Agricultural Sci. J. 42 : 3 (Suppl.) : 585-588 (2011) ว. วิทย. กษ. 42 : 3 (พิเศษ) : 585-588 (2554)

สมการชั้นบางการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

Thin layer equation of heart-leaved moonseed drying using infrared-vacuum technique

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา[1] ศักชัย จงจำ[1] และธนกร หอมจำปา[1]

Umphisak Teebooma[1], Sakchai Jongjam[1] and Tanagorn Homchampa[1]

Abstract

The objective of this research was to find out the appropriate thin layer equation for predicting the drying kinetic of Heart-leaved moonseed using infrared-vacuum technique. The Heart-leaved moonseed was dried in drying chamber set at 5, 10, 15 kPa absolute pressures and at temperatures of 40, 50, 60°C. The effect of drying conditions on its moisture ratio and drying rate were investigated. It was revealed that increase in drying temperature or decrease in absolute pressure of the drying chamber caused higher drying rate. Furthermore, the Modified Henderson and Pabis equation gave the highest coefficient of determination (R^2) and the lowest root mean square error (*RMSE*).

Keywords: Drying, Infrared, Thin layer equation, Vacuum

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งบอระเพ็ดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้ง ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า สมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด และ *RMSE* น้อยที่สุด

คำสำคัญ: การอบแห้ง อินฟราเรด สมการอบแห้งชั้นบาง สุญญากาศ

คำนำ

การอบแห้ง เป็นกระบวนการลดความชื้นเพื่อแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญ ซึ่งเทคโนโลยีการอบแห้งมีหลากหลายประเภท ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน โดยคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง การอบแห้งด้วยสุญญากาศเป็นกระบวนการลดความดันในขณะอบแห้ง เพื่อช่วยให้น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยที่อุณหภูมิต่ำ ช่วยลดพลังงานความร้อนและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Chua and Chou, 2003) เท่าที่ผ่านมามีการนำเทคนิคสุญญากาศมาประยุกต์ใช้ร่วมกับแหล่งให้ความร้อน เช่น คลื่นไมโครเวฟ (Drouzas, and Schubert, 1996) และรังสีอินฟราเรด (Glouannecc et al, 2002) โดยรังสีอินฟราเรดได้รับความนิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งนี้ เนื่องจากติดตั้งง่าย และมีความสะดวกในการใช้งาน (Mongpraneet et al, 2002) นอกจากนั้น รังสีอินฟราเรดยังสามารถแผ่ทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ทำให้ผิวภายนอกวัสดุอบแห้งไม่เหี่ยวย่น และยังคงสมบัติของผลิตภัณฑ์ไว้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่นำมาอบแห้ง (Nourhene et al, 2009) จากข้อได้เปรียบดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้นำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งให้ความร้อนในการอบแห้งร่วมกับสุญญากาศ โดยศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง และสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของบอระเพ็ด สำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งในระบบดังกล่าว

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University Warinchumrab District, Ubon Ratchathani Province, 34190

อุปกรณ์และวิธีการ

Figure 1 แสดงรายละเอียดชุดทดลอง ซึ่งประกอบด้วย ห้องอบแห้งทรงกระบอก ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ เส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร อุปกรณ์ให้ความร้อนของระบบติดอยู่ด้านบนของห้องอบแห้งโดยใช้หลอดรังสีอินฟราเรด ขนาด 500 วัตต์ ใช้หัววัดอุณหภูมิ ชนิด K และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ แหล่งความร้อนและผลิตภัณฑ์มีระยะห่างเท่ากับ 15 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ขณะอบแห้งโดยใช้โหลดเซลล์ พร้อมชุดบันทึกข้อมูล ทำภาวะสุญญากาศในห้องอบแห้งด้วยปั๊มสุญญากาศ ต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดและควบคุมความดัน

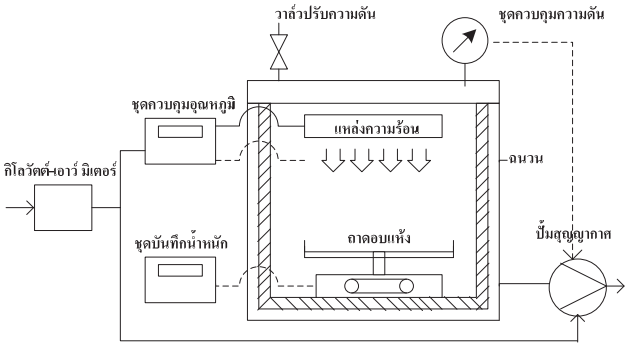

Figure 1 Experimental set-up for infrared-vacuum drying of Heart-leaved moonseed

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ศึกษาคือ บอระเพ็ด (heart-leaved moonseed) โดยคัดเลือกเฉพาะส่วนกลางเถาที่มีสีน้ำตาลอมเขียว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร นำมาล้างด้วยน้ำสะอาด และหั่นตามขวางให้มีความหนา 3 มิลลิเมตร นำมาวงเรียงบนถาดอบแห้งโดยไม่ให้ซ้อนทับกัน ทำการอบแห้งที่น้ำหนักเริ่มต้น 50 กรัม มีความชื้นเริ่มต้น 450-500 % d.b. อบจนกระทั่งน้ำหนักของบอระเพ็ดคงที่ โดยมีเงื่อนไขในการทดลอง คือ อบแห้งที่ภาวะความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสคาล อุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส และกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งความร้อนถึงผลิตภัณฑ์เท่ากับ 15 เซนติเมตร ทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนัก และอุณหภูมิอบแห้งทุกๆ 1 นาที โดยใช้ Data logger

Table 1 Thin layer drying models

Model equation	Name of model
$MR = \exp(-kt)$	Newton
$MR = \exp(-kt^{y})$	Page
$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis
$MR = a \exp(-kt)+(1-a) \exp(-kat)$	Two term exponential
$MR = \exp(-(kt)^{y})$	Modified Page I
$MR = a \exp(-kt)+(1-a) \exp(-kbt)$	Approximation of diffusion
$MR = a \exp(-k_1t)+b \exp(-k_2t)$	Two term
$MR = a \exp(-kt)+b \exp(-gt)+c \exp(-ht)$	Modified Henderson and Pabis

MR = moisture ratio; a, b, c, g, h, k_i = constant value of equation; t = drying time, minute

การศึกษาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของบอระเพ็ด ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) โดยเป็นรูปแบบของผลเฉลยอย่างง่าย ซึ่งนำเสนอไว้ใน Table 1

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของบอระเพ็ด ศึกษาในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการที่ (1)

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (1)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น ,% d.b., M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ,% d.b.

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการการอบแห้งชั้นบาง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) โดยที่ RMSE มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(MR_{predict,i} - MR_{experiment,i} \right)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งบอระเพ็ด ดำเนินการโดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบางที่สรุปไว้ใน Table 1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง และความดัน ดังนั้น a, b, c, g, h, k, k_1, k_2 n, หรือ y ซึ่งเดิมเป็นเพียงค่าคงที่ จึงถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้ง และความดัน โดยเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K = x_o + x_1 T + x_2 P + x_3 TP \quad (3)$$

เมื่อ K คือ a, b, c, g, h, k, k_1, k_2 หรือ y
T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)
P คือ ความดันสัมบูรณ์ (กิโลปาสคาล)
x_i คือ ค่าคงที่ของสมการที่ (3)

Table 2 แสดงค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง, R^2 และ RMSE จากการวิเคราะห์สมการทั้ง 8 สมการ พบว่าสมการ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99827) มากที่สุด และค่า RMSE (0.0120) น้อยที่สุด

นอกจากนั้น ผลจากการทดลองยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือการลดความดันภายในห้องอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างอากาศกับผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น หรือสามารถกล่าวได้ว่าผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นน้ำในผลิตภัณฑ์จึงเกิดการระเหยมากขึ้น และในขณะเดียวกัน หากลดความดันภายในห้องอบแห้ง ก็จะทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถเกิดการระเหยได้ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่ากรณีไม่มีการลดความดันหรือที่ความดันบรรยากาศ

Table 2 Values of model constants and statistical parameters

Model	Parameter	x_0	x_1	x_2	x_3	R^2	RMSE
Newton	k	-0.04779	0.00190	0.00026	-2.7E-05	0.98103	0.0396
Page	k	-0.01530	0.00068	-0.00035	-1.0E-06	0.99651	0.0170
	y	0.98935	0.00591	0.01027	-0.00026		
Henderson and Pabis	a	0.95919	0.00320	-0.00365	6.9E-05	0.99170	0.0262
	k	-0.05995	0.00226	0.00046	-3.4E-05		
Two term exponential	a	0.00030	-2.2E-06	1.2E-06	9.9E-08	0.98051	0.0402
	k	-310.281	10.7573	10.1215	-0.36627		
Modified Page I	k	-0.15277	0.00711	-0.01317	0.00026	0.98125	0.0394
	y	0.18694	0.00085	0.00180	-0.00014		
Approximation of diffusion	a	11.1601	-0.37763	-1.28507	0.02531	0.99674	0.0164
	b	0.78621	0.00260	0.01265	-0.00025		
	k	-0.10758	0.00391	0.00082	-5.6E-05		
Two term	a	61.0337	-1.89933	-7.80685	0.28436	0.99548	0.0194
	b	-60.1717	1.90576	7.82014	-0.28483		
	k1	-0.00118	0.00090	-0.01025	0.00021		
	k2	-0.00285	0.00094	-0.01030	0.00021		
Modified Henderson and Pabis	a	-0.36958	-0.13464	-1.99079	0.04687	0.99827	0.0120
	b	9.25149	0.01369	-0.03031	-0.00730		
	c	-8.16095	0.12755	2.03268	-0.03978		
	g	0.00930	0.00082	0.00240	-8.3E-05		
	h	0.02047	0.00105	0.00818	-0.00022		
	k	0.00152	0.00091	0.00807	-0.00019		

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิอบแห้งและภาวะความดันสุญญากาศมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งบอระเพ็ด โดยเมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นพบว่า สมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99827) มากที่สุด และค่า RMSE (0.0120) น้อยที่สุด

เอกสารอ้างอิง

Chua, K. J. and S.K. Chou. 2003. Low-cost drying methods for developing countries. Trends in Food Science & Technology 14: 519-528.

Drouzas, A.E. and H. Schubert. 1996. Microwave Application in Vacuum Drying of Fruits. Journal of Food Engineering 28: 203-209.

Glouannec, P., D. Lecharpentier, and H. Noel. 2002. Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material. Applied Thermal Engineering 22: 1689–1703.

Mongpraneet, S., T. Abe and T. Tsurusaki. 2002. Accelerated drying of welsh onion by far infrared under vacuum condition. Journal of Food Engineering 55: 147-156.

Nourhene, B., B. Neila, B.S. Imen and K. Nabil. 2009. Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves. Industrial Crops and Products 29: 412-419.