

Potential saving in energy using combined heat and power technology for drying agricultural products (banana slices)



Seyed Hashem Samadi, Barat Ghobadian *, Gholamhassan Najafi, Ali Motevali

Department of Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, Agricultural Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received 3 April 2013; accepted 4 September 2013

Available online 16 September 2013

صرفه جویی بالقوه در انرژی با استفاده از فناوری ترکیبی حرارت و فنون برای خشک کردن محصولات کشاورزی (برش های موز)

سید هاشم صمدی ، بارات قربانی ، غلامحسن نجفی ، علی متولی

پارتمان مکانیک و ماشین آلات کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

فشار خشک کردن برش های موز در سیستم خشک کن ترکیبی حرارت و قدرت در ۴ سطح بار موتور (۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵) و ۱۰۰٪ و در سه سطح ضخامت محصول خشک کن (۳، ۵ و ۷) با سرعت جریان هوا ثابت ۱ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل سازی ریاضی نشان داد که مدل Midilli و همکاران ، منطبق ترین مدل را به داده های تجربی رانشان داد. مطالعه حاضر اهمیت بازیابی حرارت را برای بهبود مصرف انرژی و کارایی سیستم تایید می کند. راندمان انرژی این خشک کن از ۱۱ تا ۲۰ درصد بیشتر از راندمان برق بود. همچنین مصرف انرژی ویژه بین ۴۰۹ تا ۹۵۷ کیلووات ساعت بر کیلوگرم آب متغیر بود. کمترین مقدار مصرف انرژی و بیشترین مقدار بازده انرژی در ۷۵ درصد بار موتور و ضخامت ۳ میلی متر نمونه مشاهده شد.

مقدمه

موز یکی از رایج ترین میوه هایی است که در بسیاری از کشورها مصرف می شود. با این حال، به سرعت فاسد می شود، به خصوص در مورد موز رسیده. یکی از روش های مرسوم برای نگهداری طولانی مدت محصولات کشاورزی مانند سبزیجات و میوه ها، خشک کردن است. خشک کردن معمولا برای به حداقل رساندن خرابی پس از برداشت استفاده می شود. خشک کردن غذاها را با حذف رطوبت کافی از غذا حفظ می کند و فعالیت میکروبیولوژیکی را کاهش می دهد و تغییرات فیزیکی و شیمیایی را در طول ذخیره سازی برای جلوگیری از پوسیدگی و فساد به حداقل می رساند

Barbosa-Canovas and VegaMercado, 1996; Calban and Ersahan, 2003; Chen and

Mujumdar, 2008, 1996;) خشک کردن همرفت با هوای گرم یکی از قدیمی ترین روش ها و یک تکنیک برای حفظ محصولات کشاورزی مانند موز انجام می شود. بیش از ۸۵ درصد خشک کن های صنعتی از نوع همرفتی با هوای

گرم هستند. با این حال، یکی از معایب این خشک کن ها، بهره برداری با انرژی بالا است (Alibas, 2007;)

Koyuncu et al., 2007; Lewicki, 2006; Motevali et al., 2011). انرژی در بسیاری از کشورها نقش اساسی

در توسعه اقتصادی دارد. استفاده از گرمای هدر رفته گاز خروجی موتور احتراق داخلی یک وسیله خشک کردن جایگزین

به جای خشک کردن هوای گرم است. فناوری تولید همزمان یا ترکیبی حرارت و برق (CHP) یک روش صرفه جویی در

انرژی است که به عنوان مفهومی از تولید گرما و برق به طور همزمان در محل از یک منبع سوخت واحد تعریف می شود

(De Paepe et al., 2006; Eriksson and Kjellström, 2010). وو و وانگ، ۲۰۰۶). این فناوری مبتنی بر

از یافت گرمای هدر رفته به منظور افزایش قابل توجه بازده کل سیستم CHP در مقایسه با سیستم های تولید برق

معمولی است. بنابراین، این باعث صرفه جویی بالقوه قابل توجهی در هزینه های انرژی می شود. CHP همچنین نسبت

به سیستم های تولید معمولی با محیط زیست سازگارتر است. CHP کارآمدتر است، مصرف سوخت فسیلی را کاهش می

دهد و در نتیجه انتشار گازهای گلخانه ای را به جو کاهش می دهد (Dorer and Weber, 2009; Erdem

; et al., 2007; Godefroy et al., 2007; Haeseldonckx et al., 2007

.(Peacock and Newborough, 2005; Schick Tanz et al., 2011

CHP برای بسیاری از کاربردهای مختلف در بخش های صنعتی، تجاری و مسکونی استفاده می شود (Backlund و

Karlsson, 1988; Barigozzi و همکاران، ۲۰۱۱؛ Dentice d'Accadia و همکاران، ۲۰۰۳؛ Kopanos و

همکاران، ۲۰۱۳؛ . Oh et al., 2012. Onovwiona و همکاران، ۲۰۰۷). گرمای بازاریابی شده از CHP را می توان

برای اهداف بسیاری استفاده کرد. گرمای هدر رفته را می توان به طور مستقیم برای گرم کردن هوا، سرو اجاق های

صنعتی، فرآیند جذب و همچنین برای تولید آب گرم برای مصارف دیگر استفاده کرد. در برخی از کاربردهای صنعتی،

گروه یک محرک اصلی (مانند توربین گاز، موتورهای رفت و برگشتی و موتورهای استرلینگ) به فرآیندی مانند خشک

کردن محصولات کشاورزی هدایت می شود (گونگر و همکاران، ۲۰۱۱؛ مکملر و همین، ۲۰۱۰؛ تورول اولتا، ۲۰۰۴).

حدود دو سوم انرژی ورودی در موتور احتراق داخلی از طریق گاز آگزوز و سیستم خنک کننده هدر می رود (یون و همکاران، ۲۰۱۳). با توجه به اتلاف انرژی بالای گاز خروجی موتورهای احتراق داخلی، انرژی مورد نیاز برای خشک کردن محصولات کشاورزی می تواند از این گازهای زائد باقی مانده بازیافت شود.

برخی از کارهای تحقیقاتی در خشک کردن مواد مختلف با گرمای اتلاف موتور احتراق داخلی انجام شده است مانند: خشک کردن برنج (Basunia and Abe, 2008)، خشک کردن زیست توده (Li et al., 2012; Nguyen and Steinbrecht, 2008)، آسیاب خمیر و کاغذ (هولمبرگ و آهتیل، ۲۰۰۵)، کانی های رسی (فتح، ۱۹۹۱) و کامپوزیت بزرگ (کمپ، ۲۰۰۵).

با این حال، هیچ تحقیق کاملی در مورد خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از گرمای اتلاف گازهای خروجی در شرایط مختلف موتور وجود ندارد. در این کار تحقیقاتی، از گرمای هدر رفته گاز خروجی یک موتور احتراق داخلی برای برآیند خشک کردن برش موز استفاده شد. هدف از این مطالعه بررسی سینتیک خشک کردن، پیشنهاد یک مدل ریاضی برای خشک کردن لایه نازک موز و ارزیابی مصرف انرژی و کارایی با و بدون کاربرد CHP می باشد.

۲ - مواد اولیه و روش ها :

۲.۱. مواد آزمایشی

در این مطالعه از برش های موز برای انجام آزمایش ها استفاده شد. نمونه های مورد مطالعه به تازگی تهیه شده و تا زمان انجام آزمایش در یخچال در دمای 4 ± 1 درجه سانتیگراد نگهداری شدند. رطوبت اولیه نمونه ها $68.3 \pm 1/5$ درصد (وزن رزن) به دست آمد و با خشک کردن در کوره همرفت با هوا در ساعت تعیین شد.

1.05 ± 1 درجه سانتیگراد تا زمانی که وزن دیگر تغییر نکرد (وانگ و همکاران، ۲۰۰۷)

برش های موز پس از آماده سازی و تنظیم خشک کن CHP برای سطوح مختلف آزمایشی روی بستر خشک کن قرار گرفتند. یک موتور و یک ژنراتور با مشخصات زیر استفاده شد.

Engine Type: single cylinder- 4-stroke Air-cooled, power

hp @ 1200 rpm, Displacement: 196 CC, Bore·Stroke ۶۵

mm, Fuel Types: Natural gas (N), LPG (L), Ignition ۵۴۶۸

system: Transistor Coil Ignition (T.C.I.)

Generator Type: Single-Phase AC Synchronous, Frequency

HZ, Current (A)/DC voltage (V): 12 V/8A, Maximum ۵۰

power: 2.3 kW, Power rating: 2 kW

پارامترهای هوا با اندازه گیری دما و سرعت با استفاده از دماسنج (Lutron, TM-925, Taiwan) و بادسنج (Anemometer, Lutron-YK, 80 AM, Taiwan) تنظیم شدند. در طول آزمایشات خشک کردن، دامنه تغییرات دمای محیط 3 ± 23 درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی محیط 4 ± 24 درصد بود. فرآیند خشک کردن تا رسیدن به رطوبت حدود ۵ درصد به صورت مرطوب انجام شد. تمام آزمایش ها در سه تکرار انجام شد.

۲-۲. توضیحات سیستم :

در این تحقیق از گرمای تلف شده از آگزوز یک موتور-ژنراتور برای فرآیند خشک کردن استفاده شد. تجهیزات مورد استفاده در این خشک کن شامل یک موتور آبی سی تک سیلندر که با سوخت گاز طبیعی کار می کند، یک ژنراتور تولید کننده ۲ کیلو وات برق، یک دیب سنج گاز برای اندازه گیری مصرف سوخت، یک محفظه خشک کن که نمونه های قرار داده شده در آن را خشک می کند ، دو عدد فن برای حذف هوای داغ محفظه خشک کن ، ترازوی دیجیتال برای توزین نمونه ها، سنسور دما برای اندازه گیری دما و کامپیوتر برای ثبت دمای هوای گرم و وزن نمونه استفاده شده است. نمودار شماتیک این سیستم خشک کن CHP در شکل ۱ نشان داده شده است.

گرمای هدر رفته از آگزوز موتور به محفظه خشک کن هدایت می شود. گرمای تولید شده مستقیماً به زیر سینی محفظه هدایت می شود و محفظه خشک کن گرم می شود. هوای گرم در داخل محفظه به گردش در می آید و توسط یک فن از محفظه خارج می شود. موتور برای چند دقیقه کار کرد تا به حالت ثابت برسد. برای هر آزمایش، نمونه ها (حدود 0.5 ± 32 گرم با ضخامت های ۳، ۵ و ۷ میلی متر) در محفظه خشک کن قرار داده شدند و خشک شدند. آزمایش ها با سرعت ثابت و چهار سطح بار موتور، ۲۵، ۵۰، ۷۵ درصد و بار کامل (۱۰۰ درصد) انجام شد. تلفات رطوبتی نمونه ها در فواصل ۵ دقیقه در طول فرآیند خشک کردن توسط ترازوی دیجیتال (A & D, GF 600، ژاپن) و با دقت $0.01 \pm$ گرم ثبت شد.

۲-۳. مدل سازی ریاضی

یکی از مهمترین جنبه های تکنولوژی خشک کردن، مدل سازی فرآیند خشک کردن است. در این مطالعه، داده های آزمایشی خشک کردن برش های موز در بارهای مختلف موتور در ۶ مدل خشک کن لایه نازک که در جدول ۱ فهرست شده اند، قرار گرفتند.

نسبت رطوبت (MR) برای برش های موز در طول فرآیند خشک کردن با استفاده از معادله 1 محاسبه شد:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

که در آن، MR نسبت رطوبت (بدون ابعاد) است؛ M_t ، M_e و M_0 به ترتیب محتوای رطوبت در هر زمان، محتوای رطوبت تعادلی، و رطوبت اولیه (kg [H₂O]/kg ماده خشک) هستند. مقادیر M_e در مقایسه با M_t و M_0 نسبتاً کوچک هستند، از این رو خطای موجود در ساده سازی با فرض اینکه M_e برابر با صفر است ناچیز است (Akgun and Doymaz, 2005). سپس معادله را می توان به صورت زیر ساده کرد:

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

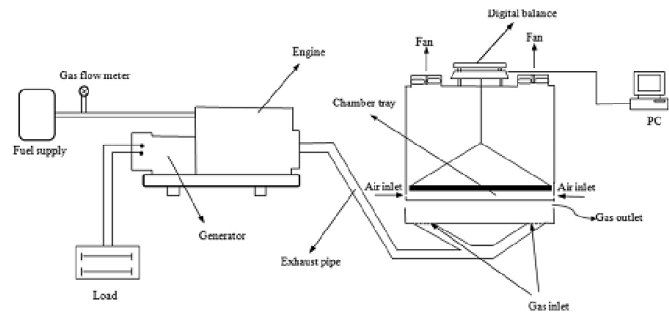


Figure 1 Schematic diagram of the CHP dryer system.

Table 1 Mathematical models given for drying curves.

No.	Model name	Model	Reference
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Motevali et al. (2010)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Motevali et al. (2010)
3	Wang and Singh	$MR = 1 + a.t + b.t^2$	Wang and Singh (1978)
4	Henderson and Pabis	$MR = a.\exp(-kt)$	Chinnan (1984)
5	Logaritmik	$MR = a.\exp(-kt) + c$	Dandamrongrak et al. (2002)
6	Midili et al.	$MR = a.\exp(-kt^n) + b.t$	Midilli et al. (2002)

زمون آماری با استفاده از ضریب تعیین (R^2)، کای اسکوئر کاهش یافته (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی خوبی برازش هر مدل محاسبه شد. R^2 ، RMSE and Thev 2 با توجه به معادلات زیر محاسبه شدند (Ertekin and Yaldiz, 2004):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (MR_{pre,j} - MR_{exp,j})^2}{N - z} \quad (3)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{j=1}^N (MR_{pre,j} - MR_{exp,j})^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (MR_{exp,j} - \overline{MR}_{exp})(MR_{pre,j} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (MR_{exp,j} - \overline{MR}_{exp})^2 \sum_{j=1}^N (MR_{pre,j} - \overline{MR}_{pre})^2}} \quad (5)$$

که در آن MRexp نسبت رطوبت بدون بعد آزمایشی است، MRpre نسبت رطوبت بدون بعد پیش بینی شده به مدل، تعداد نقاط داده تجربی، و تعداد پارامترهای مدل است. گفته می شود که اگر مقدار R 2 زیاد باشد و مقادیر v و RMSE کم باشد، مدل خوب است. سرعت خشک شدن به صورت تعریف شد (اکپینار و همکاران، ۲۰۰۳)

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{t}$$

که در آن Mt+Dt میزان رطوبت در زمان t+Dt (کیلوگرم [H2O]/کیلوگرم ماده خشک)، Mt میزان رطوبت در زمان (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک)، زمان (دقیقه) و DR نرخ خشک شدن است. kg [H2O]/kg ماده خشک. (دقیقه).

۲.۴. تجزیه و تحلیل انرژی و بهره وری :

رای به دست آوردن مصرف انرژی و کارایی فرآیند خشک کردن، مصرف انرژی اولیه در سوخت و انرژی قابل دسترس گازهای خروجی پسماند ضروری است.

مصرف انرژی سوخت برای یک موتور IC با ارزش حرارتی و مصرف سوخت به دست می آید. مصرف انرژی با استفاده از معادله ۷ محاسبه شد:

$$Q_t = \left(\frac{\dot{m}_y Q_{LCV}}{3.6} \right) \times t$$

که در آن، Qt مصرف انرژی سوخت بر حسب کیلووات ساعت است، mf میزان مصرف سوخت 3 / hr است که توسط یک جریان سنج گاز به دست می آید، QLC وی ارزش حرارتی کمتر سوخت گاز را در 3 MJ/m و t زمان کارکرد موتور است بر ساعت است .

انرژی گازهای خروجی زباله بخش قابل توجهی از انرژی سوخت در موتور IC را شامل می شود (Ozcan and Soylemez, 2006). با داشتن نرخ جریان جرمی و دمای گازهای خروجی، انرژی قابل دسترس گازهای خروجی با استفاده از معادله ۸ به دست می آید:

$$Q_{ex} = [\dot{m}_{ex} C_p (T_{in,ex} - T_{out,ex}) \times t] / 3600$$

که در آن Q_{ex} انرژی گازهای خروجی بر حسب کیلووات ساعت، قلع، ex و T_{out} است، دمای گاز خروجی را در ورودی و خروجی محفظه خشک کن به ترتیب در C بررسی کنید، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت گازهای خروجی در J/kg کیلوگرم K ، m_{ex} نرخ جریان جرمی گازهای خروجی بر حسب کیلوگرم در ساعت است که با استفاده از معادله ۹ به دست می آید:

$$\dot{m}_{ex} = \dot{m}_f(1 + AF)$$

که در آن m_f نرخ جریان جرمی سوخت بر حسب m^3/h و AF نسبت هوا به سوخت است. این سیستم را می توان به صورت دو زیرسیستم مشاهده کرد، سیستم قدرت که یک موتور آی سی است که برق تولید می کند و سیستم بازیابی حرارت که خشک کن برای فرآیند خشک کردن است. راندمان سیستم زمانی که موتور فقط برق تولید می کند (تک تولید) توسط معادله ی زیر بدست می آید .

$$\eta_{s,g} = \frac{P_{el} \times 3.6}{\dot{m}_f Q_{LCV}} \times 100$$

که در آن P_{el} تولید برق (کیلووات) و $\mu_{s,g}$ راندمان تولید تک تولید است. راندمان کلی سیستم (بازده CHP) به عنوان ظرفیت گرمایش خشک کن (کیلووات) تقسیم بر انرژی ورودی به موتور از سوخت به اضافه بازده تولید تک تعریف می شود.

$$\eta_{CHP} = \eta_{s,g} + \frac{\dot{m}_{ex} C_p (T_{in,ex} - T_{out,ex})}{3600 \times \dot{m}_f Q_{LCV}} \times 100$$

همچنین از پارامتر مصرف انرژی ویژه برای ارزیابی مصرف انرژی خشک کن ها استفاده می شود. مصرف انرژی ویژه (SEC) به عنوان انرژی مورد نیاز برای تبخیر یک واحد جرم آب از محصول بر حسب کیلووات ساعت بر کیلوگرم $[H_2O]$ از معادله ۱۲ محاسبه شد: (Sharma and Prasad, 2006)

$$SEC = \frac{Q_t}{m_w}$$

که در آن، SEC مصرف انرژی ویژه بر حسب کیلووات ساعت/کیلوگرم آب، بر حسب میلی گرم مقدار آب تبخیر شده در طول فرآیند خشک کردن بر حسب کیلوگرم است

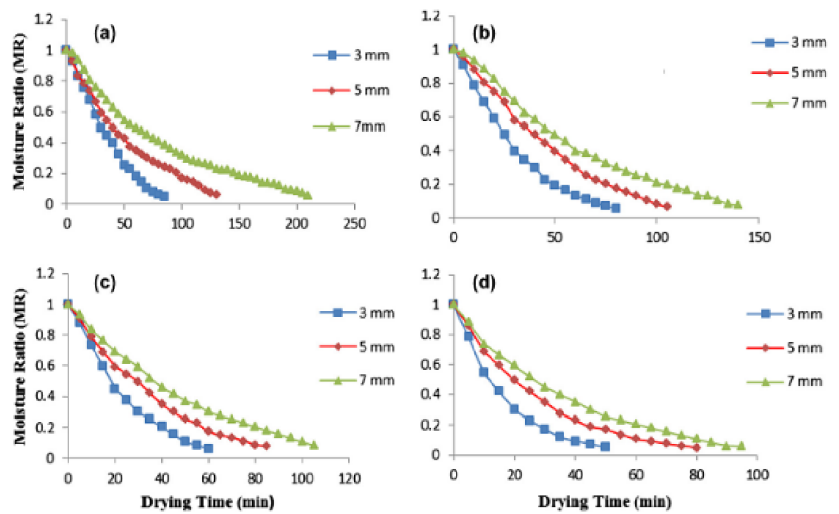


Figure 2 The variation of the moisture content with drying time at various engine loads (a) 25%, (b) 50% (c) 75% and (d) 100%.

Table 2 Results of statistical analysis on the modeling of moisture content and drying time in CHP dryer system.

No.	Load-thickness			Constance	R^2	χ^2	RMSE	
1	25%-3 mm	$k = 0.02515$			0.9715	0.00281	0.05286	
	25%-5 mm	$k = 0.01703$			0.9971	2.04×10^{-4}	0.01434	
	25%-7 mm	$k = 0.01132$			0.9966	2.41×10^{-4}	0.01554	
	50%-3 mm	$k = 0.03019$			0.9900	9.18×10^{-4}	0.03037	
	50%-5 mm	$k = 0.01880$			0.9589	0.0041	0.06341	
	50%-7 mm	$k = 0.01474$			0.9847	0.00123	0.03523	
	75%-3 mm	$k = 0.03923$			0.9898	9.93×10^{-4}	0.03152	
	75%-5 mm	$k = 0.02594$			0.9972	0.002286	0.01500	
	75%-7 mm	$k = 0.02000$			0.9932	5.43×10^{-4}	0.02332	
	100%-3 mm	$k = 0.05999$			0.9947	5.41×10^{-4}	0.02327	
	100%-5 mm	$k = 0.03116$			0.9857	0.00101	0.03181	
	100%-7 mm	$k = 0.02703$			0.9981	1.52×10^{-4}	0.01236	
	25%-3 mm	$k = 0.00686$	$n = 1.347$		0.9976	2.33×10^{-4}	0.01574	
	25%-5 mm	$k = 0.01483$	$n = 1.034$		0.9976	1.75×10^{-4}	0.01352	
25%-7 mm	$k = 0.01037$	$n = 1.019$		0.9968	2.31×10^{-4}	0.01539		
50%-3 mm	$k = 0.01573$	$n = 1.182$		0.9986	1.25×10^{-4}	0.01158		
50%-5 mm	$k = 0.00335$	$n = 1.434$		0.9974	2.47×10^{-4}	0.01625		
50%-7 mm	$k = 0.00773$	$n = 1.152$		0.9920	6.71×10^{-4}	0.02588		
75%-3 mm	$k = 0.02139$	$n = 1.182$		0.9983	1.71×10^{-4}	0.01350		
75%-5 mm	$k = 0.02025$	$n = 1.066$		0.9986	1.15×10^{-4}	0.01103		
75%-7 mm	$k = 0.01292$	$n = 1.110$		0.9971	2.23×10^{-4}	0.01572		
100%-3 mm	$k = 0.04428$	$n = 1.106$		0.9975	2.53×10^{-4}	0.01719		
100%-5 mm	$k = 0.05138$	$n = 0.860$		0.9945	3.87×10^{-4}	0.02030		
100%-7 mm	$k = 0.02540$	$n = 1.017$		0.9982	1.45×10^{-4}	0.01238		
3	25%-3 mm	$a = -0.01872$	$b = 8.687 \times 10^{-5}$		0.9977	2.30×10^{-4}	0.01564	
	25%-5 mm	$a = -0.01404$	$b = 5.66 \times 10^{-5}$		0.9927	5.26×10^{-4}	0.02340	
	25%-7 mm	$a = -0.00916$	$b = 2.374 \times 10^{-5}$		0.9879	8.71×10^{-4}	0.02989	
	50%-3 mm	$a = -0.02380$	$b = 0.0001545$		0.9973	2.56×10^{-4}	0.01635	
	50%-5 mm	$a = -0.01410$	$b = 4.822 \times 10^{-5}$		0.9887	0.0011	0.03399	
	50%-7 mm	$a = -0.01188$	$b = 3.940 \times 10^{-5}$		0.9886	9.25×10^{-4}	0.03102	
	75%-3 mm	$a = -0.03071$	$b = 0.0002560$		0.9962	3.66×10^{-4}	0.02001	
	75%-5 mm	$a = -0.02053$	$b = 0.0001159$		0.9954	3.37×10^{-4}	0.01994	
	75%-7 mm	$a = -0.01593$	$b = 7.020 \times 10^{-5}$		0.9946	4.36×10^{-4}	0.02138	
	100%-3 mm	$a = -0.04799$	$b = 0.0006412$		0.9952	4.86×10^{-4}	0.02382	
	100%-5 mm	$a = -0.02523$	$b = 0.0001801$		0.9604	0.002812	0.05466	
	100%-7 mm	$a = -0.02116$	$b = 0.0001228$		0.9888	8.92×10^{-4}	0.03069	
	4	25%-3 mm	$a = 1.0800$	$k = 0.02725$		0.9807	0.00190	0.04488
		25%-5 mm	$a = 1.0100$	$k = 0.01724$		0.9973	1.91×10^{-4}	0.01413
25%-7 mm		$a = 1.0200$	$k = 0.01157$		0.9972	1.92×10^{-4}	0.01427	
50%-3 mm		$a = 1.0520$	$k = 0.03182$		0.9939	5.56×10^{-4}	0.02455	
50%-5 mm		$a = 1.1100$	$k = 0.02105$		0.9762	0.0023	0.04942	
50%-7 mm		$a = 1.0660$	$k = 0.01584$		0.9915	6.89×10^{-4}	0.02673	
75%-3 mm		$a = 1.0480$	$k = 0.04119$		0.9933	6.5×10^{-4}	0.02664	
75%-5 mm		$a = 1.0230$	$k = 0.02655$		0.9980	1.65×10^{-4}	0.01332	
75%-7 mm		$a = 1.0330$	$k = 0.02072$		0.9949	4.04×10^{-4}	0.02066	
100%-3 mm		$a = 1.0200$	$k = 0.06126$		0.9955	4.64×10^{-4}	0.02327	
100%-5 mm		$a = 0.9621$	$k = 0.02984$		0.9882	8.41×10^{-4}	0.02988	
100%-7 mm		$a = 1.0010$	$k = 0.02706$		0.9981	1.52×10^{-4}	0.01269	
5		25%-3 mm	$a = 1.3470$	$c = -0.31740$	$k = 0.01610$	0.9972	2.45×10^{-4}	0.01773
		25%-5 mm	$a = 1.0400$	$c = -0.03934$	$k = 0.01580$	0.9978	0.000154	0.01299
	25%-7 mm	$a = 1.0190$	$c = 0.000967$	$k = 0.01160$	0.9972	1.98×10^{-4}	0.01445	
	50%-3 mm	$a = 1.1060$	$c = -0.07331$	$k = 0.02708$	0.9964	0.000331	0.01948	
	50%-5 mm	$a = 1.3790$	$c = -0.31860$	$k = 0.01269$	0.9908	8.95×10^{-4}	0.03152	
	50%-7 mm	$a = 1.1120$	$c = -0.06206$	$k = 0.01392$	0.9927	6.09×10^{-4}	0.02534	
	75%-3 mm	$a = 1.1190$	$c = -0.09133$	$k = 0.03394$	0.9967	3.23×10^{-4}	0.01969	
	75%-5 mm	$a = 1.0370$	$c = -0.02128$	$k = 0.02518$	0.9983	1.43×10^{-4}	0.01263	
	75%-7 mm	$a = 1.1030$	$c = -0.09338$	$k = 0.01703$	0.9976	1.93×10^{-4}	0.01457	
	100%-3 mm	$a = 1.0970$	$c = -0.09135$	$k = 0.05100$	0.9978	2.28×10^{-4}	0.01790	
	100%-5 mm	$a = 0.9180$	$c = 0.076870$	$k = 0.03772$	0.9940	4.23×10^{-4}	0.02191	
	100%-7 mm	$a = 1.0260$	$c = -0.03553$	$k = 0.02479$	0.9988	9.55×10^{-5}	0.01033	

(continued on next page)

Table 2 (continued)

No.	Load-thickness	Constance				R^2	χ^2	RMSE
6*	25%-3 mm	$a = 0.9985$	$b = -0.0007371$	$k = 0.00893$	$n = 1.246$	0.9988	1.11×10^{-4}	0.01198
	25%-5 mm	$a = 1.0080$	$b = -0.0003492$	$k = 0.01859$	$n = 0.962$	0.9980	1.41×10^{-4}	0.01289
	25%-7 mm	$a = 1.0360$	$b = -0.0001331$	$k = 0.01546$	$n = 0.930$	0.9976	1.75×10^{-4}	0.01375
	50%-3 mm	$a = 0.9999$	$b = -0.0002874$	$k = 0.0140$	$n = 1.225$	0.9989	1.01×10^{-4}	0.01119
	50%-5 mm	$a = 0.9994$	$b = -0.0002461$	$k = 0.00287$	$n = 1.484$	0.9977	2.28×10^{-4}	0.01635
	50%-7 mm	$a = 1.0360$	$b = -5.540 \times 10^{-5}$	$k = 0.01077$	$n = 1.081$	0.9931	5.06×10^{-4}	0.02508
	75%-3 mm	$a = 1.0070$	$b = -5.260 \times 10^{-5}$	$k = 0.02211$	$n = 1.176$	0.9984	1.58×10^{-4}	0.01465
	75%-5 mm	$a = 1$	$b = -0.0001125$	$k = 0.01923$	$n = 1.085$	0.9987	1.10×10^{-4}	0.01138
	75%-7 mm	$a = 1.0070$	$b = -0.0004649$	$k = 0.01682$	$n = 1.024$	0.9977	1.86×10^{-4}	0.01470
	100%-3 mm	$a = 1.0040$	$b = -0.0011380$	$k = 0.05030$	$n = 1.038$	0.9979	2.17×10^{-4}	0.01949
	100%-5 mm	$a = 1.0130$	$b = -0.0001872$	$k = 0.05165$	$n = 0.870$	0.9949	3.64×10^{-4}	0.02105
	100%-7 mm	$a = 1.0030$	$b = -0.0005574$	$k = 0.03195$	$n = 0.932$	0.9992	6.65×10^{-5}	0.00889

منحنی های رطوبت در مقابل زمان خشک شدن برای خشک کردن CHP نمونه های موز که تحت تأثیر بارهای مختلف موتور قرار می گیرند در شکل نشان داده شده است. ۲. بارهای موتور تأثیر مهمی بر زمان خشک شدن داشت. زمان لازم برای خشک کردن نمونه های موز از رطوبت اولیه ۱/۵ ± ۶۸/۳ درصد (وزن وزن) تا رطوبت نهایی ۱ ± ۴ درصد (وزن وزن) با افزایش بار موتور به طور قابل توجهی کاهش یافت. با توجه به شکل ۲، حداقل زمان خشک شدن برش های موز در بار کامل موتور (دمای ۹۵ درجه سانتیگراد) و ضخامت ۳ میلیمتر و حداکثر آن در ۲۵ درصد بار موتور (دمای ۵۰ درجه سانتیگراد) و ضخامت ۷ میلی متر بود. این بخاطر این است که؛ در بارهای بالاتر موتور دمای گاز و دبی جرمی گزوز افزایش می یابد. بنابراین انرژی موجود گازهای خروجی برای خشک کردن برش های موز افزایش می یابد.

همچنین انتقال جرم درون نمونه در بارهای موتور (درجه حرارت) بالاتر سریعتر بود زیرا شیب حرارتی داخل نمونه ها و سرعت تبخیر محصول افزایش می یافت. دمای محفظه خشک کن در ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و بار کامل موتور به ترتیب تقریباً ۵۰، ۶۵، ۸۰ و ۹۵ بود. علاوه بر این، می توان یافت، زمانی که ضخامت برش در بارهای ثابت موتور افزایش می یابد، زمان خشک شدن افزایش می یابد. محصولات برش نازک به دلیل انتقال سریعتر رطوبت از بدن به سطح و در نتیجه افزایش سطح برای همان مقدار محصول سریعتر خشک می شوند (ارتکین و یلدیز، ۲۰۰۴).

از طرف دیگر، از آنجایی که خشک شدن ابتدا در لایه بیرونی رخ می دهد، لایه سخت شده در سطح خارجی محصول ایجاد می شود. این لایه سخت شده الف را تحمیل می کند سدی در برابر پخش رطوبت در سطح محصول و طولانی شدن خروج آن از محصول (دویماز و اسماعیل، ۲۰۱۱)

داده های محتوای رطوبت به دست آمده از آزمایش های خشک کردن در دماها و ضخامت های مختلف نمونه در ۶ مدل خشک کن لایه نازک برازش داده شد (جدول ۱). تجزیه و تحلیل رگرسیون برای شش مدل مختلف خشک کردن لایه نازک با ارتباط زمان خشک کردن و نسبت رطوبت (MR) برای نمونه های موز انجام شد. نتایج آماری حاصل از مدل هایی مانند $RMSE$, R^2 , v_2 و مقادیر ثابت خشک کردن در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به بالاتر R^2 و پایین تر $RMSE$ و انتخاب شده است. نتایج برازش مدل های مختلف با داده های حاصل از خشک کردن موز نشان داد که Midil و همکاران (مدل (شماره ۶)) قادر به تخمین رطوبت در بیشتر زمان خشک شدن است.

بر اساس تحلیل رگرسیون چندگانه، Midili و همکاران. مدل، ثابت ها و ضرایب به شرح زیر است

$$MR = a \cdot \exp(-kt^t) + b.t$$

$$a = 1.057 + 0.0004668L - 0.04405S - 2.604 \times 10^{-5}L^2 \\ + 0.0005214LS + 0.005819S^2 + 1.472 \times 10^{-7}L^3 + 4 \\ \times 10^{-8}L^2S - 6.78 \times 10^{-5}LS^2 \\ R^2 = 0.88$$

$$b = -0.001757 + 5.409 \times 10^{-5}L - 0.0001703S - 5.736 \\ \times 10^{-7}L^2 + 1.672 \times 10^{-6}LS + 7.042 \times 10^{-5}S^2 - 1.92 \\ \times 10^{-9}L^3 + 1.365 \times 10^{-7}L^2S - 1.945 \times 10^{-6}LS^2 \\ R^2 = 0.86$$

$$k = 0.1095 - 0.001588L - 0.04584S + 1.638 \times 10^{-6}L^2 \\ + 0.0006526LS + 0.004833S^2 + 5.367 \times 10^{-8}L^3 - 3.304 \\ \times 10^{-7}L^2S - 6.88e \times 10^{-7}LS^2 \\ R^2 = 0.95$$

$$n = -2.108 + 0.06246L + 1.424S - 0.0004779L^2 - 0.0166LS \\ - 0.1547S^2 + 2.474 \times 10^{-6}L^3 - 1.251 \\ \times 10^{-5}L^2S + 0.001879LS^2 \\ R^2 = 0.97$$

که در آن، بار موتور، Sis ضخامت نمونه (mm)، MR نسبت رطوبت است، ثابت سرعت خشک شدن (min¹), زمان خشک کردن (min), a, b, ثابت خشک کردن بدون بعد و کیست ثابت خشک شدن (min¹).

۳.۲. تحلیل سیستم

مقایسه انرژی الکتریکی و انرژی بازیافت حرارت موجود در سیستم خشک کن CHP در شرایط مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. ۳ و ۴ به ترتیب. در این سیستم، به طور کلی مفید انرژی شامل انرژی الکتریکی به اضافه انرژی بازیابی حرارت از موتور اگزوز است که برای فرآیند خشک کردن استفاده می شود.

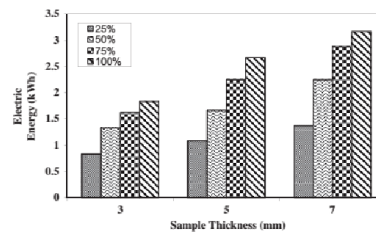


Figure 3 Electrical energy generation in the CHP dryer at different thicknesses and engine loads.

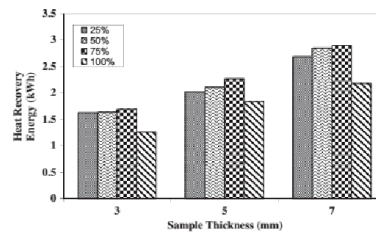


Figure 4 Heat energy recovery in the CHP dryer at different thicknesses and engine loads.

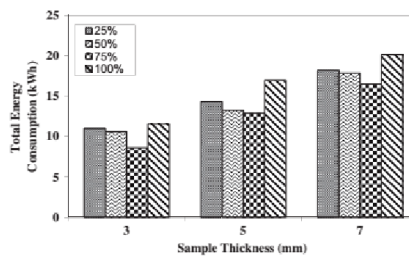


Figure 5 Total energy consumption in the CHP dryer at different thicknesses and engine loads.

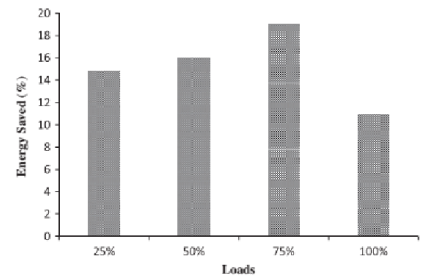


Figure 7 Energy saved at various loads of engine.

مشاهده می شود که برای تمامی بارهای موتور با افزایش ضخامت نمونه، زمان خشک شدن افزایش یافته است. بنابراین، انرژی مفید کلی (برق و گرما) افزایش یافت. انرژی الکتریکی با افزایش بار موتور افزایش می یابد، اما تغییر انرژی بازیابی حرارت کاملاً متفاوت است. برای تمام ضخامت ها، انرژی بازیابی گرما در ۷۵٪ بار موتور به دست می آید. در موتور با بار کامل دمای خشک کردن در مقایسه با بارهای دیگر بالاتر است، اما نرخ جریان جرمی گازهای خروجی به دلیل کاهش نسبت هوا به سوخت موتور برای احتراق کامل کمتر است.

شکل ۵ مقادیر انرژی مصرفی را در ضخامت ها و بارهای مختلف موتور نشان می دهد که توسط معادله ۷ به دست آمد. حداقل انرژی مورد نیاز برای فرآیند خشک کردن در بار موتور ۷۵٪ و ضخامت ۳ میلی متر به دست آمد. همچنین

حداکثر مصرف کل انرژی در ۲۵ درصد و بار کامل به دست آمد. مصرف انرژی بیشتر در ۲۵ درصد به دلیل زمان خشک شدن بیشتر است. دمای آگروز در بارهای کمتر کمتر است. در نتیجه انرژی کمتری برای مدت زمان مشابه در دسترس بود و در نتیجه زمان خشک شدن افزایش یافت. با این حال، در بارهای بالاتر زمان خشک شدن کاهش می یابد، اما حداکثر مصرف سوخت در بار کامل است. علت اصلی افزایش مصرف انرژی کاهش نسبت هوا به سوخت برای احتراق کامل در موتور بوده است. شکل ۵ مقادیر انرژی مصرفی را در ضخامت ها و بارهای مختلف موتور نشان می دهد که توسط معادله ۷ به دست آمد. حداقل انرژی مورد نیاز برای فرآیند خشک کردن در بار موتور ۷۵٪ و ضخامت ۳ میلی متر به دست آمد. همچنین حداکثر مصرف کل انرژی در ۲۵ درصد و بار کامل به دست آمد. مصرف انرژی بیشتر در ۲۵ درصد به دلیل زمان خشک شدن بیشتر است. دمای آگروز در بارهای کمتر کمتر است. در نتیجه انرژی کمتری برای مدت زمان مشابه در دسترس بود و در نتیجه زمان خشک شدن افزایش یافت. با این حال، در بارهای بالاتر زمان خشک شدن کاهش می یابد، اما حداکثر مصرف سوخت در بار کامل است. علت اصلی افزایش مصرف انرژی کاهش نسبت هوا به سوخت برای احتراق کامل در موتور بود. راندمان کلی و الکتریکی در ضخامت ها و بارهای مختلف موتور در شکل نشان داده شده است. ۶ از شکل مشاهده می شود که راندمان کل و الکتریکی با افزایش بار افزایش می یابد، اما راندمان در بار کامل کمتر از بار موتور ۷۵ درصد است. این عمدتاً به دلیل افزایش مصرف سوخت در بار کامل است. راندمان الکتریکی (GS.g) در این کار بین ۷.۶ تا ۱۸.۹ درصد است. حداکثر راندمان در ۷۵ درصد بار موتور به دست می آید. بازده انرژی بیشتر در بار موتور ۷۵ درصد به دلیل کاهش مصرف انرژی اولیه است. این نشان می دهد که استفاده از گرمای تلف شده در فرآیند خشک کردن عامل مهمی برای بهبود کارایی سیستم است. در این حالت، به دلیل استفاده همزمان از گرما و برق (CHP)، حداکثر بازده انرژی به ۳۲ درصد افزایش یافت. حداکثر بازده در بار موتور ۷۵ درصد به دست می آید.

همچنین، شکل ۷ انرژی صرفه جویی شده به دلیل استفاده همزمان از گرما و نیرو در شرایط بار مختلف را نشان می دهد. نتایج این کار نشان داد که با استفاده از روش های بازیابی گرما در آگروز این سیستم CHP افزایش ۱۱ تا ۲۰ درصدی در راندمان سیستم مشاهده شد. حداکثر بازده در بار موتور ۷۵ درصد به دست آمد.

نتایج نشان می دهد که بازده انرژی در ضخامت های مختلف نمونه ها تقریباً با یکدیگر برابر است. بنابراین، برای مقایسه انرژی خشک کردن در ضخامت ها و بارهای مختلف موتور، از پارامتر مصرف انرژی ویژه (SEC) در فرآیند خشک کردن استفاده شد.

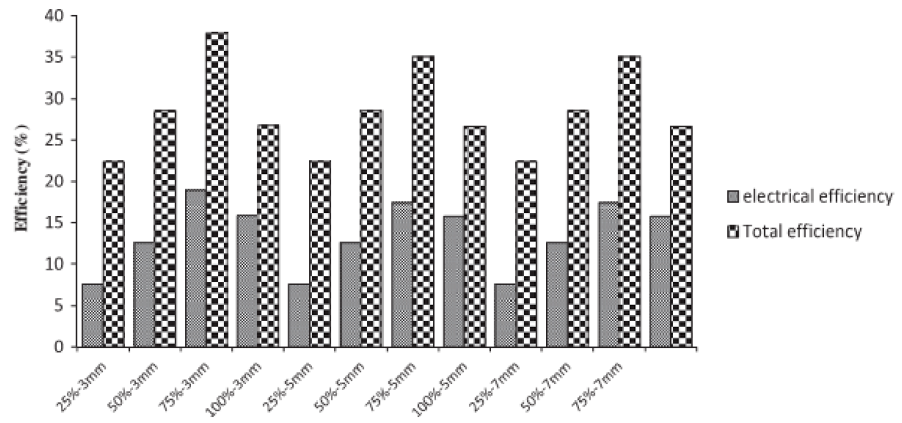


Figure 6 Total and electrical efficiency at different thickness and engine loads.

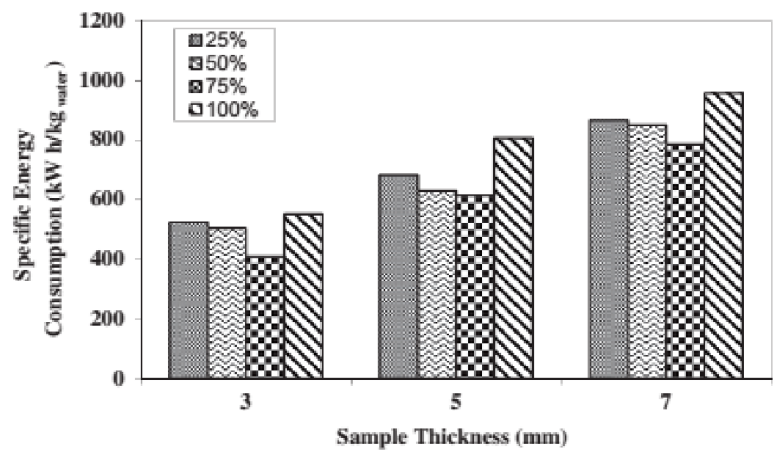


Figure 8 Specific energy consumption of drying at different thicknesses and engine loads.

صرف در شرایط مختلف فرآیند خشک کردن. مشخص شد که SEC با کاهش ضخامت نمونه کاهش می یابد. با توجه به شکل ۸، حداقل مصرف انرژی ویژه ۴۰۹ کیلووات ساعت بر کیلوگرم آب در ۷۵ درصد بار موتور و ضخامت ۳ میلی متر حصول به دست آمده در حالی که حداکثر ۹۵۷ کیلووات ساعت بر کیلوگرم آب بار کامل و ضخامت ۷ میلی متر بود. به عبارت دیگر مصرف انرژی در ضخامت ۷ میلی متر (بار کامل) نزدیک به ۲٫۳ برابر مصرف انرژی در ضخامت ۳ میلی متر (۷۵ درصد بار) بوده است. این به این دلیل است که در بار موتور ۷۵ درصد و ضخامت ۳ میلی متر، زمان خشک کردن نسبت به زمانی که خشک کردن در بارهای کم انجام می شود کاهش می یابد. بنابراین مصرف سوخت و SEC کاهش یافت. همچنین در بارهای موتور بیشتر از ۷۵ درصد (بار کامل) اگرچه زمان خشک شدن کاهش می یابد، اما میزان مصرف سوخت و در نتیجه مصرف انرژی ویژه افزایش می یابد.

۴. نتیجه گیری

در این کار تحقیقاتی، انرژی بازیابی حرارت از آگزوز موتور آی سی برای خشک کردن برش های موز استفاده شد. سینتیک خشک کردن و پارامترهای انرژی سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به نتایج، زمان خشک شدن با افزایش بار موتور و ضخامت نمونه به طور قابل توجهی کاهش یافت. حداقل و حداکثر زمان خشک شدن به ترتیب برای بارهای کامل (ضخامت ۳ میلی متر نمونه ها) و ۲۵ درصد بار (ضخامت ۷ میلی متر نمونه ها) به دست آمد. همچنین، نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه نشان داد که Midilli و همکاران. مدل خشک کردن و رفتار خشک کردن برش های موز را به بهترین شکل توصیف کرد. مطالعه حاضر اهمیت بازیابی حرارت را برای بهبود کارایی سیستم و مصرف انرژی تایید می کند. نتایج حاصل از سیستم CHP نشان داد که بازده انرژی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. با استفاده از روش های بازیابی حرارت در آگزوز سیستم CHP، افزایش ۱۱ تا ۲۰ درصدی در راندمان سیستم مشاهده شد. حداکثر بازده در بار موتور ۷۵ درصد به دست آمد. همچنین، نتایج نشان داد که مصرف انرژی ویژه (SEC) با کاهش ضخامت نمونه کاهش می یابد. SEC در محدوده ۴۰۹-۹۵۷ kWh/kgwater بود. کمترین مصرف انرژی ویژه فرآیند خشک کردن در بار موتور ۷۵ درصد و ضخامت ۳ میلی متر مشاهده شد. انتظار می رود این سیستم به کاهش مصرف سوخت و افزایش بهره وری انرژی کمک کند. بنابراین خشک کن CHP جایگزین مناسبی برای خشک کن های معمولی در کاربردهای صنعتی است.

سیاسگزارها

نویسندگان مايلند از سازمان صرفه جویی در مصرف سوخت ایران (IFCO) برای کمک هزینه تحقیقاتی ارائه شده برای تکمیل این پروژه و دانشگاه تربیت مدرس برای ارائه امکانات آزمایشگاهی تشکر کنند.

References

- Akgun, N.A., Doymaz, I., 2005. Modelling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of Food Engineering* 68 (4), 455–461
- Akpinar, E., Midilli, A., Bicer, Y., 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management* 44 (10), 1689–1705
- Alibas, I., 2007. Energy consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. *Biosystems Engineering* 96 (4), 495–502
- Backlund, E.L., Karlsson, B.G., 1988. Cogeneration versus industrial waste heat. *Heat Recovery Systems and CHP* 8 (4), 333–341
- Barbosa-Canovas, G.V., Vega-Mercado, H., 1996. *Dehydration of Foods*. Chapman and Hall, USA
- Barigozzi, G., Perdichizzi, A., Ravelli, S., 2011. Wet and dry cooling systems optimization applied to a modern waste-to-energy cogeneration heat and power plant. *Applied Energy* 88 (4), 1366–1376
- Basunia, M.A., Abe, T., 2008. Performance study of a small engine waste heated bin dryer in deep bed drying of paddy. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal Manuscript*, X
- Calban, T., Ersahan, H., 2003. Drying of a Turkish lignite in a batch fluidized bed. *Energy Sources* 25 (12), 1129–1135
- Chen, X.D., Mujumdar, A.S., 2008. *Drying Technologies in Food Processing*. Blackwell Pub, Oxford
- Chhinnan, M.S., 1984. Evaluation of selected mathematical models for

describing thin-layer drying of in-shell pecans. Transactions of the ASAE 26, 610–615

Dandamrongrak, R., Young, G., Mason, R., 2002. Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. Journal of Food Engineering 55 (2), 139–146

De Paepe, M., D'Herdt, P., Mertens, D., 2006. Micro-CHP systems for residential applications. Energy Conversion and Management 47 (19–18), 3446–3448

Dentice d'Accadia, M., Sasso, M., Sibilio, S., Vanoli, L., 2003. Microcombined heat and power in residential and light commercial applications. Applied Thermal Engineering 23 (10), 1247–1259

Dorer, V., Weber, A., 2009. Energy and CO2 emissions performance assessment of residential micro-cogeneration systems with dynamic whole-building simulation programs. Energy Conversion and Management 50 (3), 648–657

Doymaz, I., Ismail, O., 2011. Drying characteristics of sweet cherry. Food and Bioprocess Technology 89 (1), 31–38

Erdem, H.H., Sevilgen, S.H., Akkaya, A.V., Cetin, B., 2007. Emission assessment for cogeneration systems. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy 2 (3), 267–275

Eriksson, G., Kjellström, B., 2010. Assessment of combined heat and power (CHP) integrated with wood-based ethanol production. Applied Energy 87 (12), 3632–3641

Ertekin, C., Yaldiz, O., 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. Journal of Food Engineering 63

.۳۵۹-۳۴۹ ,(۳)

Fath, H.S.E., 1991. Diesel engine waste heat recovery for drying of clay minerals. Heat Recovery Systems and CHP 11 (6), 573-579

Godefroy, J., Boukhanouf, R., Riffat, S., 2007. Design, testing and mathematical modelling of a small-scale CHP and cooling system (small CHP-ejector trigeneration). Applied Thermal Engineering .۷۷-۶۸ ,۲۷

.

۲۰۰

۴۰۰

۶۰۰

۸۰۰

۱۰۰۰

۱۲۰۰

۳۵۷

Specific Energy

Consumption (kW h/kgwater

(

Sample Thickness (mm)

%۲۵

%۵۰

%۷۵

%۱۰۰

Figure 8 Specific energy consumption of drying at different thicknesses and engine loads

Potential saving in energy using combined heat and power technology for drying agricultural products (banana slices) 181

Gungor, A., Erbay, Z., Hepbasli, A., 2011. Exergetic analysis and evaluation of a new application of gas engine heat pumps (GEHPs) for food drying processes. *Applied Energy* 88 (3), 882–891

Haeseldonckx, D., Peeters, L., Helsen, L., D'haeseleer, W., 2007. The impact of thermal storage on the operational behavior of residential CHP facilities and the overall CO₂ emissions. *Renewable and Sustainable Energy* 11, 1227–1243

Holmberg, H., Ahtila, P., 2005. Optimization of the bark drying process in combined heat and power production of pulp and paper mill. In: Odilio, A.F., Eikevik, T.M., Strommen, I. (Eds.) *Proceedings of the 3rd Nordic Drying Conference*. Karlstad Sweden

Kemp, I.C., 2005. Reducing dryer energy use by process integration and pinch analysis. *Drying Technology* 23 (9–11), 2089–2104

Khattab, N.M., 1996. Optimization of the drying process in batch dryers. *Energy Sources* 18 (3), 269–281

Kopanos, G.M., Georgiadis, M.C., Pistikopoulos, E.N., 2013. Energy production planning of a network of micro combined heat and power generators. *Applied Energy* 102, 1522–1534

Koyuncu, T., Tosun, I., Pinar, Y., 2007. Drying characteristics and heat energy requirement of cornelian cherry fruits (*Cornus mas* L.) *Journal of Food Engineering* 78 (2), 735–739

Lewicki, P.P., 2006. Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology* 17, 153–163

Li, H., Chen, Q., Zhang, X., Finney, K.N., Sharifi, V.N., Swithenbank, J., 2012. Evaluation of a biomass drying process using waste

heat from process industries: A case study. *Applied Thermal Engineering* 35, 71–80

Meckler, M., Hyman, L.B., 2010. *Sustainable On-site CHP Systems Design, Construction, and Operations*. McGraw-Hill, New York

Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z., 2002. New model for single layer drying. *Drying Technology* 20 (7), 1503–1513

Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H., Kazemi, M., Mohamad Nikbakht, A., 2010. Drying of pomegranate arils: comparison of

predictions from mathematical models and neural networks. *International Journal of Food Engineering* 6 (3), 1–20

Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H., 2011. Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Conversion and Management* 52 (2), 1192–1199

Nguyen, T.D., Steinbrecht, D., 2008. Modeling a combined heat and power cogeneration system in Vietnam with a fluidized bed

combustor burning biomass agricultural engineering International the CIGR Ejournal. Manuscript EE 08 008, X

Oh, S.-D., Kim, K.-Y., Oh, S.-B., Kwak, H.-Y., 2012. Optimal operation of a 1-kW PEMFC-based CHP system for residential applications. *Applied Energy* 95, 93–101

Onovwiona, H.I., Ismet Ugursal, V., Fung, A.S., 2007. Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications. *Applied Thermal Engineering* 27 (5–6), 848

۸۶۱

Ozcan, H., Soylemez, M.S., 2006. Thermal balance of a LPG fuelled

four stroke SI engine with water addition. *Energy Conversion and Management* 47 (5), 570–581

Peacock, A.D., Newborough, M., 2005. Impact of micro-CHP systems on domestic sector CO₂ emissions. *Applied Thermal Engineering* 26, 2676–2683, 25

Schicktanz, M.D., Wapler, J., Henning, H.M., 2011. Primary energy and economic analysis of combined heating, cooling and power systems. *Energy* 36, 575–585

Sharma, G.P., Prasad, S., 2006. Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. *Energy* 31 (12), 1921–1926

Turul Oulata, R., 2004. Utilization of waste-heat recovery in textile drying. *Applied Energy* 79 (1), 41–49

Wang, C., Singh, R., 1978. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 11, 668–672

Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X., Hu, X., 2007. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering* 80, 544–536

Wu, D.W., Wang, R.Z., 2006. Combined cooling, heating and power (CCHP) a review. *Progress in Energy and Combustion Science* 32, 495–459

Yun, K.T., Cho, H., Luck, R., MAGO, P.J., 2013. Modeling of reciprocating internal combustion engines for power generation and heat recovery. *Applied Energy* 102, 327–335