نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع‌طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج

بررسی سینتیک خشک شدن برگ اکالیپتوس (*Eucalyptus camadulensis Dehnh*) در خشک‌کن مایکروویو

محسن خواجه‌پور[۱]، محمد زارعین[۲*]، محمدهادی خوش‌تقاضا[۳]، برات قبادیان[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳و۴- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ایمیل مکاتبه کننده: m.zarein@modares.ac.ir

چکیده

اکالیپتوس با نام علمی *Eucalyptus camadulensis Dehnh* از درختان عظیم و سریع الرشد اقیانوسیه می‌باشد که برگ آن دارای خواص دارویی فراوانی می‌باشد. در این تحقیق رفتار خشک شدن، ضریب نفوذ حرارتی مؤثر و انرژی فعال‌سازی با استفاده از خشک‌کن مایکروویو بررسی شد. در روش مایکروویو از چهار سطح توانی (۲۰۰، ۳۰۰،۴۰۰ و۵۰۰ وات) برای خشک کردن برگ‌های اکالیپتوس استفاده شد. سطوح توان مایکروویو بر زمان خشک شدن و ضریب نفوذ حرارتی مؤثر تأثیر داشت، بطوریکه زمان خشک شدن برای توان ۵۰۰ وات ۵/۷۵ دقیقه و برای توان ۲۰۰ وات ۲۱/۵ دقیقه به دست آمد. و زمان خشک شدن از توان ۲۰۰ تا ۵۰۰ وات ۷۳/۲۶ درصد کاهش یافت. بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۵۰۰ وات به میزان $۲/۸۳\times۱۰^{-۶}$ m^2/s و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۲۰۰ وات به میزان $۶/۶۵\times۱۰^{-۷}$ m^2/s به دست آمد. میزان انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ حرارتی مؤثر در خشک کردن برگ‌های اکالیپتوس بر اساس یک رابطه نمایی به ترتیب به میزان ۹/۹۵۲ W/g و ۸×۱۰^{-۶} m^2/s به دست آمد. با افزایش توان، انرژی مصرفی ویژه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار آن مربوط به توان ۵۰۰ وات به میزان ۰/۹۵۸۳ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: مایکروویو، سینتیک خشک کردن، انرژی فعال‌سازی، ضریب نفوذ حرارتی مؤثر، برگ اکالیپتوس

مقدمه

اکالیپتوس با نام علمی *Eucalyptus camadulensis Dehnh* از درختان عظیم و سریع الرشد اقیانوسیه که به نقاط مختلف دنیا نیز انتشار یافته است و جنگل‌های وسیعی از آن در هند و مراکش ایجاد شده است. این گیاه بومی استرالیاست و در این قاره غذای اصلی موجود در وعده غذایی خرس‌های کوآلا محسوب می‌شود. بیش از ۵۰۰ گونه دارد. برگ‌های اکالیپتوس و روغنی که آن‌ها تولید می‌کنند سبب کشتن باکتری‌ها و رفع ناراحتی‌های تنفسی افراد مبتلا به خناق، آسم و برونشیت می‌شود. اکالیپتوس به انواع عطر، صابون و برخی از مواد غذایی و نوشیدنی‌ها اضافه می‌شود. از این گیاه همچنین به عنوان عامل دفع حشرات نیز استفاده و به روغن شمع و افشانه‌های حشره‌کش نیز اضافه می‌شود(Rajamohan *et al*., 2014). خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری غذا است (Arslan *et al*., 2004). در خشک‌کن‌های با هوای گرم به دلیل این‌که هدایت حرارتی پایین است و انتقال حرارت به قسمت‌های داخلی ماده غذایی محدود شده است ، راندمان انرژی پایین آمده ، مدت زمان طولانی‌تری برای خشک کردن لازم است (Feng & Tang, 1998). برای رفع این مشکل و جلوگیری از کاهش کیفیت و دست‌یابی به یک فرآیند حرارتی مؤثر، از مایکروویو برای خشک کردن مواد غذایی استفاده شده است . مثال‌های متعددی از کاربردهای خشک کردن به وسیله مایکروویو وجود دارد. کاربرد مایکروویو در خشک کردن ، گستره‌ی وسیعی از صنایع شامل صنایع غذایی، صنایع شیمیایی ، اتومبیل سازی و غیره را در برمی‌گیرد .در هر مورد سامانه‌های خشک کردن مایکروویو، زمان خشک کردن را به طور قابل توجهی کاهش داده‌اند بدون این‌که اثر منفی بر روی کیفیت محصول داشته باشند. در خشک کردن مایکروویو، گرما حاصل از تبدیل انرژی مایکروویو به انرژی حرارتی در درون مواد مرطوب است و فشار و دمای مطلوب را برای خشک کردن سریع مواد فراهم می‌کند. گرمایش حجمی ناشی از نفوذ مایکروویو و کاهش هزینه‌های فرآیند، مایکروویو را به منبع جذاب انرژی حرارتی تبدیل کرده است. زمان‌های کوتاه‌تر فرآوری، به میزان قابل توجهی هزینه‌های تولید برخی محصولات را کاهش می‌دهد (Zarein *et al*., 2014). مایکروویو، یک روش سریع خشک کردن مواد غذایی است که انرژی آن قابل مقایسه با روش‌های متداول خشک کردن است. در خشک کردن با مایکروویو خروج رطوبت سریع‌تر است و همچنین به دلیل تمرکز انرژی سیستم مایکروویو فقط ۲۰ تا ۳۵ درصد نسبت به سایر روش‌های خشک کردن، نیاز به فضا دارد (Feng & Tang, 1998; Yongsawatdigul & Gunasekaran,1996). پژوهش‌های مختلفی برای خشک-کردن محصولات غذایی با خشک‌کن مایکروویو انجام شده است. درویشی و همکاران لایه‌های هویج را در خشک‌کن مایکروویو، همرفتی و ترکیب مایکروویو - همرفتی خشک کرده و اثرات آن را بر زمان خشک‌کردن، آهنگ تبخیر و تغییرات رنگ مورد بررسی و مقایسه قرار دادند (Darvishi *et al*., 2012). زارعین و همکاران مدل‌سازی ریاضی را برای خشک‌کردن لایه‌های سیب با خشک‌کن مایکروویو به دست آورده‌اند (Zarein *et al*., 2015). همچنین اثرات دما، نرخ جریان هوا و ضخامت نمونه‌ی مکعبی هویج در سینتیک خشک کردن و مقادیر ضریب انتشار برای کاهش نرخ خشک شدن مورد مطالعه قرار گرفت (Darvishi *et al*., 2012; Darvishi & Zarein, 2012). برای بررسی سینتیک خشک شدن محصول مورد نظر، نیاز به یک سری ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی مانند انتقال جرم و حرارت، و ضریب مؤثر انتشار رطوبت می‌باشد. هدف از این تحقیق، بررسی سطوح مختلف توانی مایکروویو بر سینتیک خشک شدن (مدت زمان خشک شدن، نفوذ حرارتی مؤثر و انرژی فعال‌سازی) بر روی برگ اکالیپتوس در یک آون مایکروویو می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برگ‌های اکالیپتوس مورد آزمایش از پردیس جنگلی قائم شهر کرمان تهیه شد و برای انجام آزمایش در یخچال در دمای ۴+ درجه سلسیوس نگهداری شد. رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آون در دمای۱±۱۰۵ درجه سلسیوس به میزان ۶۳/۵٪ بر پایه تر به دست آمد. بطوریکه تغییر وزنی بین دو بار توزین مشاهده نشد. این کار در ۳ تکرار انجام شد. رابطه۱ برای میزان رطوبت اولیه بر پایه خشک استفاده شد (Ertekin & Yaldız, 2004).

$$\mathbf{M(\%\,d.b.)} = \frac{m_0 - m_f}{m_f} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن M درصد رطوبت بر پایه خشک (بدون بعد)، m_0 جرم اولیه نمونه (گرم)، m_f جرم نمونه بعد از خشک کردن در آون مایکروویو (گرم) می‌باشد. برای انجام فرآیند خشک کردن، برگ‌های اکالیپتوس به ضخامت متوسط ۰/۵ میلی متر انتخاب شد و سپس با استفاده از ترازوی دیجیتال مدل (GF-600, Japan) با دقت ۰/۰۱ ± گرم، در نمونه‌های ۵۰ گرمی توزین شد.

فرآیند خشک کردن برگ‌های اکالیپتوس با استفاده از خشک‌کن مایکروویو (ME9114ST-Samsung) انجام شد. در روش مایکروویو از چهار سطح توانی (۲۰۰، ۳۰۰،۴۰۰ و۵۰۰ وات) برای خشک کردن استفاده شد. توزین نمونه‌ها هر ۱۵ ثانیه توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱± گرم انجام شد.

ضریب نفوذ حرارتی مؤثر

برای به دست آوردن ضریب نفوذ از رابطه۲ استفاده می‌شود (Arslan *et al*., 2004).

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2 D_{eff}t}{4}\frac{}{a^2}\right] \qquad (۲)$$

که در آن MR کسر رطوبتی (بدون بعد)، L نصف ضخامت نمونه به (m)، t زمان خشک شدن به (s)، n تعداد مشاهدات و D_{eff} ضریب نفوذ حرارتی مؤثر به m^2/s می‌باشد.

رابطه۲ در مدت زمان‌های طولانی خشک شدن به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff}t}{4a^2}\right] \qquad (۳)$$

با گرفتن لگاریتم از طرفین رابطه۳ و رسم نمودار Ln(MR) بر حسب زمان از شیب نمودار (k) می‌توان D_{eff} را به دست آورد.

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4a^2} \quad (۴)$$

انرژی فعال‌سازی

برای به دست آوردن انرژی فعال‌سازی در مایکروویو، وابستگی بین ضریب نفوذ حرارتی مؤثر و نسبت توان خروجی مایکروویو در برابر مقدار (وزن) نمونه بر اساس مدل آرنیوس، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Chhninman, 1984).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{p}\right) \quad (۵)$$

که در آن، P توان مایکروویو (W)، m جرم نمونه(g)، D_0 عرض از مبدأ (m^2/s)، E_a انرژی فعال‌سازی (W/g) و D_{eff} ضریب نفوذ حرارتی مؤثر (m^2/s) می‌باشد.

انرژی مصرفی در مایکروویو

انرژی مصرفی در مایکروویو از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Chhninman, 1984).

$$E_t = P \times t \quad (۶)$$

که در آن P توان خروجی از مایکروویو (W) و t مدت زمان خشک‌شدن (h) می‌باشد.

انرژی مخصوص خشک‌کردن به روش مایکروویو

میزان انرژی مخصوص خشک کردن برگ اکالیپتوس برابر است با میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم برگ اکالیپتوس که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Chhninman, 1984).

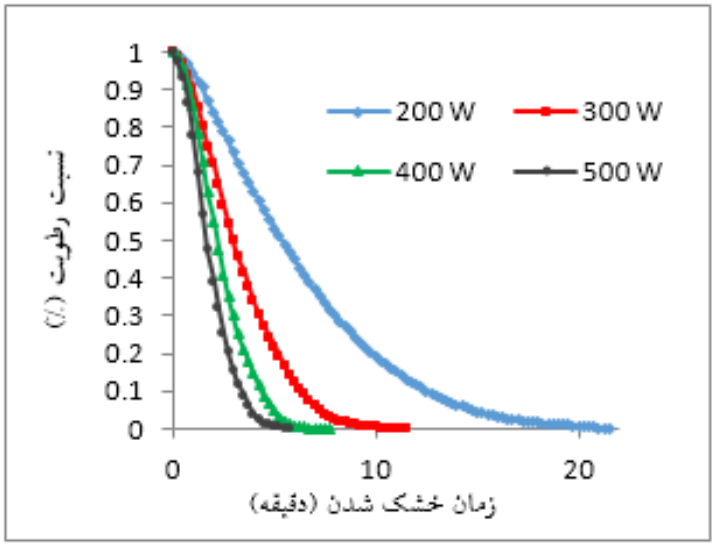
$$E_{kg} = \frac{E_t}{w_0} \quad (۷)$$

که E_{kg} انرژی مخصوص مورد نیاز (kW.h/kg) و W_0 وزن اولیه نمونه آزمایشی (kg) است.

نتایج و بحث

بررسی سینتیک خشک شدن

شکل۱ تغییرات نسبت رطوبت خشک شدن برگ‌های اکالیپتوس در توان‌های مختلف مایکروویو نسبت به زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود زمان خشک شدن نسبت به توان مایکروویو متفاوت می‌باشد. افزایش توان خروجی مایکروویو، رطوبت نسبی محصول را بیشتر کاهش می‌دهد، زیرا این‌گونه به نظر می‌رسد که با افزایش توان خروجی از مایکروویو دمای درون محفظه و شدت پرتوهای مایکروویو افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت برگ‌های اکالیپتوس می‌شود، به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت شدیدتر است. با توجه به نمودارهای شکل۱، سرعت خشک شدن و از دست دادن رطوبت با گذشت زمان در طی خشک کردن کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی را سایر پژوهشگران در خشک کردن لایه‌های سیب و سیب‌زمینی با استفاده از مایکروویو به دست آورده‌اند (Kassem, 1998).



شکل ۱- منحنی‌های نسبت رطوبت خشک شدن برگ اکالیپتوس

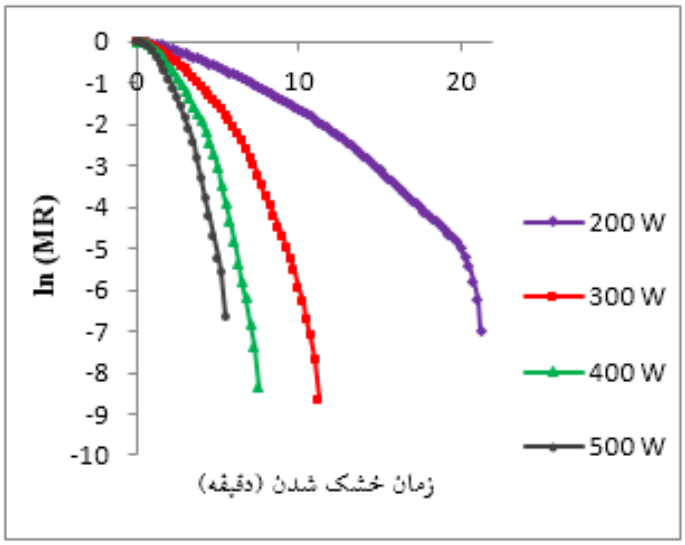
در توان پایین‌تر مدت زمان خشک شدن زیاد می‌باشد بطوریکه زمان خشک شدن برای توان ۵۰۰ وات ۵/۷۵ دقیقه و برای توان ۲۰۰ وات ۲۱/۵ دقیقه به دست آمد. با افزایش توان از ۲۰۰ به ۵۰۰ وات، زمان خشک شدن برگ‌های اکالیپتوس، ۷۳/۲۶٪ کاهش می‌یابد.

ضریب نفوذ حرارتی مؤثر

شکل۲ نمودار Ln(MR) بر حسب زمان را در حالت‌های مختلف خشک‌کردن را نشان می‌دهد. از شیب نمودار خط برازش داده شده بر هر یک از منحنی‌ها، ضریب نفوذ حرارتی مؤثر به دست می‌آید. در جدول۱ مقادیر ضریب نفوذ حرارتی مؤثر و ضریب تبیین در سطوح توانی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات آورده شده است. مشاهده شد که بیشترین ضریب نفوذ حرارتی

مؤثر در توان ۵۰۰ وات به میزان m^2/s ۲/۸۳×۱۰$^{-۶}$ و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۲۰۰ وات به میزان m^2/s ۱۰$^{-۷}$ ۶/۶۵×۱۰ به دست آمد.

همان‌گونه که از جدول۱ ملاحظه می‌گردد، در روش خشک کردن با مایکروویو با افزایش توان مایکروویو، ضریب انتشار مؤثر حرارت، یک روند افزایشی دارد. دلیل وقوع این مسئله تأثیر بارز دما در اثر افزایش توان مایکروویو در ایجاد جنبش مولکولی و گرمای بیشتر و افزایش ضریب مذکور می‌باشد.



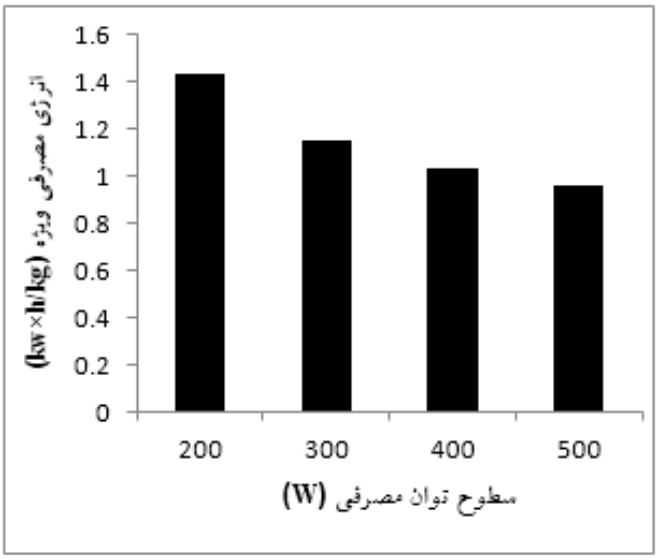
شکل ۲- نمودار Ln(MR) بر حسب زمان در سطوح توانی مختلف.

جدول ۱- مقادیر ضریب نفوذ حرارتی مؤثر در توان‌های مختلف

توان (W)	ضریب نفوذ حرارتی مؤثر (m^2/s)	R^2
۲۰۰	٦/٦٥×١٠$^{-٧}$	٠/٩٤٦
۳۰۰	١/٦٦٤×١٠$^{-٦}$	٠/٩١٢
٤٠٠	٢/٥٣٤×١٠$^{-٦}$	٠/٩٠٢
٥٠٠	٢/٨٢٦×١٠$^{-٦}$	٠/٩٢٦

انرژی مصرفی ویژه

یکی از عوامل بسیار مهم در طراحی و ارزیابی خشک کن‌ها میزان انرژی مصرفی است. خشک کردن به روش مایکروویو یکی از روش‌های نسبتاً ارزان می‌باشد و انرژی کمتری را نسبت به بقیه خشک‌کن‌ها مصرف می‌کند (Ozkan *et al*., 2007). انرژی ویژه را، میزان انرژی مورد نیاز برای خشک‌کردن یک کیلوگرم محصول تازه می‌گویند. آنالیز انرژی در مراحل مختلف خشک شدن برگ اکالیپتوس با استفاده از داده‌های به دست آمده در طول آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. میزان انرژی مصرفی ویژه در طی زمان خشک شدن، با استفاده از انرژی مصرفی در مایکروویو و وزن نمونه‌های برگ اکالیپتوس به دست آمد. شکل۳ میزان انرژی مصرفی ویژه در مایکروویو در توان‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش توان، انرژی مصرفی ویژه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار آن مربوط به توان ۵۰۰ وات به میزان ۰/۹۵۸۳ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد.



شکل ۳- انرژی مخصوص مورد نیاز طی خشک‌کردن برگ اکالیپتوس در سطوح توانی مختلف.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، توان مایکروویو برای خشک کردن برگ‌های اکالیپتوس بر مدت زمان خشک شدن و ضریب نفوذ حرارتی مؤثر در یک خشک‌کن مایکروویو تأثیر دارد. با افزایش توان خروجی مایکروویو، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش می‌یابد، بطوریکه زمان خشک شدن برای توان ۵۰۰ وات ۵/۷۵ دقیقه و برای توان ۲۰۰ وات ۲۱/۵ دقیقه به دست آمد. با افزایش توان از ۲۰۰ به ۵۰۰ وات، زمان خشک شدن برگ‌های اکالیپتوس، ۷۳/۲۶٪ کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۵۰۰ وات به میزان $۲/۸۳\times۱۰^{-۶}$ m^2/s و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۲۰۰ وات به میزان $۶/۶۵\times۱۰^{-۷}$ m^2/s به دست آمد. میزان انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ حرارتی مؤثر در خشک‌کردن برگ‌های اکالیپتوس بر اساس یک رابطه نمایی به ترتیب به میزان ۹/۹۵۲ W/g و ۸×۱۰^{-۶} m^2/s به دست آمد. با افزایش توان، انرژی مصرفی ویژه

کاهش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار آن مربوط به توان ۵۰۰ وات به میزان ۰/۹۵۸۳ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد. با توجه به نتایج این تحقیق به نظر می‌رسد که خشک کردن با مایکروویو به دلیل زمان کوتاه آن، روش مناسبی برای خشک کردن بیشتر مواد غذایی با رطوبت بالا و گیاهان دارویی برای حفظ کیفیت آن‌ها می‌باشد.

منابع و مآخذ

1. Arslan, O., Erzengin, M., Sinan, S. & Ozensoy, O. 2004. Purification of Mulberry (morus alba l.) Polyphenol Oxidase by Affinity Chromatography and Investigation of its Kinetic and Electrophoretic Properties. Food Chem. Vol. 88(3), 479-484.
2. Chhninman, M.S. 1984. Evaluation of Selected Mathematical Models for Describing Thin Layer Drying of In-Shell Pecans. Transactions of the ASAE. Vol. 27(11), 610-615.
3. Darvishi, H. & Zarein, M. 2012. Thermal Conductivity of Sunflower Seed as a Function of Moisture Content and Bulk Density. World App Sci Jou. Vol. 18(18), 1321-1325.
4. Darvishi, H., Banakar, A. & Zarein, M. 2012. Mathematical Modeling and Thin Layer Drying Kinetics of Carrot Slices. Glob Jour of Sci Fron Res. Vol. 12(18), 57-64.
5. Ertekin, C. & Yaldız, O. 2004. Drying of Eggplant and Selection of A Suitable Thin Layer Drying Model. Food Eng. Vol. 63(23), 349-359.
6. Feng, H. & Tang, J. 1998. Microwave Finish Drying Diced Apples in a Spouted Bed. Jou of Food Sci. Vol. 63(23), 679-683.
7. Kassem, A.S. 1998. Comparative Studies on Thin Layer Drying Models for Wheat. In 13th International congress on Agricultural Engineering. Morocco Vol. 6, 2-6.
8. Ozkan, A., Akbudak, B. & Akbudak, N. 2007. Microwave ,Drying Characteristics of Spinach. Jou of Food Eng. Vol. 78(43), 577-583.
9. Rajamohan, N., Rajasimman, M., Rajeshkannan, R. & Saravananb, V. 2014. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on the removal of Aluminum by modified Eucalyptus camaldulensis barks. Alex. Eng. J. Vol. 53(2), 409-415.
10. Yongsawatdigul, J. & Gunasekaran, S. 1996. Microwave-Vacuum Drying of Cranberries: part ii. Quality Evaluation. Jour of Food Proc and Preser. Vol. 20(13), 145-156.
11. Zarein, M., Samadi, S.H. & Ghobadian, B. 2014. Kinetic Drying and Mathematical Modeling of Apple Slices on Dehydration Process, Food Proc Tech. Vol. 4(7), 1-4.
12. Zarein, M., Samadi, S.H. & Ghobadian, B. 2015. Investigation of Microwave Dryer Effect on Energy Efficiency During Drying of Apple Slices. Jour of the Sau Soci of Agri Sci. Vol. 14(25), 41-47.

Investigation of Drying Kinetics of Eucalyptus Leaves (*Eucalyptus camadulensis Dehnh*) in Microwave Oven

Abstract

Eucalyptus with scientific name of (Eucalyptus camadulensis Dehnh) is one of huge and fast-growing tree of Pacific which its leaves have a lot of medicinal properties. In this research the drying behavior, effective thermal diffusivity and activation energy were studied using microwave oven. In this method, the microwave power levels of (200, 300 400 and 500 W) were used for drying of eucalyptus leaves. The microwave power levels were affected on the effective thermal diffusivity and drying time, so the drying time was obtained as 5.75 min and 21.5 min for power levels of 500 and 200 watt, respectively. Also, the drying time has showed reduction of 73.26 % from power level of 200 to 500 watt. The highest and lowest value of effective thermal diffusivity was obtained as 2.83×10^{-6} and 6.65×10^{-7} m^2/s for power levels of 500 and 200 watt, respectively. The activation energy and the effective thermal diffusion constant in the drying of eucalyptus leaves based on an exponential relationship were as 9.952 W/g and 8×10^{-6} m^2/s, respectively. The special consumption energy is reduced with increasing in power so that the least amount was obtained for power of 500 watts as 0.9583 kWh/kg.

Keywords: Microwave, Drying Kinetics, Activation Energy, Effective Thermal Diffusivity, Eucalyptus Leaves