

ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข่า

Equilibrium Moisture Isotherm of Galanga

มารีนา มะหนิ^{1*} อรรวี เกียรติไพศาลโสภณ² และอุษาวดี ตันติวรานุรักษ์³
Marina Mani^{1*}, Onravee Kiatpaisansophon² and Usavadee Tuntiwaranuruk³

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข่าที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยวิธีสถิต ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0.1- 0.9 ในการหาค่าความชื้นสมดุลไอโซเทอม และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล 4 แบบ คือ Halsey (1948), Hendeson (1952), Chung and Pfof (1967) และ Modified Oswin (2004) มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าความชื้นสมดุลไอโซเทอมจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเดียวกัน ส่วนที่อุณหภูมิเดียวกัน ความชื้นสมดุลไอโซเทอมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung and Pfof (1967) ตามความสัมพันธ์ คือ $M_{eq} = \frac{1}{B} \ln A - \frac{1}{B} \ln [-R(T) \ln RH]$ ให้ค่าในการทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 เฉลี่ยเท่ากับ 0.994 ค่า SEE เฉลี่ยเท่ากับ 0.062 และค่า RMSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.053

คำสำคัญ: ความชื้นสมดุลไอโซเทอม ข่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

Abstract

The objective of this research was to study the equilibrium moisture isotherm of Galanga. The equilibrium moisture isotherm was obtained by static method at temperature of 40 50 60 and 70°C over a range of relative humidity from 0.1 to 0.9. The static method was to investigate the equilibrium moisture isotherm of Galanga and 4 of mathematical models equilibrium moisture content were used; Halsey (1948), Henderson (1952), Chung and Pfof (1967) and Modified Oswin (2004), that comparison the results of the experiments. The results found that equilibrium moisture isotherm were decreased, when temperature was increased at constant relative humidity, in contrast, at the same temperature the equilibrium moisture isotherm was increased, when increased relative humidity, and Chung and Pfof (1967) model the relation of $M_{eq} = \frac{1}{B} \ln A - \frac{1}{B} \ln [-R(T) \ln RH]$ was found to be the most stable prediction of the equilibrium moisture isotherm values. The values of average R^2 of 0.994, average SEE of 0.062 and average RMSE of 0.053.

Keywords: Equilibrium Moisture Isotherm, Galanga, Mathematical Models of Equilibrium Moisture Content

¹ ผศ., สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ สงขลา 90000

² นิสิตปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ สงขลา 90000

³ ผศ.ดร., ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

*Corresponding author: e-mail: marina@tsu.ac.th Tel. 0862987700

บทนำ

ข้ามีชื่อสามัญว่า Galanga ชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Alpinia galanga* (L.) Willd. และมีชื่อวงศ์ คือ Zingiberaceae และมีชื่ออื่น ๆ เช่น ข้าหยวก ข้าหลวง (ภาคเหนือ) กุฏกกโรหิณี (ภาคกลาง) เป็นต้น ข้าสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยมีการใช้ข้าสดในการประกอบอาหาร แต่งกลิ่นอาหาร และดับกลิ่นคาวของเนื้อสัตว์ ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องแกงหลายชนิด นอกจากนั้นยังเป็นสมุนไพร มีสรรพคุณทางยา ช่วยแก้อาการต่าง ๆ เช่น รักษาลมพิษ รักษาท้องขึ้น ท้องอืด ท้องเฟ้อและรักษาโรคผิวหนัง เป็นต้น

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาความชื้นสมดุลไอโซเทอม (equilibrium moisture isotherm) [1] ที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้า ซึ่งความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุล และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า ความชื้นสมดุลไอโซเทอม (equilibrium moisture isotherm) [2] ในปัจจุบันได้มีการหาค่าความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น ได้มีการหาความชื้นสมดุลของใบมะกรูด [3] การศึกษาหาความชื้นสมดุลของเห็ดขอนขาว [4] และการศึกษาหาความชื้นสมดุลของใบหม่อน [5] ซึ่งวิธีที่ยอมรับโดยทั่วไป คือ วิธีสถิต (static method) [6] ดังนั้นสำหรับวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ คือ การศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความชื้นสมดุลของข้า ที่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่าง ๆ กัน โดยวิธีสถิต เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลและนำไปใช้ในกระบวนการอบแห้งต่อไป

วิธีการวิจัย

การหาความชื้นสมดุล

การหาความชื้นสมดุลของวัสดุหลักการ คือ ปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศจนความชื้นของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การหาความชื้นสมดุลนี้จะใช้วิธีสถิต ซึ่งเป็นวิธีการที่ปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศในขณะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยทำการทดลองในภาชนะปิดที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ ซึ่งใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ส่วนอุณหภูมิของอากาศจะถูกควบคุมด้วยตู้อบ

ข้าที่ใช้ในการศึกษานั้นมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 500 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ซึ่งค่าความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองทำการหาโดยการอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [7]

นำข้าสดมาหั่นเป็นชิ้นบาง ๆ ขนาด $5 \times 5 \times 2$ มิลลิเมตร แล้วนำไปวางบนตะแกรงภายในขวดแก้วปิดสนิทซึ่งบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด คือ LiCl , MgCl_2 , NaCl , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ และ KNO_3 ชนิดละ 3 ขวด ซึ่งจะให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 นำขวดแก้วเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ และระหว่างการทดลองตัวอย่างของชิ้นข้าจะถูกนำออกมาชั่งทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงนำชิ้นข้าไปหาค่าความชื้นด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง นำข้อมูลค่าความชื้นสมดุลที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาวิเคราะห์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล 4 แบบ [8] คือ

ตารางที่ 1 ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของสารละลายเกลืออิมิตัว [9]

Temperature (°C)	Relative humidity (decimal)				
	LiCl	MgCl ₂ .6H ₂ O	Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	NaCl	KNO ₃
40	0.1121	0.3160	0.4842	0.7468	0.8903
50	0.1110	0.3054	0.4630	0.7443	0.8478
60	0.1095	0.2926	0.4544	0.7450	0.8478
70	0.1080	0.2770	0.3940	0.8478	0.8478

สมการของ Chung & Pfoest (1967) [10] :

$$M_{eq} = \frac{1}{B} \ln A - \frac{1}{B} \ln [-R(T) \ln RH] \quad (1)$$

สมการของ Henderson (1952) [11] :

$$\ln \left[-\frac{1}{(T)} \ln(1 - RH) \right] = \ln A + B \ln M_{eq} \quad (2)$$

สมการของ Halsey (1948) [12] :

$$M_{eq} = \left[\frac{-A}{T \ln(RH)} \right]^{1/B} \quad (3)$$

สมการของ Modified Oswin (2004) [13] :

$$M_{eq} = (A + BT) \left[\frac{RH}{1 - RH} \right]^{1/C} \quad (4)$$

เมื่อ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (%db.), RH คือความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (เศษส่วน), T คืออุณหภูมิ (K), R คือ ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 kJ/kg.K และ A, B, C คือ ค่าคงที่ของสมการ

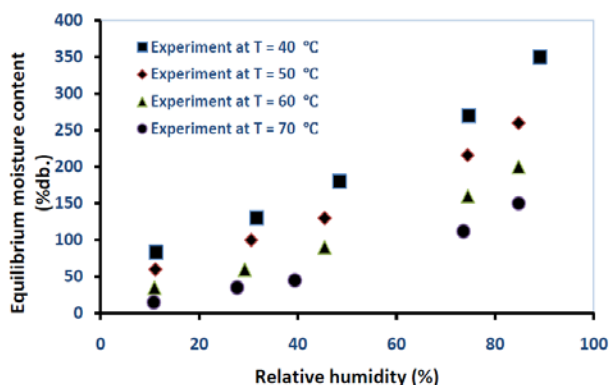
การหาค่าคงที่ของสมการที่ (1) - (3) ได้จากการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ส่วนสมการที่ (4) ใช้วิธี nonlinear regression ทำการเปรียบเทียบสมการต่างๆ โดยใช้ค่า coefficient of determination (R^2) ค่า standard error of estimation (SEE) และค่า root mean square error (RMSE) สมการที่มีค่า R^2 สูงที่สุด และค่า SEE กับค่า RMSE ต่ำที่สุด ถือว่าเป็นสมการที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

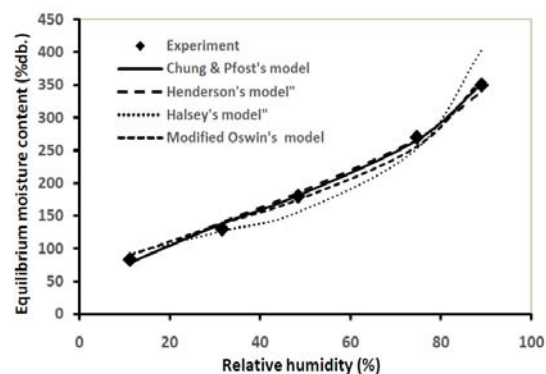
ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของข้าวที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 0.1 ถึง 0.9 แสดงดังภาพที่ 1 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีลักษณะเป็น รูปตัวซิกมอยด์ (sigmoid shape) ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เช่น ถั่วเหลืองและพริก [8] เป็นต้น และพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับ

กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำจะทำให้ความชื้นสมดุลของข้าต่ำ และถ้าค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงจะทำให้ความชื้นสมดุลของข้าสูงด้วย ทำให้การถ่ายเทความชื้นระหว่างข้ากับอากาศแวดล้อมได้น้อยกว่าที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมต่ำกว่า เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความชื้นสมดุลของข้า จะพบว่าที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความชื้นสมดุลของข้าจะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการกระเด็นที่สูงขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการลดลงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ

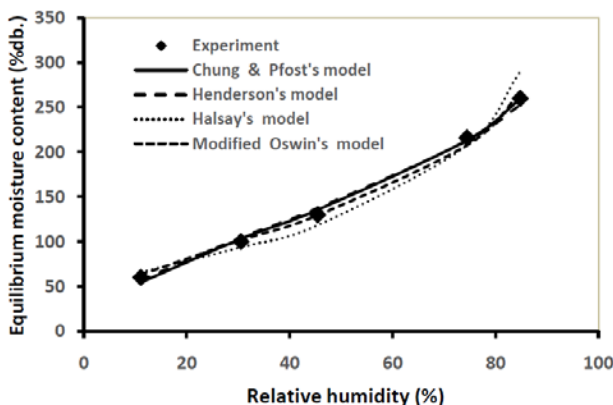
เมื่อทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล 4 แบบกับผลที่ได้จากการทดลองในแต่ละอุณหภูมิ แสดงดังภาพที่ 2 - 5 และค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลทั้ง 4 แบบ แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Chung and Pfof (1967) มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุด โดยมีค่า coefficient of determination (R^2) สูงที่สุด และมีค่า standard error of estimation (SEE) และค่า root mean square error (RMSE) ต่ำ ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของข้าที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่าง ๆ ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Chung and Pfof (1967) ในแต่ละอุณหภูมิ แสดงดังภาพที่ 6



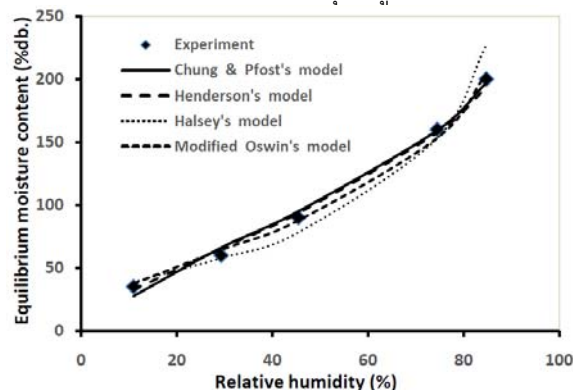
ภาพที่ 1 ความชื้นสมดุลของข้า



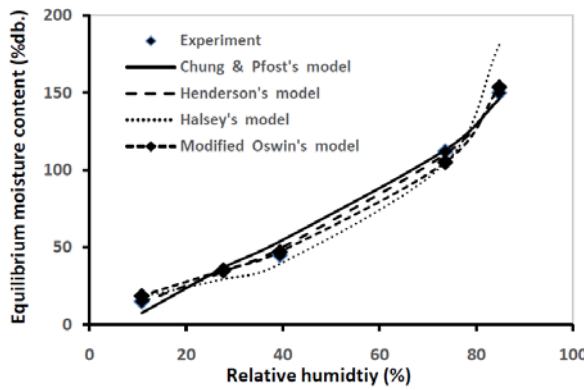
ภาพที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล
กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C



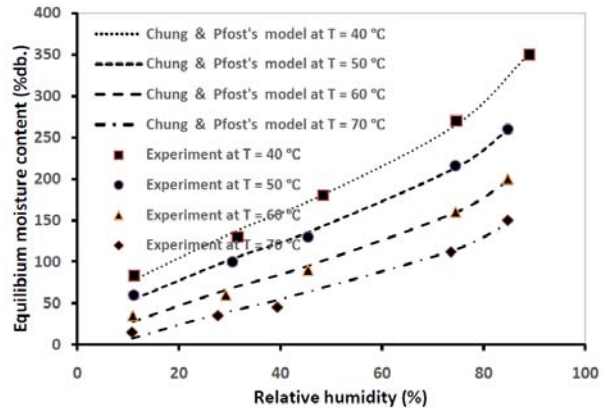
ภาพที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล
กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C



ภาพที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล
กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C



ภาพที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล
กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C



ภาพที่ 6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล
ของ Chung and Pfof (1967) กับผลการทดลอง

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

Equation	Parameter	Temperature			
		T = 40 °C	T = 50 °C	T = 60 °C	T = 70 °C
Chung & pfof (1967)	A	13,197.222	1,1792.340	9,334.287	7,305.510
	B	0.010	0.012	0.015	0.018
	R ²	0.998	0.997	0.994	0.988
	SEE	0.060	0.051	0.064	0.071
	RMSE	0.052	0.044	0.055	0.062
Henderson (1952)	A	6.462×10^{-7}	1.973×10^{-7}	1.521×10^{-6}	1.323×10^{-5}
	B	1.990	1.861	1.562	1.211
	R ²	0.996	0.996	0.997	0.998
	SEE	0.082	0.061	0.045	0.026
	RMSE	0.082	0.062	0.049	0.028

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล (ต่อ)

Equation	Parameter	Temperature			
		T = 40 °C	T = 50 °C	T = 60 °C	T = 70 °C
Halsey (1948)	A	5,422,134	1,067,681	154,817	20,185
	B	1.985	1.747	1.463	1.130
	R ²	0.959	0.974	0.972	0.966
	SEE	0.265	0.153	0.132	0.120
	RMSE	0.289	0.169	0.154	0.165
Modified Oswin (2004)	A	-303.933	-165.999	-359.452	-3.037
	B	1.541	0.943	1.365	0.183
	C	0.332	0.377	0.445	0.549
	R ²	0.992	0.996	0.995	0.994
	SEE	0.114	0.060	0.054	0.050
	RMSE	0.100	0.052	0.048	0.044

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล (ต่อ)

สรุปผลการวิจัย

การหาค่าความชื้นสมดุลของข้าวมะลิที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 °C ได้ค่าความชื้นสมดุลที่แตกต่างกัน ส่วนที่อุณหภูมิเดียวกันความชื้นสมดุลของข้าวมะลิจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้น และจากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลไอโซเทอมรูปแบบต่าง ๆ กับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Chung and Pfoest (1967) สามารถทำนายความชื้นสมดุลของข้าวมะลิได้ดีที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] เทวรัตน์ ธิพิย์วิมล และสมยศ เชิญอักษร. (2552). “ความชื้นสมดุลและจลนศาสตร์การอบแห้งไพล”, ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10 ประจำปี 2552. วันที่ 1-3 เมษายน 2552 ณ สุรสมมณาคาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา.
- [2] Shivhare, U.S., Arora, S., Ahmed., J. and Raghavan., G.S.V. (2004). Moisture sorption isotherms for mushroom. *Lebensm – Wiss. U.-Technol.* 37, 133-137.
- [3] วิชญวดี ศรีนุเคราะห์ สิงหนาท พวงจันทร์ และบวรศักดิ์ สีนานนท์. (2550). “การทำแห้งใบมะกรูดโดยเครื่องทำแห้งแบบถาดและเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบลม”, *ว. วิทย์. กษ.* 38 : 5 (พิเศษ). 305-308 (2550).

- [4] ณัฐพล ภูมิสะอาด และละมุน วิเศษ. (2550). “สมการอบแห้งชั้นบางและความชื้นสมดุลของเห็ดขอนขาว”, **ว. วิทย. กษ. 38 : 5 (พิเศษ)**. 361-364 (2550).
- [5] ณัฐพล ภูมิสะอาด ธนากร บุรณเพชร และเจริญพร เลิศสถิตย์ธนากร. (2546). “สมการจลนศาสตร์การอบแห้งใบหม่อน”, ใน **การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17**, วันที่ 15-17 ตุลาคม 2546 ณ จังหวัดปราจีนบุรี.
- [6] Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. (1981). **Drying cereal grains**. The AVI Publ. Co. Inc. Westport. Connecticut. USA. 265.
- [7] AOAC. (1990). Official Methods of Analysis (15th ed.). **Association of Official Analytical Chemists**. Washington. DC.
- [8] Aviara, N.A., Ajabola, O.O. and Oni, S.A. (2004). “Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean”, **Biosystems Engineering**. 87(2), 179-190.
- [9] Vulllioud, M., Carlos, A. Marquez and Antonio De Michelis. (2004). “Desorption isotherms for sweet and sour cherry”, **Journal of Food Engineering**. 63, 15-19.
- [10] Chung, D.S. and Pfoest, H.B. (1967). “Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products”, **Trans. of ASAE**. 10(4), 552-555.
- [11] Henderson, S.M. (1952). “A basic concept of equilibrium moisture”, **Agricultural Eng.** 33(1), 29-32.
- [12] Halsey, G. (1948). “Physical adsorption on non-uniform surface”, **J. of Chem. Phys.** 16, 83-92.
- [13] Menkov, N.D., Dinkov, K., Durakova, A. and Toshkov, N. (2009). “Sorption characteristics of buckwheat grain”, **Bulgarian. Journal of Agricultural Science**. 15(4), 281-285.