n عدد صحیح مثبت می باشد. فقط قسمت اول معادله (۳) برای زمان های طولانی خشک کردن، استفاده می شود [۱۶]:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{4L^2}\right) \quad (4)$$

ضریب k_0 با رسم منحنی $\ln(MR)$ در مقابل زمان محاسبه می شود، مطابق معادله (۴) که در زیر آمده است [۱۲]:

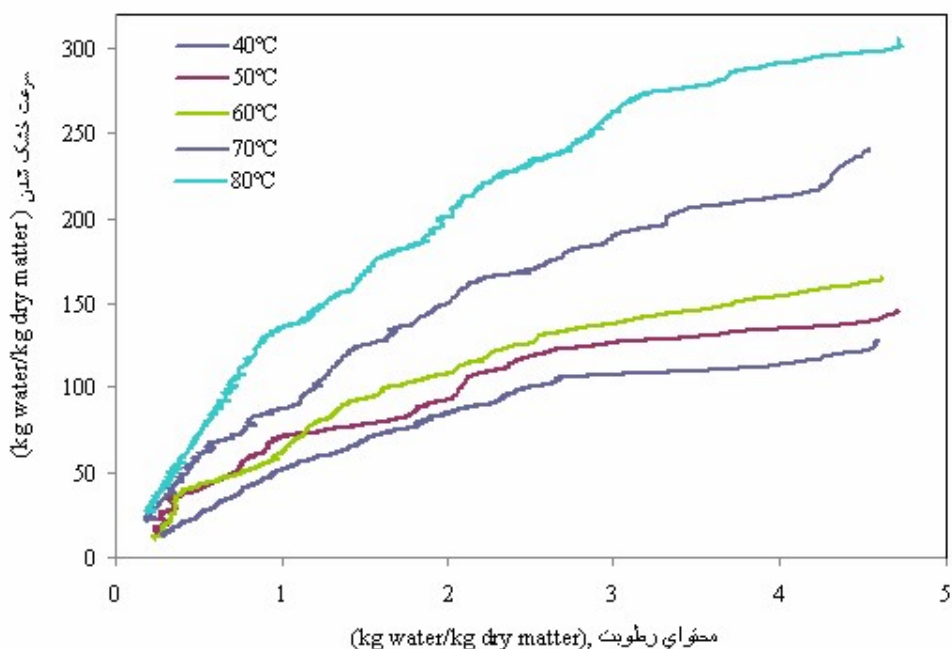
$$k_0 = \frac{\pi^2 D}{4L^2} \quad (5)$$

نتایج و بحث

آزمایش ها در پنج سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سسیوس و سرعت هوای ورودی ۱ m/s و ضخامت های ۲ و ۴ و ۶ میلی متر برای ورقه های نازک کیوی در سه تکرار انجام شد. رطوبت اولیه ورقه های کیوی در شروع خشک کردن (d.b.) ۴/۶۳٪ بود که در پایان خشک کردن به (d.b.) ۰/۲۴٪ رسید. خشک کردن تا زمانی ادامه داشت که تغییرات رطوبت ورقه ها بسیار کم شده در نتیجه شدت خشک شدن تقریباً صفر شود و نیازی به خشک کردن تا رطوبت تعادلی نیست [۲۸]. مدت خشک کردن نمونه ها برای دماهای مختلف متفاوت بود. رطوبت براساس وزن توده گندم که در زمانهای مختلف (برحسب دقیقه) خشک شدن اندازه گیری شد محاسبه گردید. سرعت خشک شدن ورقه های کیوی بر اساس معادله (۶) محاسبه می گردد [۲۲].

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (6)$$

که DR سرعت خشک شدن (d.b./s)، M_{t+dt} رطوبت کیوی در زمان t+dt (d.b.)، M_t رطوبت کیوی در زمان t (d.b.)، dt نمو زمان در هر گام زمانی (s) می باشد. نتایج نشان داد که آزمایش خشک کردن توده بستر نازک کیوی رقم هایوارد در مرحله نرخ کاهنده خشک شدن بود. در شکل ۱، سرعت خشک شدن در مقابل محتوای رطوبت ورقه های کیوی، در دامنه دمای مورد بررسی نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۱ مشخص است، سرعت خشک شدن با افزایش دما، افزایش می یابد. نتایج مشابهی توسط دویماز (۲۰۰۵) برای خشک کردن نخود سبز [۱۹] و پاتار و شارما (۲۰۰۶) برای خشک کردن پیاز [۱۸] به دست آمده است.



ضریب پخش رطوبت موثر D ، توسط معادله (۶) محاسبه شد و در جدول (۲) نشان داده شده است. مشاهده می شود که مقدار ضریب پخش موثر در نمونه های خشک شده در دماهای بین ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد، از $۵/۵۱ \times ۱۰^{-۱۱}$ تا $۱۰^{-۱۰} \text{ m}^2/\text{s}$ تغییر می کند. بالاترین مقدرا آن مربوط به ضخامت ۲ میلی متر می باشد. محاسبات نشان دهنده رابطه مستقیم بین پخش موثر و درجه حرارت بود، که نشان می دهند هر چه دما افزایش یابد، ضریب موثر پخش نیز افزایش می یابد. دمای ۸۰°C بالاترین ارزش D را در هر سه ضخامت دارد. سیمال (۲۰۰۵) مقدار ضریب پخش موثر برای ورقه های کیوی $۱۷/۲ \times ۱۰^{-۹}$ تا $۳/۰ \times ۱۰^{-۱۰} \text{ m}^2/\text{s}$ در رنج دمایی ۳۰ تا ۹۰ درجه سانتی گراد گزارش داد [۲۳].

جدول ۱- ضریب پخش موثر در ورقه های نازک کیوی (رقم های وارد) در شرایط مختلف خشک شدن

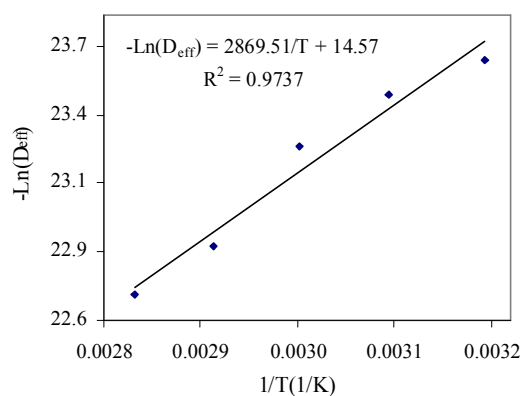
R^2	ضریب پخش موثر (m^2/s)					ضخامت ورقه (mm)	سرعت هوای خشک کردن (m/s)
	۸۰°C	۷۰°C	۶۰°C	۵۰°C	۴۰°C		
۰/۹۷۳۷	$۱/۳۸ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۱۴ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۷/۶۹ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۶/۳۱ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۵/۵۱ \times ۱۰^{-۱۱}$	۲	۱
۰/۹۸۸۷	$۲/۹۳ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۲/۵۱ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۹۲ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۵۸ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۰۹ \times ۱۰^{-۱۰}$	۴	۱
۰/۹۸۴۶	$۴/۳۸ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۳/۷۳ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۲/۹۹ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۲/۲۱ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۵۲ \times ۱۰^{-۱۰}$	۶	۱

با استفاده از رابطه آرهنیوس که در معادله ۲ آمده است، وابستگی ضریب موثر پخش به دما به درستی توضیح داده شد. انرژی فعالسازی و ثابت ضریب پخش از شیب نمودار آرهنیوس ($\ln(D) - 1/T$) محاسبه شد و در جدول ۲ آمده است. دامنه تغییرات ثابت ضریب پخش موثر برای ورقه های کیوی از $۴/۳۸ \times ۱۰^{-۷}$ تا $۱۹/۴۳ \times ۱۰^{-۷} \text{ m}^2/\text{s}$ در رنج دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد می باشد، ضخامت ۴ میلی متر کمترین انرژی فعالسازی ($۲۱/۴ \text{ kJ/mol}$) و کمترین ثابت ضریب پخش ($۴/۳۸ \times ۱۰^{-۷} \text{ m}^2/\text{s}$) را نشان داد.

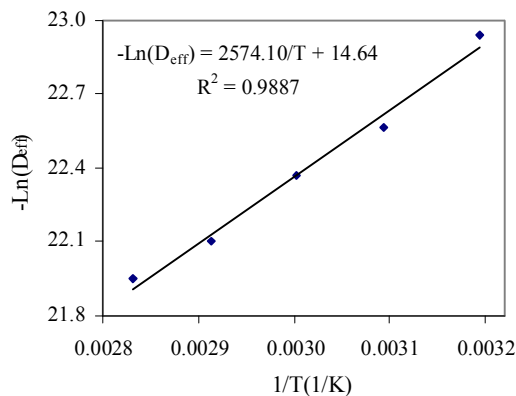
جدول ۲- ثابت ضریب پخش و انرژی فعالسازی برای ورقه های کیوی (رقم هایوارد)

سرعت (m/s)	ضخامت (mm)	ثابت ضریب پخش D_0 (m^2/s)	انرژی فعالسازی E_a (kJ/mol)
۱	۲	$۴/۶۸ \times ۱۰^{-۷}$	۲۳/۸۶
۱	۴	$۴/۳۸ \times ۱۰^{-۷}$	۲۱/۴
۱	۶	$۹/۴۳ \times ۱۰^{-۷}$	۲۲/۴۵

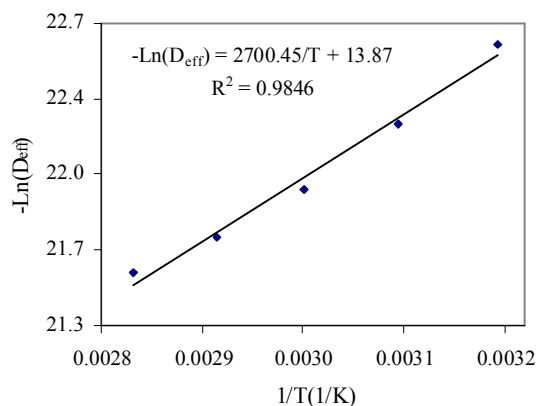
ارتباط بین ضریب موثر پخش و دما، توسط شکل های ۱ تا ۳ برای ضخامت های مختلف، نشان داده شده است. این شکل ها از طریق رگرسیون خطی و غیر خطی به دست آمده اند، ضریب تبیین (R^2) برای ارتباط بین ضریب پخش موثر و دما در سه ضخامت مورد بررسی بین $۰/۹۷۳۷-۰/۹۸۸۷$ حاصل شد که بالاترین مقدار آن ($۰/۹۸۸۷$) برای ورقه های با ضخامت ۴ میلی متر می باشد. انرژی فعالسازی همه نمونه ها کمتر از ۲۴ kJ/mol بود و دامنه آن از $۲۱/۴$ تا $۲۳/۸۶$ kJ/mol متغیر بود. نتایج مشابهی توسط محققان برای محصولات مختلف (۳۲/۹۴ kJ/mol برای گوجه فرنگی [۲۰] ، $۱۸/۲۲-۲۶/۸۲$ kJ/mol برای فلفل قرمز [۲۱]) در مرور منابع گزارش شده است. انرژی فعالسازی کیوی از سیب ($۲۳/۹۵-۲۵/۹$ kJ/mol) [۱۵] کمتر و از موز ($۱۳/۴$ kJ/mol) [۱۷] بیشتر به دست آمد.



شکل ۱- ارتباط بین ضریب پخش موثر و دما برای ورقه های با ضخامت ۲ میلی متر و سرعت هوای ۱ m/s



شکل ۲- ارتباط بین ضریب پخش موثر و دما برای ورقه های با ضخامت ۴ میلی متر و سرعت هوای ۱ m/s



شکل ۳- ارتباط بین ضریب پخش موثر و دما برای ورقه های با ضخامت ۶ میلی متر و سرعت هوای ۱ m/s

نتیجه گیری

- ۱- آزمایش خشک کردن توده بستر نازک کیوی رقم هایوارد در مرحله نرخ کاهنده خشک شدن بود.
- ۲- ضریب پخش موثر با افزایش ضخامت ورقه ها و افزایش دمای خشک کن، افزایش می یابد.
- ۳- مقدار ضریب پخش موثر در نمونه های خشک شده در دماهای بین ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد، از 10^{-11} m^2/s تا $5/51 \times 10^{-10}$ تغییر می کند.
- ۴- مقدار انرژی لازم برای فعالسازی ورقه نازک خشک شده کیوی در شرایط مورد بررسی، از ۲۱/۴ تا ۲۳/۸۶ kJ/mol و ثابت ضریب پخش از $4/38 \times 10^{-7}$ تا $9/43 \times 10^{-7}$ m^2/s متغیر بود.

پیشنهادها

- ۱- پیشنهاد می‌شود مدت زمان دوام ورقه‌های کیوی جهت استفاده خوراکی مورد بررسی قرار داد.
- ۲- توصیه می‌شود در شرایط مختلف رطوبت نسبی هوا نیز آزمایش انجام شود.
- ۳- بهتر است تأثیر شرایط مختلف خشک‌کردن مانند دما و سرعت‌های هوای خشک‌کن بر کیفیت کیوی بررسی شود.
- ۴- می‌توان این تحقیق را بر روی رقم‌های دیگر کیوی نیز انجام داد و نتایج را با هم مقایسه و تجزیه تحلیل کرد.
- ۵- ضریب پخش موثر خشک‌شدن برای محصولات دیگر نیز استخراج گردد.

سپاسگزاری

مولفان از گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی بیوسیستم دانشگاه تهران برای تأمین وسایل و امکانات مورد نیاز تشکر و قدردانی می‌کنند

منابع

۱. سازمان خوار و بار جهانی (FAO), ۲۰۰۵. <www.FAO.org>
۲. محمدیان، م. ا. و اسحاقی تیموری، ر. ۱۳۷۸. کشت و پرورش و ارزش غذایی کیوی. شرکت چاپ بانک ملی ایران.
۳. بی‌نام- آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۸۴. <www.maj.ir>
4. Robertson, G. L. 1985. Changes in chlorophyll and pheophytin concentrations of kiwifruit during processing and storage. Food chemistry, v(17): 25-32.
5. Robertson, G. L. 1981. Changes in chlorophyll and pectin after storage and canning of kiwifruit. Journal of Food Science, v(46): 1559-1562.
6. Lodge, N. 1981. Kiwifruit: two novel processed products. Food Technology in New Zealand, v(16): 35-43.
7. Troller, J. A. 1980. Influence of water activity on microorganisms in food. Food Technology, v(34): 76-83.
8. El-Zalaki, E. M. and Luh, B. S. 1981. Effect of sweetener types of chemical and sensory quality of frozen kiwifruit concentrates. Food Chemistry, v(6): 295-308.
9. Feng, H. and Tang, J. 1998. Microwave finish Drying of Diced Apples in a Spouted Bed. Journal of Food Science, v(63): No 4.
10. Krokida, M K. and Maroulis, Z.B. 1997. Effect of drying method on shrinkage and porosity. Drying Technology, v(15), 2441-2458.
11. Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering, v(48): 177-182.
12. Rafiee, S., Keyhani, A. and jafari, A. 2008. Modeling effective moisture diffusivity of wheat (Tajan) during air drying. International Journal of Food Properties, v(11): 1-10.
13. Mohapatra, D. and Srinivasa, P.R. 2005. A thin layer drying model of parboiled wheat. Journal of Food Engineering, v(66): 513-518.
14. Basunia, M.A and Abe, T. 2001. Thin layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. Journal of Food Engineering, v(47): 225-301.
15. Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. and Hu, X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. Food Research International, v(40): 39-46.



16. Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A. and Virseda, P. 2000. Thin-layer drying behaviour of vegetable waste from wholesale market. *Drying Technology*, v(18): 995–1006.
17. Baini, R. and Langrish, T.A.G. 2007. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, v(79): 330–343.
18. Pathare, P.B. and Sharma, G.P. 2006. effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Journal Biosystems Engineering*, v(93): 285–291.
19. Doymaz, I., 2005. Drying behaviour of green Beans. *Journal of Food Engineering*, v(69): 161–165.
20. Doymaz, I., 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, v(78): 1291–1297.
21. Vega A., Fito P., Andres, A. and Lemus, R. 2007. Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo). *Journal of Food Engineering*, v(79): 1460- 1466.
22. Akpinar, E.K., Bicer, Y. and Yildiz, C. 2003. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, v(59): 99-104.
23. Simal, S., A. Femenia., M.C. Garau and C. Rossello, 2005. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, v(66): 323–328.
24. O'Connor-Shaw, R.E., Roberts, R., Ford, A.L. and Nottingham, S.M. 1994. Shelf-Life of minimally processed honeydew, kiwifru, papaya, pineapple and cantaloupe. *Journal of Food Engineering*, v(59):1202-1206,1215.
25. Yadollahinia, A. 2006. A Thin layer drying model for paddy dryer. M. Sc. Thesis. Faculty of Bio-systems Engineering, University of Tehran.
26. Saravacos, G.D. and Maroulis, Z.B. 2001. Transport properties of foods. New York: Marcel Dekker.
27. Crank J., 1975. The mathematics of diffusion. 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, 104-106.
28. Gastón, A.L., Abalone, R.M., Giner, S.A. and Bruce, D.M. 2004. Effect of modelling assumptions on the effective water diffusivity in wheat. *Biosystems Engineering*, v(88): 175–185.



Effective moisture diffusivity and activation energy of kiwifruit during hot air drying

Ali Mohammadi^a, Shahin Rafiee^a, Alireza Keyhani^a, Zahra Emamjomeh^b

^aDepartment of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Bio-systems Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

^bDepartment of Food Engineering, Faculty of Bio-systems Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

Abstract

The aim of this paper is to report kiwifruit slices moisture diffusivity data determined and activation energy from experimental drying kinetics. The thin-layer drying experiments were carried out under five air temperatures of 40, 50, 60, 70 and 80°C, air velocity 1.5 m/s and three kiwifruit slice thicknesses of 2, 4 and 6 mm. It was observed that drying took place in the falling rate period. Moisture transfer from kiwifruit slices was described by applying the Fick's diffusion model. The effective diffusivity values changed from 8.04×10^{-11} to 7.02×10^{-10} m²/s for the range of temperatures considered. An Arrhenius relation with an activation energy value of 18.85 to 28.82 kJ/mol and the diffusivity constant value of 1.15×10^{-7} to 1.43×10^{-4} m²/s were obtained which shows the effect of drying air temperature and slice thickness on the diffusivity.

Keywords: Drying; Fick's model; Activation energy; Kiwifruit