

ความชื้นสมดุลและจลศาสตร์การอบแห้งของไพล Equilibrium Moisture Content and Drying Kinetics of Phlai (*Zingiber cassumunar Roxb.*)

เทวรัตน์ ทิพย์วิมล¹ และ สมยศ เชิญอักษร²
Tawarat Tipyavimol¹ and Somyot Chirnaksorn²

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาความชื้นสมดุลและจลศาสตร์การอบแห้งของไพล ความชื้นสมดุลของไพลหาได้โดยวิธีสถิตที่อุณหภูมิ 35 40 และ 50 °C ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0.06 ถึง 0.85 ส่วนการอบแห้งแบบชั้นบาง ทำการทดลองอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้ง 40 และ 50 °C อัตราการไหลของอากาศ 0.621 m³/s ผลจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชื้นสมดุลของไพลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงขึ้นและแบบจำลอง Modified GAB ให้ค่าในการทำนายผลการทดลองความชื้นสมดุลได้ดีที่สุด สำหรับจลศาสตร์การอบแห้งของไพลพบว่า อัตราการอบแห้งของไพลอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงและ สมการของ Page สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งไพลแบบชั้นบางได้ดี

คำสำคัญ: ความชื้นสมดุล จลศาสตร์การอบแห้ง ไพล

ABSTRACT

The objective of this research was to study the equilibrium moisture content and drying kinetics of Phlai (*Zingiber cassumunar Roxb.*). The equilibrium moisture content were obtained by static method at temperatures of 35 40 and 50 °C over a range of relative humidity from 0.06 to 0.85. Thin layer of Phlai were dried in a heat pump dryer at temperatures of 40 and 50 °C and air flow rate of 0.621 m³/s. The result found that equilibrium moisture content was increased with increasing in relative humidity at constant temperature. The modified GAB model was found to be the most suitable prediction of the equilibrium moisture content values. Drying rates indicated that the drying of Phlai took place under the falling rate period and the drying behaviour was well described by Page's equation.

Keywords: Equilibrium moisture content Drying kinetics Phlai

บทนำ

ไพล (*Zingiber cassumunar Roxb.*) เป็นพืชสมุนไพรชนิดหนึ่งซึ่งเป็นไม้ล้มลุกอยู่ในแฟมมิลี่เดียวกับขิง (วันดี, 2537) เนื้อในหัวเหง้าไพลจะมีสีเหลือง มีกลิ่นเฉพาะตัว มีสรรพคุณเป็นยาบรรเทาอาการปวด มีฤทธิ์แก้ปวด ขับลม แก้อาการท้องอืด แก้ปวดเมื่อยโดยสารที่ออกฤทธิ์ยับยั้งอาการอักเสบ ลดการบวมคือ (E)-1-(3,4-dimethoxyphenyl) butadiene หรือเรียกว่าสาร D (สุนทร, 2536) ทางสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยได้ทำการพัฒนาครีมน้ำมันไพลชื่อว่าไพลจีซาล

เพื่อใช้บรรเทาอาการปวดบวม อักเสบของกล้ามเนื้อ เคล็ดขัดยอก ฟกช้ำ ซึ่งพบว่าใช้ได้ผลดีและกำลังพัฒนาเป็นอุตสาหกรรมเพื่อการพึ่งพาตนเอง (กระทรวงสาธารณสุข, 2533) การใช้ประโยชน์จากไพลสามารถใช้เป็นทั้งยาภายในและภายนอกและใช้ได้ทั้งในลักษณะไพลสดและไพลแห้ง โดยไพลสดสามารถนำมาตำแล้วพอกเพื่อบรรเทาอาการบริเวณที่มีอาการ ปวด บวม เคล็ดขัดยอก นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการนำผงไพลและน้ำมันไพลไปใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอางหลายชนิด เช่น แชมพู สบู่ โลชั่นบำรุงผิว เป็นต้น

¹ Lecturer, School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

² Associated professor, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Kamphaengsaen, Nakhonpathom, 73140

การอบแห้งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการถนอมอาหารและเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างแพร่หลาย การอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของวัสดุเกษตรนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้ง โดยสมการที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของวัสดุเกษตรนั้นจะอยู่ในรูปของสมการที่เรียกว่า logarithmic model หรือที่เรียกกันว่าเป็นสมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) ซึ่งเป็นรูปแบบผลเฉลยอย่างง่ายของ สมการการแพร่กระจายของ Frick (Sogi et al., 2003) ซึ่งมีรูปแบบสมการคือ

$$M_R = \frac{(M - M_e)}{(M_0 - M_e)} = \exp(-kt) \quad (1)$$

เมื่อ M_R คือ อัตราส่วนความชื้น (ไม่มีหน่วย), M คือ ค่าความชื้นของวัสดุ (%db), M_e คือ ความชื้นสมดุล (%db), M_0 คือ ค่าความชื้นเริ่มต้น (%db), k คือ ค่า drying rate constant (h^{-1}), t คือ เวลาในการอบแห้ง (h)

ถึงแม้ว่า logarithmic model ในสมการ (1) นั้นจะสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของวัสดุเกษตรได้หลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามพบว่า พฤติกรรมของการอบแห้งของวัสดุเกษตรอีกหลายชนิดที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการนี้ แต่สามารถอธิบายได้ดีโดยใช้ Page's model (Tan et al., 2001; Kaleemullah and Kailappan, 2006)

$$M_R = \exp(-kt^n) \quad (2)$$

เมื่อ n คือ เลขยกกำลัง (ไม่มีหน่วย)

จากสมการ (1) และ (2) จะพบว่าค่าความชื้นสมดุลเป็นตัวแปรที่สำคัญในการสร้างสมการจลนศาสตร์การอบแห้ง การหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุสามารถหาได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้การหาค่าความชื้นสมดุลด้วยวิธีสถิต ทั้งนี้เนื่องจากให้ค่า sorption isotherms ที่สมบูรณ์ (Aviara et al., 2004) สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือหาค่าความชื้นสมดุลและสร้างสมการจลนศาสตร์การอบแห้งของไพลเพื่อใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งของไพล

อุปกรณ์และวิธีการ

ไพล

ไพลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นไพลสดจากเกษตรกรในอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ไพลสดที่ได้นำมาแบ่งออกเป็นสองชุด ชุดแรกทำการหาค่าความชื้นสมดุล ส่วนไพลอีกชุดหนึ่งนำไปทำการทดลองอบแห้งแบบ

ชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อน ค่าความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองหาโดยการอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

การหาความชื้นสมดุล

นำไพลสดมาหั่นเป็นเป็นชิ้นบางๆ ขนาด $5 \times 5 \times 2$ มิลลิเมตร แล้วนำไปวางบนตะแกรงภายในขวดแก้วปิดสนิทซึ่งบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว 6 ชนิดคือ KOH, MgCl_2 , K_2CO_3 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, NaCl และ KCl ซึ่งจะหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 นำขวดแก้วเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 35, 40 และ 50°C ตามลำดับ และระหว่างการทดลองตัวอย่างชิ้นไพลจะถูกนำออกมาชั่งทุกๆ 48 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักของชิ้นไพลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงนำชิ้นไพลไปหาค่าความชื้นด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง นำข้อมูลค่าความชื้นสมดุลที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 5 แบบ (Aviara et al., 2004) คือ

Modified Henderson :

$$M_e = \left[\frac{-\ln(1-rh)}{A(T+B)} \right]^{1/C} \quad (3)$$

Modified Chung-Pfost :

$$M_e = \frac{-1}{C} \ln \left[-\frac{(T+B)}{A} \ln(rh) \right] \quad (4)$$

Modified Halsey :

$$M_e = \left[\frac{-\ln(rh)}{\exp(A+BT)} \right]^{-1/C} \quad (5)$$

Modified Oswin :

$$M_e = (A+BT) \left[\frac{rh}{1-rh} \right]^{1/C} \quad (6)$$

Modified GAB :

$$M_e = \frac{AB \left(\frac{C}{T} \right) rh}{(1-B(rh)) \left(1-B(rh) + \left(\frac{C}{T} \right) B(rh) \right)} \quad (7)$$

เมื่อ M_c คือความชื้น (%db), rh คือความชื้นสัมพัทธ์ (เศษส่วน), T คืออุณหภูมิ ($^{\circ}K$) และ A, B, C คือค่าคงที่ของสมการ

การหาค่าคงที่ A, B และ C ในแต่ละสมการนั้นทำโดยใช้ nonlinear regression ของโปรแกรม SPSS 11.5 for window โดยการเลือกใช้รูปแบบสมการใดนั้นจะประเมินโดยดูจากค่า R^2 และค่า Standard Error of Estimate (SEE) (Menkov, 2000 ; Lahsasni et al., 2004; Kaleemullah and Kailappan, 2004) ซึ่งหาได้จาก

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{e(\text{exp})} - M_{e(\text{pre})})^2}{df}} \quad (8)$$

เมื่อ $M_{e(\text{exp})}$ คือค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลอง, $M_{e(\text{pre})}$ คือค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากแบบจำลอง, N คือจำนวนข้อมูล และ df คือ degree of freedom of regression model

ตารางที่ 1 ความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัว

Temperature ($^{\circ}C$)	Relative humidity (decimal)					
	KOH	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	Mg(NO ₃) ₂	NaCl	KCl
30	0.0738	0.3238	0.4317	0.558	0.7540	0.8362
35	0.0682	0.3199	0.4274	0.5240	0.7495	0.8297
40	0.0626	0.3159	0.4230	0.4900	0.7450	0.8232
50	0.0572	0.3054	0.4091	0.4300	0.7490	0.8120

ที่มา: Vulllioud et al., 2004 and Lasani et al. 2004

สมการการอบแห้งชั้นบาง

นำโพลีสไตรีนเป็นชั้นบางๆ จำนวน 20 kg จัดเรียงบนถาดอบแห้งแบบชั้นบาง นำเข้าอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 50 $^{\circ}C$ อัตราการไหลของอากาศ 0.621 m³/s เหตุผลที่เลือกทำการทดลองอบแห้งโพลีด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเนื่องจากเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้คงที่ตลอดการทดลอง ในระหว่างการทดลองทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิการอบแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้งทุกๆ 10 นาที และชั่งน้ำหนักโพลีทุก ๆ 3 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักของโพลีแต่ละถาดเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 10 g จึงหยุดการทดลอง นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ในสมการการอบแห้งของ Page โดยใช้ค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากแบบจำลองที่ดีที่สุดจากแบบจำลอง 5 แบบข้างต้น

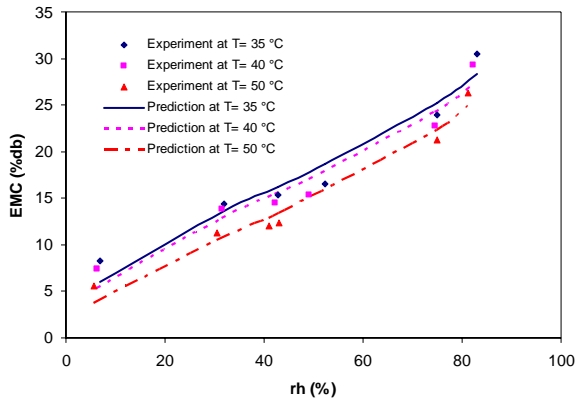
ผลการทดลองและวิจารณ์

แบบจำลองความชื้นสมดุล

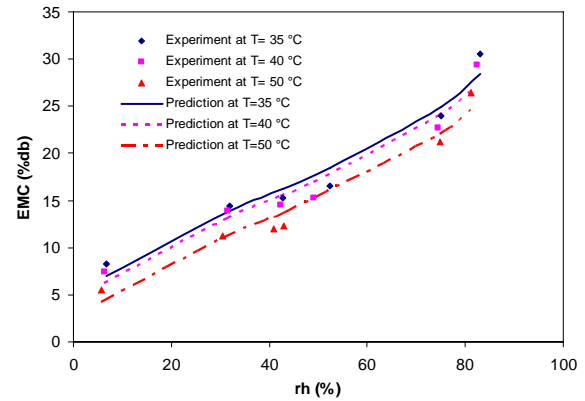
ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของโพลีที่อุณหภูมิ 35, 40, และ 50 $^{\circ}C$ พบว่าเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมา plot หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าความชื้นสัมพัทธ์พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็น

sigmoid shape (ภาพที่ 1) เช่นเดียวกับวัสดุเกษตรอื่นๆ เช่น มันเทศ (Chen, 2002) ถั่วเหลือง (Aviara et al., 2004) และพริก (Kaleemulah and Kilappan, 2004) เป็นต้น เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นสมดุลของโพลีพบว่าที่ระดับความชื้นเดียวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความชื้นสมดุลของโพลีจะมีค่าลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศนั้นพบว่าค่าความชื้นสมดุลของโพลีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 1)

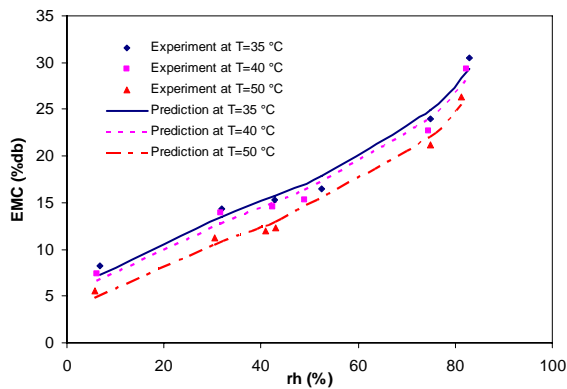
เมื่อทำการวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมกับค่าความชื้นสมดุลของโพลีโดยวิธีการ non linear regression ด้วยโปรแกรม SPSS สำหรับ window เวอร์ชัน 11.5 ได้ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะพบว่าแบบจำลอง Modified Halsey และ Modified GAB นั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 และมีค่า standard error of estimate ต่ำกว่าอีก 3 แบบจำลอง แต่เนื่องจากแบบจำลอง Modified Halsey มีรูปแบบสมการเป็นฟังก์ชัน exponential ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า พารามิเตอร์เพียงเล็กน้อยก็จะส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์อย่างมากในขั้นแบบจำลอง Modified GAB จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของโพลีมากที่สุด



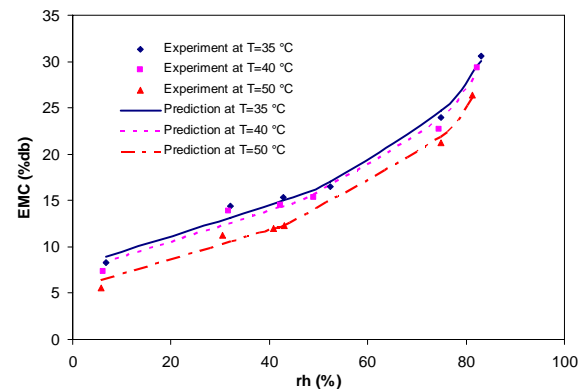
a) Modified Henderson's model



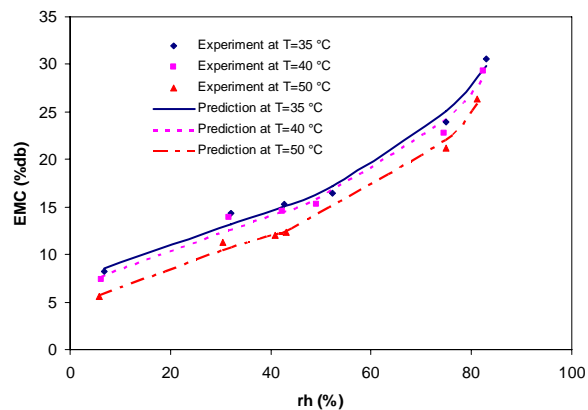
b) Modified Chung-Pfost's model



c) Modified Oswin's model



d) Modified Halsey's model



e) Modified GAB's model

ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ (rh) กับ ความชื้นสมดุล (EMC) ของไฟลที่อุณหภูมิต่างๆ

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ในแบบจำลองต่างๆ จะเป็นค่าคงที่ของแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดลอง ดังนั้นเพื่อให้ใช้แบบจำลองได้ทุกๆ ช่วงอุณหภูมิในช่วงของการทดลอง จึงได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่เหล่านี้กับอุณหภูมิโดยการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม โดยในที่นี้เลือกวิเคราะห์เฉพาะค่าที่ได้จากสมการ Modified GAB ซึ่งได้ผลดังนี้

$$A = 0.1304T - 14.956, \quad R^2 = 0.971$$

$$\text{เมื่อ } 35 \leq T \leq 50 \quad ^\circ\text{C}$$

$$B = 1.256T - 92.422, \quad R^2 = 0.977$$

$$\text{เมื่อ } 35 \leq T \leq 50 \quad ^\circ\text{C}$$

$$C = 1.2666T + 268.69, \quad R^2 = 0.999$$

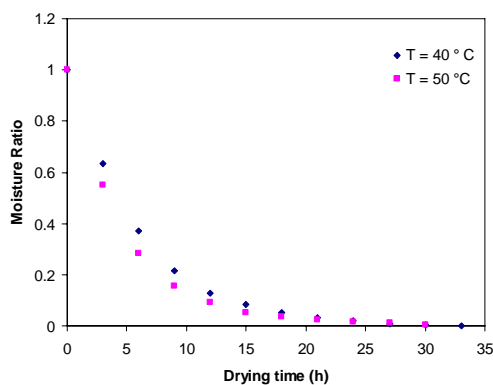
$$\text{เมื่อ } 35 \leq T \leq 50 \quad ^\circ\text{C}$$

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ในแบบจำลองความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ

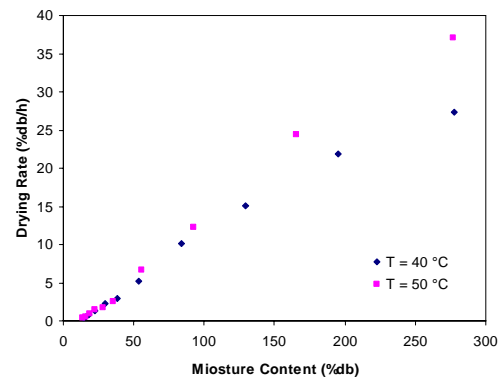
Parameter		Estimated value				
		Modified Henderson	Modified Chung-Pfost	Modified Halsey	Modified Oswin	Modified GAB
35 °C	A	-0.000046074	520.012	-223877.593	4.9997	-10.2615928
	B	-345.495487	-226.998	726.54	0.0399	-49.74557728
	C	2.073744966	0.1244	2.1875	3.001	313.0783108
	SEE	1.871	1.544	0.771	1.125	0.879
	R ²	0.9467	0.9602	0.9903	0.9802	0.9876
40 °C	A	-0.000081131	1359.870207	612917.8464	5.002087631	-9.935485204
	B	-338.8844583	-91.84832132	-1957.248405	0.03713975	-40.71681023
	C	2.034484323	0.12677402	2.126078708	2.933650605	319.2679779
	SEE	1.778	1.517	0.907	1.123	0.959
	R ²	0.9494	0.9598	0.9859	0.9793	0.9845
50 °C	A	-0.000080027	790.8690247	185606.6612	4.998871734	-8.370723409
	B	-394.109991	-162.1161028	-574.3528836	0.029220769	-30.42534599
	C	1.769074878	0.128709567	1.870256327	2.575543926	332.0481373
	SEE	1.374	1.354	0.678	0.808	0.615
	R ²	0.9691	0.9671	0.9918	0.9889	0.9934

สมการการอบแห้งชั้นบาง

จากผลการทดลองอบแห้งไพลที่ได้จากเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน และค่าความชื้นสมดุลที่คำนวณด้วยแบบจำลองความชื้นสมดุล Modified GAB โดยใช้สมการการอบแห้งจากการทดลอง จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งพบว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิของอากาศอบแห้งมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้นลงและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับค่าความชื้นเฉลี่ยของไพล ซึ่งจะพบว่าพฤติกรรมของการอบแห้งไพลที่ได้จากการทดลองนี้ อยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เช่นเดียวกับวัสดุเกษตรอื่น เช่น พริก (Kaleemulah and Kailappan, 2006) และ กระเทียม (Madamba et al., 1996) เป็นต้น



ภาพที่ 2 อัตราส่วนความชื้นความชื้นของไพลที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 3 อัตราการอบแห้งของไพลจากการทดลอง

Bala (1997) ได้แนะนำวิธีการหาค่า k และ n จากสมการของ Page โดยวิธีการ graphic ซึ่งจากสมการ (2) สามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\ln \left[-\ln \left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \right) \right] = \ln(k) + n \ln(t) \quad (9)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (9) ในรูป $y = mx + c$ จะ

$$\text{ได้ } y = \ln \left[-\ln \left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \right) \right], \quad x = \ln(t), \quad m = n$$

และ $c = \ln(k)$ จากผลการทดลองที่ได้จะให้ค่า k และ n ที่แต่ละอุณหภูมิ ดังนั้นเพื่อให้ใช้สมการของ Page ได้ ทุกๆ อุณหภูมิ ในช่วงของการทดลอง จึงทำการหาค่า

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ k และ n กับอุณหภูมิโดยใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยได้ผลดังนี้

$$k = 0.0032 T + 0.017, \quad R^2 = 1$$

เมื่อ $40 \leq T \leq 50 \quad ^\circ\text{C}$

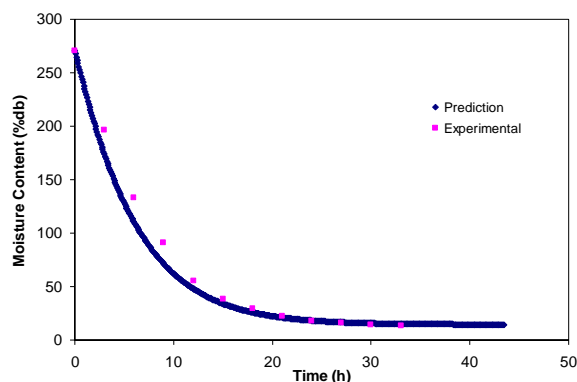
$$n = -0.006 T + 0.1299, \quad R^2 = 1$$

เมื่อ $40 \leq T \leq 50 \quad ^\circ\text{C}$

ดังนั้นเราสามารถที่จะทำการทำนายค่าความชื้นของไหลในระหว่างการอบแห้งได้โดยใช้ค่าความชื้นสมดุลจากแบบจำลอง Modified GAB และ ค่า พารามิเตอร์ k และ n จากสมการของ Page รูปแบบสมการสำหรับการทำนายค่าความชื้นของไหลจึงมีรูปแบบดังนี้

$$M = M_e + (M_0 - M_e) \exp(-kt^n) \quad (10)$$

ผลจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองอบแห้งไหลด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการ (10) แสดงในภาพที่ 4 ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากซึ่งแสดงว่าสมการของ Page สามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของไหลได้ดี โดยมีค่า SEE เท่ากับ 0.006 และ 0.0295 ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 40 และ 50 $^\circ\text{C}$ ตามลำดับ



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าความชื้นที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการของ Page

สรุป

จากการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของไหลพบว่าความชื้นสมดุลของไหลมีค่าลดลงตามอุณหภูมิ แต่เพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสมดุลของไหลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะของ sigmoid shape โดย แบบจำลอง Modified GAB

สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของไหลได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งไหล พบว่าการอบแห้งไหลด้วยลมร้อนมีพฤติกรรมของการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และสมการของ Page สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของไหลได้ดี

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Aviara, N.A., O.O. Ajabola and S.A. Oni. 2004. Sorption Equilibrium and Thermodynamic Characteristics of Soya Bean. *Biosystems Engineering.*, 87(2): 179-190.
- Bala, B.K. 1997. *Drying and Storage of Cereal Grains.* Science Publishers, Inc., USA.
- Chen, C. 2002. Sorption Isotherms of Sweet Potato Slices. *Biosystems Engineering.*, 83(1): 85-95.
- Kaleemullah, S. and R. Kailappan. 2004. Moisture Sorption Isotherms of Red Chillies. *Biosystems Engineering.* 88(1): 95-104.
- Kaleemullah, S. and R. Kailappan. 2006. Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies. *Journal of Food Engineering*, 76: 531-537.
- Lahsasni, S., M. Kouhila and M. Mahrouz. 2004. Adsorption-desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Energy Conversion & Management*, 45: 249-261.
- Madamba, P.S., R.H. Driscoll and K.A. Buckle. 1996. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29: 75-97.
- Menkov, N. D. 2000. Moisture sorption isotherms of vetch seeds at four temperatures. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76: 373-380.
- Sogi, D.S., U.S. Shivhare, S.K. Garg and A.S. Bawa. 2003. Water Sorption Isotherm and Drying Characteristics of Tomato Seeds. *Biosystems Engineering*, 84(3): 297-301.
- Vulloud, M., Carlos A. Marquez and Antonio De Michelis. 2004. Desorption isotherms for sweet

and sour cherry. *Journal of Food Engineering*.
63: 15-19.