Agricultural Sci. J. 42 : 3 (Suppl.) : 589-592 (2011) ว. วิทย. กษ. 42 : 3 (พิเศษ) : 589-592 (2554)

สมดุลความชื้นและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระเจี๊ยบแดง

Equilibrium moisture content and mathematical model of Roselle (*Hibiscus sabdariffa L.*)

ภาณุพงศ์ บุญเพียร[1] และณรงค์ อึ้งกิมบ้วน[2]
Panupong Boonpain[1] and Narong Uengkimbuan[2]

Abstract

The relationship between relative humidity and moisture content of agricultural products is essential to determine the suitable condition in the drying process research. The equilibrium moisture content of Roselle (*Hibiscus sabdariffa L*) was investigated using the static method at temperature of 40, 50 and 60 °C for the range of relative humidities of saturated salt solutions, 0.05 to 0.95 percent. The experimental data were compared with six mathematical models (Modified Brunauer-Emmett-Teller (MBET), Modified Chung-Pfost (MCE), Modified Guggenheim-Anderson-de Boer (MGAB), Modified Halsey (MHE), Modified Henderson (MHDE) and Modified Oswin (MOS)). A nonlinear regression analysis method was used to evaluate the constants of equations. The MHE model was the best model describing the equilibrium moisture content for Roselle having coefficient of determination (R^2), standard error of estimate (SEE) and mean relative error (MRE) of 0.9917, 0.0554 and 26.20%, respectively.

Keywords: Roselle, equilibrium moisture content, mathematical model

บทคัดย่อ

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและความชื้นของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นสิ่งสำคัญต่อการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาหาสมดุลความชื้นของกระเจี๊ยบแดงที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดยที่ความชื้นสมดุลของกระเจี๊ยบหาได้ด้วยวิธีสถิตที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 0.05 ถึง 0.95 โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่างๆ นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6 แบบ (MBET MCE MGAB MHE MHDE และ MOS) แล้วใช้วิธีการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ในแต่ละสมการ พบว่าแบบจำลอง MGAB เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดในการอธิบายความชื้นสมดุลของกระเจี๊ยบแดง โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์ (SEE) และค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (MRE) เท่ากับ 0.991737 0.055409 และ 26.20% ตามลำดับ

คำสำคัญ: กระเจี๊ยบแดง สมดุลความชื้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

คำนำ

กระเจี๊ยบแดง (Roselle) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hibicus sabdariffa Linn* อยู่ในวงศ์ *Malvaceae* (สุนทรี, 2535) กระเจี๊ยบแดงเป็นไม้พุ่มขนาดเล็ก สูงราว 3-6 ศอก ลำต้น และกิ่งก้านมีสีม่วงแดง ใบมีขอบใบเรียบ บางครั้งมีหยักเว้า 3 หยัก ด้วยกัน ดอกสีชมพู การปลูกใช้เมล็ดปลูก ปลูกได้หลายภูมิภาค ควรปลูกช่วงปลายฤดูฝน เพราะเป็นพืชที่ไม่ต้องการน้ำมากนัก กระเจี๊ยบแดงนอกจากจะใช้ทานเล่น และใช้ผสมน้ำแก้กระหายแล้ว ยังมีสรรพคุณทางยาด้านอื่นๆ อีก เช่น การลดไขมันในเส้นเลือด (Lin et al., 2005) การลดความดันโลหิต (Herrera et al., 2004) แม้ว่ากระเจี๊ยบแดงจะมีผลผลิตเกือบทั้งปี แต่ด้วยสรรพคุณต่างๆ ปริมาณการบริโภคจึงมีค่อนข้างสูง ซึ่งไม่สามารถตอบสนองความต้องการใช้ได้ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการในการเก็บรักษา เช่น การอบแห้ง

ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและความชื้นของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นสิ่งสำคัญต่อการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง เช่น การหาไอโซเทอมของถั่วเขียว (Chowdhury et al., 2006) การหาความชื้นสมดุลของพริกหวาน (Akin et al., 2009) ดังนั้นเพื่อเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการอบแห้ง และความคุ้มค่าด้านพลังงานที่ต้องสูญเสีย

[1] คณะวิทยาศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว สระแก้ว 27160
[1] Faculty of Science and Social Science, Burapha University, Sakaeo Campus, Sakaeo, 27160
[2] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131
[2] Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi, 20131

ไป งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาหาสมดุลความชื้นของกระเจี๊ยบแดงที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายการทดลองที่ได้

อุปกรณ์และวิธีการ

กระเจี๊ยบแดงที่ใช้ในการวิจัยนี้ เป็นกระเจี๊ยบแดงจากเกษตรกร อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี โดยก่อนทำการวิจัยจะนำกระเจี๊ยบแดงมาแกะเมล็ดภายในออก และนำไปล้างน้ำสะอาดดัง Figure 1 ซึ่งกระเจี๊ยบแดงที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 90 มาตรฐานเปียก หรือประมาณ 8.5 – 10.5 มาตรฐานแห้ง

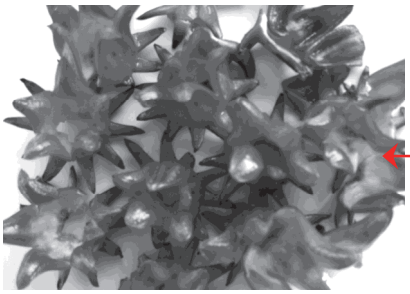

Figure 1 Sample (Roselle).

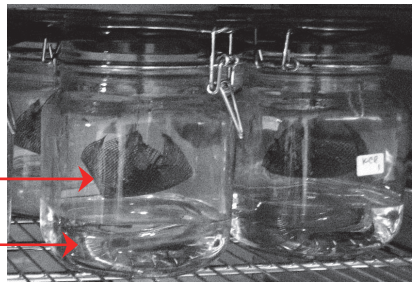

Figure 2 container used for determining ERH of Roselle.

การหาความชื้นสมดุล นำกระเจี๊ยบสดที่แกะเมล็ดแล้ว มาวางบนตะแกรงภายในขวดแก้วปิดสนิทซึ่งบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว 6 ชนิด ดัง Figure 2 ซึ่งจะให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 40 ถึง 60 °C ดังแสดงใน Table 1 (Oyelade et al., 2008; Lahsasni et al., 2002; Pahlevanzadeh and Yazadni, 2005) จากนั้นนำขวดแก้วเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C ตามลำดับ และระหว่างการทดลองนำตัวอย่างกระเจี๊ยบมาชั่งทุกๆ 72 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักของกระเจี๊ยบแดงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงนำกระเจี๊ยบแดงไปหาค่าความชื้นด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

Table 1 Equilibrium relative humidity of saturated salt solutions at temperature range of 40 to 60 °C

Saturated salt solutions	KOH	$MgCl_2$ 6(H_2O)	$MgNO_3$ 6(H_2O)	KI	NaCl	KCl	K_2SO_4
Equilibrium relative humidity	~ 5%	~ 30%	~ 45%	~ 65%	~ 75%	~ 80%	~ 95%

Table 2 Equilibrium moisture content models

Model name*	Model Equation**	Model name*	Model Equation**
1) MBET	$Me = \frac{(a + bT)(c)(Rh)}{(1 - Rh)\left((1 - Rh) + (c)(Rh)\right)}$	4) MHE	$Me = \left(\frac{e^{(a + bT)}}{ln(Rh)}\right)^{\frac{1}{c}}$
2) MCE	$Me = -\frac{1}{c}\left[\frac{(T + b)ln(Rh)}{-a}\right]$	5) MHDE	$Me = \left(-\frac{ln(1-Rh)}{a(T+b)}\right)^{\frac{1}{c}}$
3) MGAB	$Me = \frac{(a)(b)\left(\frac{c}{T}\right)(Rh)}{(1 - (b)(Rh))\left[(1 - (b)(Rh)) + (b)\left(\frac{c}{T}\right)(Rh)\right]}$	6) MOE	$Me = (a + bT)\left(\frac{Rh}{1 - Rh}\right)^{\frac{1}{c}}$

* MBET = modified Brunauer, Emmett and Teller equation; MCE = modified Chung–Pfost equation; MGAB = modified Guggenheim, Anderson and de Boer equation; MHE = modified Halsey equation; MHDE = modified Henderson equation; and MOE = modified Oswin equation.

** Me = equilibrium moisture content (%db); Rh = equilibrium relative humidity (decimal); T = temperature (°C); a, b and c = constants specific to individual equations.

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมการความชื้นสมดุล นั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าพารามิเตอร์ของสมการที่แสดงใน Table 2 โดยใช้วิธี nonlinear regression ของโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งการเลือกใช้สมการที่เหมาะสมนั้นจะประเมินจากค่าโดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์ (standard error of estimate, SEE) และค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (Mean relative Error, MRE) ดังสมการ

$$R^2 = \frac{\sum\left(Me_{exp} - Me_{pre}\right)^2}{\sum Me_{exp}^2 \sum Me_{pre}^2} \quad (1)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum\left(Me_{exp} - Me_{pre}\right)^2}{df}} \quad (2)$$

$$MRE = \frac{100}{n}\sum\left|\frac{Me_{exp} - Me_{pre}}{Me_{exp}}\right| \quad (3)$$

เมื่อ Me_{exp} คือค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลอง; Me_{pre} คือค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากแบบจำลอง;
n คือจำนวนข้อมูล และ df คือ degree of freedom of regression model

ผล

ผลการทดลองการหาความชื้นสมดุลของกระเจี๊ยบแดงที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C นั้น เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ พบว่าความชื้นสมดุลของกระเจี๊ยบแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ดัง Figure 3

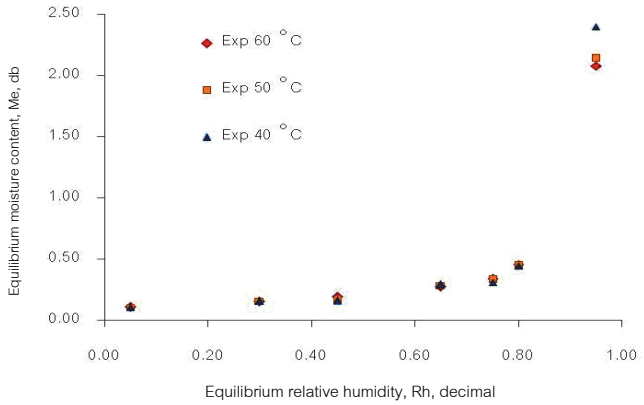

Figure 3 Relation of equilibrium moisture content of Roselle and relative humidity.

เมื่อทำการวิเคราะห์เพื่อหาสมการ และพารามิเตอร์ ที่เหมาะสมกับค่าความชื้นสมดุลของกระเจี๊ยบแดงทั้ง 3 อุณหภูมิแล้ว พบว่าแบบจำลอง MHE (Modified Halsay Equation) ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุดเนื่องจากมีค่า R^2 และ ค่า SEE กับ MRE ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น โดยแสดงค่าการตัดสินใจดังกล่าว และค่าพารามิเตอร์ ใน Table 3

Table 3 Parameters and determination criteria.

Model	Parameters			determination criteria		
	a	b	c	R^2	SSE	MRE
MBET	3.821721	-0.019110	0.002188	0.878794	0.212223	0.796936752
MCE	309.6644	158.9290	2.379184	0.616335	0.377565	1.141157369
MGAB	93.38597	0.896736	0.028931	0.951659	0.134031	0.485242628
MHE	-1.88134	-0.006211	0.972226	0.991737	0.055409	0.26200113
MHDE	0.006036	302.8710	0.427493	0.973794	0.098692	0.482354382
MOS	0.174078	-0.000843	0.960213	0.986287	0.071403	0.354428306

วิจารณ์ผล

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า ค่าความชื้นสมดุลของกระเจี๊ยบแดงในแต่ละค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ นั้น มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จึงสามารถรวมความสัมพันธ์ของค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอุณหภูมิเป็นตัวแปรต้น แล้วกำหนดให้ ค่าความชื้นสมดุลของกระเจี๊ยบแดงเป็นตัวแปรตาม ซึ่งเมื่อเทียบผลของการทำนายของแบบจำลอง MHE และแบบจำลองอื่นๆ กับค่าที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่าแบบจำลอง MHE สามารถอธิบายความชื้นสมดุลของกระเจี๊ยบแดงได้ ดัง Figure 4 และการเปรียบเทียบแบบจำลอง MHE กับผลที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ ดัง Figure 5

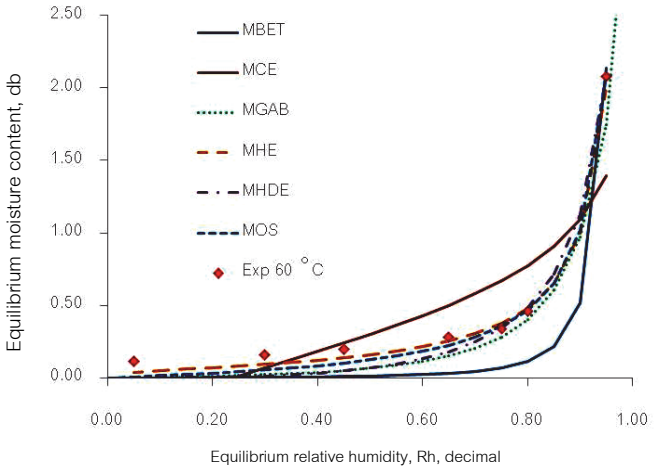

Figure 4 Comparison of models and experimental at 60 °C.

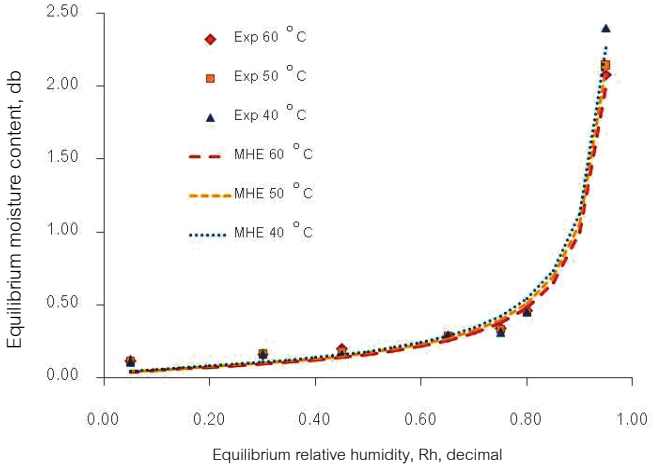

Figure 5 Comparison of MHE and experimental.

สรุป

ค่าความชื้นสมดุลของกระเจี๊ยบแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ทั้งนี้แบบจำลอง MHE ให้ค่าการทำนายผลที่ดีที่สุด และมีค่า R^2 SEE และ MRE เท่ากับ 0.991737 0.055409 และ 26.20% ตามลำดับ โดยมีค่าพารามิเตอร์ a b และ c เท่ากับ -1.88134 -0.006211 และ 0.972226 ตามลำดับ

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว ที่สนับสนุนทุนวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

สุนทรี สิงหบุตรา. 2535. สรรพคุณสมุนไพร 200 ชนิด. กรุงเทพฯ: คุณ39.

Akın A., N. Özbalta and A. Güngör. 2009. Equilibrium moisture content and equations for fitting sorption isotherms of *Capsicum annuum*. GIDA 34 (4): 205-211.

Chowdhury M.M.I., M.D. Huda, M.A. Hossain and M.S. Hassan. 2006. Moisture sorption isotherms for mungbean (*Vigna radiata* L). Journal of Food Engineering 74: 462–467.

Herrera-Arellano A., S. Flores-Romero, M.A. Chavez-Sotoc and J. Tortoriello. 2004. Effectiveness and tolerability of a standardized extract from Hibiscus sabdariffa in patients with mild to moderate hypertension : a controlled and randomized clinical trial. Phytomedicine 11: 375–382.

Lahsasni S., M. Kouhila, M. Mahrouz and N. Kechaou. 2002. Experimental study and modelling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). Journal of Food Engineering 55: 201–207.

Lin, T. L., H.H. Lin, C.C. Chen, M.C. Lin, M.C. Chou and C.J. Wang. 2007. Hibiscus sabdariffa extract reduces serum cholesterol in men and women. Nutrition Research 27: 140–145.

Oyelade O. J., T.Y. Tunde-Akintunde, J.C. Igbeka, M.O. Oke and O.Y. Raji. 2008. Modelling moisture sorption isotherms for maize flour. Journal of Stored Products Research 44: 179–185.

Pahlevanzadeh H. and M. Yazdani. 2005. Moisture adsorption isotherms and isoteric energy for Almond. J. Food Eng 28: 331–345.