การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5
18 - 20 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

EC010

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทอง

Mathematical Models Equilibrium Moisture Content of Pumpkin Seed

อีลีหย๊ะ สนิโซ๊ะ นุรมา แปเฮาะอีเล
ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
ตำบลสะเตง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000 โทร 086-2960787 E-mail: saniso.e@hotmail.com

บทคัดย่อ

ความชื้นสมดุลมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรที่เหมาะสม โดยไม่เกิดความเสียหายและเหมาะสมกับการเก็บรักษา การวิจัยนี้จึงทดลองหาค่าความชื้นสมดุลซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์กระบวนการอบแห้งเมล็ดฟักทองที่เหมาะสมด้วยวิธีสถิต (Static method) ซึ่งมีสารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด ได้แก่ LiCl, $MgCl_2$, $Mg(NO_3)_2$, NaCl และ KNO_3 ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 11.10 - 92.30 ที่อุณหภูมิอากาศในช่วง 30 - 50 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์หาค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองปรากฏว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์เดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า แบบจำลองความชื้นสมดุลของ Halsey สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองได้ดีที่สุด

คำสำคัญ: การอบแห้ง, ความชื้นสมดุล, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, เมล็ดฟักทอง

1. บทนำ

ฟักทอง (Pumpkin) เป็นพืชตระกูลมะระชนิดไม้เถาขนาดใหญ่ ผิวมีลักษณะขรุขระ เนื้อในสีเหลืองนิ่มมีเมล็ดสีขาวแบนติดอยู่ แต่ละส่วนของฟักทองมีสรรพคุณมากมาย โดยเฉพาะเมล็ด (Pumpkin seeds) ที่ประกอบด้วยแป้ง ฟอสฟอรัส โปรตีน และวิตามิน รวมทั้งสารที่ชื่อ "คิวเคอร์บิติน" (Cucurbitine) ซึ่งมีฤทธิ์ในการฆ่าพยาธิตัวตืด ช่วยขับปัสสาวะ ป้องกันการเกิดนิ่วและป้องกันมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ นอกจากนี้น้ำมันจากเมล็ดฟักทองยังช่วยบำรุงประสาท และมีกรดอะมิโนบางชนิดที่ช่วยป้องกันไม่ให้ต่อมลูกหมากของผู้ชายขยายใหญ่ขึ้น รวมทั้งช่วยปรับระดับฮอร์โมนเพศชายที่ได้จากลูกอัณฑะให้อยู่ในระดับปกติ

เมล็ดฟักทองเมื่อแกะออกจากผลแล้วจะมีความชื้นสูงส่งผลให้ไม่สามารถเก็บรักษาได้นาน จึงมีการตากแดดหรือใช้กระบวนการอบแห้งเมล็ดฟักทองแบบต่างๆ เพื่อลดความชื้นให้เก็บรักษาได้นานขึ้น การผลิตเมล็ดฟักทองแห้งจึงเป็นกระบวนการหนึ่งในการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้พลังงานแบบต่างๆ เช่น พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) และพลังงานชีวมวล (Biomass energy) การวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการอบแห้งเมล็ดฟักทองนั้นจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์บางประการ ซึ่งพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในกระบวนการอบแห้ง คือ ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC) [1-10] ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความชื้นของวัสดุตามที่ต้องการและช่วยในการจัดเก็บรักษาวัสดุที่ควบคุมความชื้นของผลิตภัณฑ์เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีผู้คิดค้นและนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายความชื้นสมดุลของวัสดุเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุแต่ละชนิด เช่น แบบจำลองของ Oswin [3, 7], Halsey [7], Henderson [6-7], Chung & Pfost [7], GAB [2, 5-7], BET [1],

Modified Oswin [1, 4, 7], Modified Halsey [1, 3-4, 7], Modified Henderson [1, 3-4, 7], Modified Chung & Pfost [1, 4, 7] และ Modified GAB [4, 7]

การวิจัยนี้จึงทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองและนำแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Henderson [6-7], Chung & Pfost [7], Halsey [7] และ BET [1] มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อหาแบบจำลองความชื้นสมดุลที่เหมาะสมสำหรับเมล็ดฟักทอง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ความชื้น

ความชื้น (Moisture) คือ ปริมาณน้ำหรือของเหลวที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุ [8-11] ตามมาตรฐาน AOAC 2005 [12] ความชื้นในวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

$$MC = \frac{w-d}{d} \cdot 100 \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.) w คือ มวลของวัสดุเปียก (kg) และ d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

ความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุล คือ ปริมาณความชื้นเมื่อความดันของน้ำในวัสดุไปถึงจุดสมดุลกับสิ่งแวดล้อม ถือเป็นลักษณะเฉพาะทางอุณหพลศาสตร์ที่มีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งเพื่อบอกปริมาณความชื้นน้อยสุดที่สามารถมีอยู่ได้ในวัสดุระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ของสภาวะสิ่งแวดล้อม [8-12] การทดลองนี้จะนำข้อมูลค่าความชื้นสมดุลที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองความชื้นสมดุล 5 ลักษณะ ดังนี้

Henderson [6-7] :
$$EMC = \left[-\frac{1}{A} \cdot \frac{\ln(1-RH)}{(T+273)} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (2)$$

Chung & Pfost [7] :
$$EMC = -\frac{1}{B} \cdot \ln\left[-\frac{1}{A} \cdot \ln(RH) \cdot R \cdot (T+273) \right] \quad (3)$$

Halsey [7] :
$$EMC = \exp^{\left\{ -\frac{1}{B} \ln\left[\frac{1}{A} \cdot \ln(RH) \cdot R \cdot (T+273) \right] \right\}} \quad (4)$$

BET [1] :
$$EMC = \frac{A \cdot B \cdot RH}{(1-RH) \cdot (1+(B-1) \cdot RH)} \quad (5)$$

เมื่อ EMC คือ ความชื้นสมดุล (ร้อยละมาตรฐาน) RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (อัตราส่วน) T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) A, B คือ ค่าคงที่สมการ และ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน)

การวิเคราะห์สถิติ

การทดลองนี้ได้พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation, R^2) [13-14] เพื่อวิเคราะห์หารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอธิบายและทำนายความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทอง กล่าวคือ แบบจำลองที่ให้ค่า R^2 สูงสุด ถือเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทอง [13] ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ 11.10 - 92.30 อุณหภูมิ 30 - 50 องศาเซลเซียส ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (6) ดังนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(EMC_{pre} - EMC_{exp})^2}{\sum_{i=1}^{n}(EMC_{exp})^2 - (\sum_{i=1}^{n}(EMC_{exp})^2/(N-Z))} \quad (6)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลการทดลอง i คือ จำนวนเต็ม 0, 1, 2, ... Z คือ จำนวนค่าคงตัว ตัวห้อย exp คือ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง pre คือ ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง n คือ จำนวนข้อมูลที่วิเคราะห์

2.2 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เมล็ดฟักทอง

เมล็ดฟักทองที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเมล็ดฟักทองสดจากผลฟักทองที่ได้จากตลาดเมืองใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา โดยแกะมาจากผลฟักทองสดที่สังเกตจากเปลือกภายนอกเป็นสีเหลือง แล้วคัดขนาดที่ใกล้เคียงกันมาเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 2 - 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 5 วัน เพื่อให้เมล็ดฟักทองมีความชื้นสม่ำเสมอ ระหว่างนี้ทำการเขย่าทุกวันเพื่อให้ความชื้นกระจ่ายสม่ำเสมอ จากนั้นนำมาพักไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อมเป็นเวลา 30 - 40 นาที จึงนำไปทดลองหาค่าความชื้นสมดุลตามมาตรฐาน AOAC 2005 [12]

การหาความชื้นสมดุล

การหาค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองมีหลักการ คือ ปล่อยให้เมล็ดฟักทองสัมผัสกับอากาศที่ไม่มีการเคลื่อนที่ จนความชื้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยวิธีสถิต (Static method) ในภาชนะปิดสนิทที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ ซึ่งใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด ได้แก่ ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2$) แมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต ($Mg(NO_3)_2$) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 11.10 - 92.30 ดังตารางที่ 1 ส่วนอุณหภูมิของอากาศจะถูกควบคุมด้วยตู้อบระบบปิด (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น 100-800

การหาค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทอง เริ่มโดยนำสารละลายเกลืออิ่มตัวทั้ง 5 ชนิด บรรจุลงในขวดแก้ว ชนิดละ 2 ชุด จากนั้นนำเมล็ดฟักทองมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Zepper รุ่น eps-3001 ความละเอียด 0.1 กรัม ให้ได้จำนวน 10 ชุดๆ ละ 30.0 กรัม ใส่ลงในตะแกรงแล้วไปบรรจุไว้ในขวดแก้ว ปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปใส่ไว้ในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ไว้ประมาณ 5 - 7 วัน ให้ความชื้นของเมล็ดฟักทองเข้าสู่สมดุล เมื่อครบกำหนดจึงทำการชั่งน้ำหนักทุกวันจนกว่าน้ำหนักจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (ไม่เกิน 0.5 กรัม) จึงหยุดการทดลอง แล้วนำไปหาค่าความชื้นตามมาตรฐาน AOAC 2005 [12] โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าความชื้นตามสมการ (1) ซึ่งความชื้นที่ได้นี้ถือเป็นค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทอง และดำเนินการในทำนองเดียวกันนี้อีก แต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัว [3, 8-10]

อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)				
	KNO_3	$MgCl_2$	$Mg(NO_3)_2$	NaCl	LiCl
30	92.30	32.48	51.40	75.10	11.30
40	90.20	31.59	48.40	74.70	11.20
50	89.20	30.54	45.40	74.40	11.10

การวิเคราะห์แบบจำลองความชื้นสมดุล

การวิเคราะห์แบบจำลองความชื้นสมดุล ทำได้โดยหาค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลองความชื้นสมดุล โดยอาศัยค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลอง ด้วยการวิเคราะห์สมการการถดถ่อยในลักษณะไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วนำค่าคงที่ของสมการที่ได้แทนกลับในสมการแบบจำลองความชื้นสมดุล ตามสมการ (2) - (5) จากนั้นวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ตามสมการ (6) เพื่อพิจารณารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความชื้นสมดุลที่เหมาะสมที่สุด

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการหาค่าความชื้นสมดุล

การหาค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทอง ซึ่งใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด ได้แก่ LiCl, $MgCl_2$, $Mg(NO_3)_2$, NaCl และ KNO_3 ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วงร้อยละ 11.10 - 92.30 ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ 30 °C		อุณหภูมิ 40 °C		อุณหภูมิ 50 °C	
RH (%)	EMC (% d.b.)	RH (%)	EMC (% d.b.)	RH (%)	EMC (% d.b.)
11.30	4.58	11.20	4.39	11.10	3.49
32.48	6.77	31.59	5.87	30.54	5.14
51.40	7.25	48.40	7.01	45.40	6.48
75.10	7.29	74.70	7.17	74.40	7.05
92.30	8.23	90.20	7.37	89.20	7.93

3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ของแบบจำลองความชื้นสมดุล

เมื่อนำผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทอง ตามตารางที่ 2 ไปวิเคราะห์ค่าคงที่ของแบบจำลองความชื้นสมดุล ด้วยการวิเคราะห์สมการถดถอยลักษณะไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วนำค่าคงที่สมการแทนกลับในสมการแบบจำลองความชื้นสมดุล ตามสมการ (2) - (5) จากนั้นวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ได้ผลดังตารางที่ 3

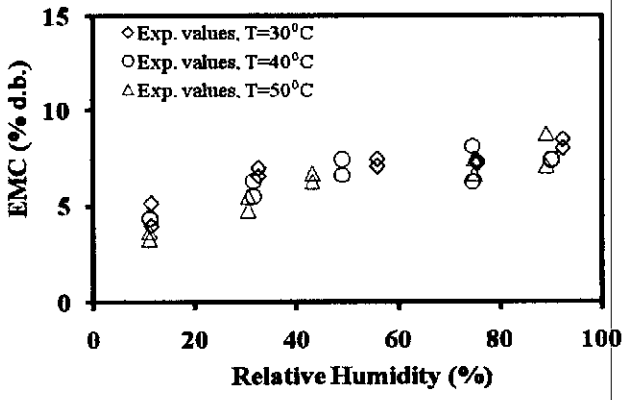
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของแบบจำลองความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

แบบจำลองความชื้นสมดุล	พารามิเตอร์	อุณหภูมิ		
		30 °C	40 °C	50 °C
Henderson [6-7] $EMC=\left[-\frac{1}{A}\cdot\frac{\ln(1-RH)}{(T+273)}\right]^{\frac{1}{B}}$	A	4.0338×10^{-7}	9.1207×10^{-8}	8.4030×10^{-6}
	B	4.5344	5.5574	3.1239
	R^2	0.8184	0.82858	0.9656
Chung & Pfost [7] $EMC=-\frac{1}{B}\cdot\ln\left[-\frac{1}{A}\cdot\ln(RH)\cdot R\cdot(T+273)\right]$	A	2.5754×10^{5}	6.3601×10^{5}	4.9292×10^{4}
	B	0.7790	0.9982	0.5490
	R^2	0.7306	0.7377	0.9315
Halsey [7] $EMC=\exp^{\left\{\frac{1}{B}\ln\left[\frac{1}{A}\ln(RH)\cdot R\cdot(T+273)\right]\right\}}$	A	4.9528×10^{6}	2.9663×10^{7}	2.6641×10^{5}
	B	-4.3534	-5.5519	-2.8739
	R^2	0.8505	0.8537	0.9828
BET [1] $EMC=\frac{A\cdot B\cdot RH}{(1-RH)\cdot(1+(B-1)\cdot RH)}$	A	2.3268	-0.4313	-37.1023
	B	-0.3982	2.0916	0.9695
	R^2	0.6787	0.8123	0.8066

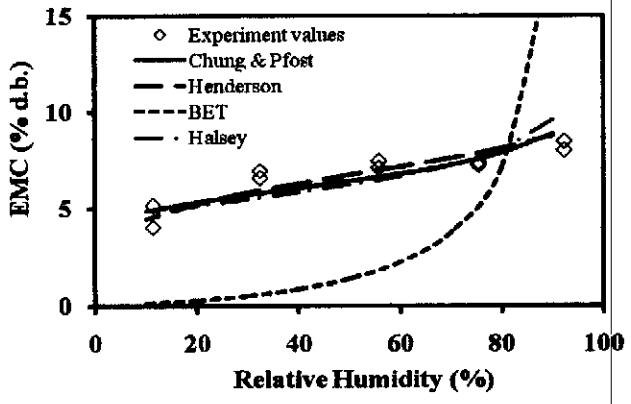
4. อภิปรายและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11.10 - 92.30 ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ นั่นคือ ถ้าค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าน้อยจะส่งผลให้เมล็ดฟักทองมีค่าความชื้นสมดุลต่ำและถ้าค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นก็จะส่งผลให้

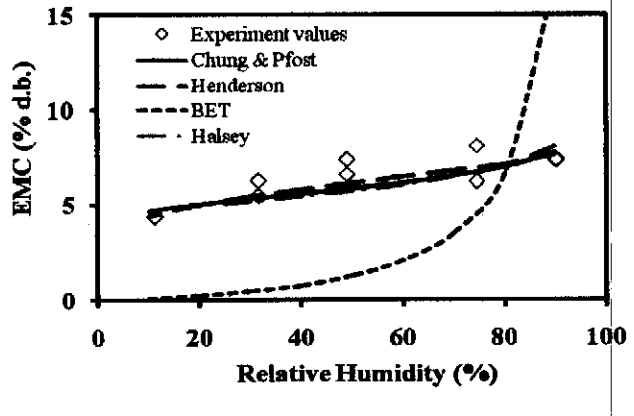
เมล็ดฟักทองมีค่าความชื้นสมดุลสูงขึ้น เพราะที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงนี้ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมก็จะสูงขึ้นด้วยส่งผลให้การถ่ายโอนความชื้นระหว่างวัสดุกับสิ่งแวดล้อมได้น้อยกว่าที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมต่ำกว่า ส่วนที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากันนั้น พบว่า ค่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิมีค่าน้อยจะส่งผลให้เมล็ดฟักทองมีค่าความความชื้นสมดุลสูงและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็จะส่งผลให้เมล็ดฟักทองมีค่าความชื้นสมดุลต่ำลง ซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะการกระตุ้นที่สูงขึ้นของโมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นนำไปสู่การลดลงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ



รูปที่ 1 ความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

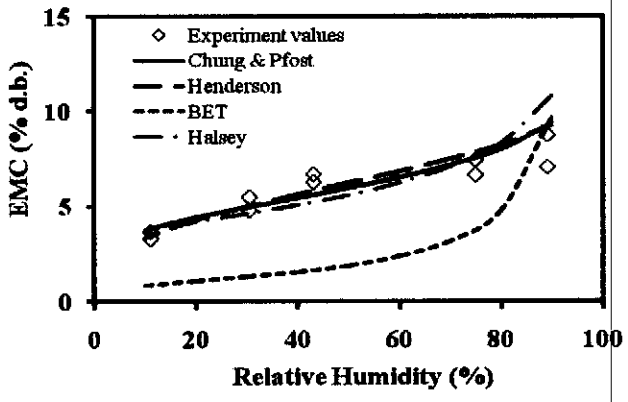


รูปที่ 2 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

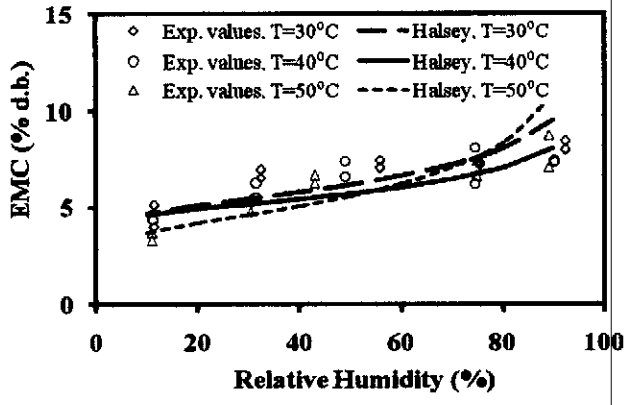


รูปที่ 3 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลกับผลที่ได้จากการทดลองในแต่ละอุณหภูมิได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2 - 4 และมีรายละเอียดของค่าคงที่ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่า แบบจำลองความชื้นสมดุลของ Henderson [6-7], Chung & Pfost [7] และ Halsey [7] สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองและมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ยกเว้นแบบจำลองความชื้นสมดุลของ BET [1] เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่ามากที่สุดในแต่ละแบบจำลองความชื้นสมดุล พบว่า ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส นั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Halsey มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.8505, 0.8537 และ 0.9828 ตามลำดับ รองลงมาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Henderson [6-7] ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.8184, 0.82858 และ 0.9656 ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลองความชื้นสมดุลของ BET [1] นั้น ให้ผลการทำนายค่าความชื้นสมดุลที่แตกต่างกันกับผลการทดลองอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 2 - 4



รูปที่ 4 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Halsey [7] กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ดังกล่าว อธิบายได้ว่าแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Halsey [7] สามารถนำมาทำนายค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองในทุกช่วงอุณหภูมิได้เป็นอย่างดีและมีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อนง่ายต่อการนำไปใช้งานเพื่อทำนายค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Halsey [7] กับผลที่ได้จากการทดลองในแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 5

5. สรุป

จากการทดลองและวิเคราะห์ค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทอง พบว่า ความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองมีค่าลดลงตามอุณหภูมิแต่เพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะของโค้งกลับ (Sigmoid shape) โดยแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Halsey [7] สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลได้ดีที่สุด และมีรูปแบบสมการที่ง่ายไม่ซับซ้อน สะดวกต่อการนำไปใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดฟักทองที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะสิ่งแวดล้อมต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นอื่นๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายสูเซ็ง ชายดานา นักวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์สำหรับการวิจัยเป็นอย่างดียิ่ง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Cortés, F.B., López, V. and Rojano, B.A. "Sorption Properties of Cape Gooseberry (Physalis peruviana L.)," International Journal of Food Engineering, Vol.8, Iss.1, Article 14, pp.1-16, 2012.

[2] Villa-Vélez, H.A., Váquiro, H.A., Bon, J. and Telis-Romero, J. "Modelling Thermodynamic Properties of Banana Waste by Analytical Derivation of Desorption Isotherms," International Journal of Food Engineering, Vol.8, Iss.1, Article 9, pp.1-19, 2012.

[3] Divair, C., Rosiane, L.d.C., Florencia, C.M., Katiuchia, P.T., Silvia, R.M.C. and Lúcia, H.P.N. "Sorption Isotherms of Albumen Dried in a Spout Fluidised Bed," Journal of Food, Agriculture & Environment, Vol.10, Iss.2, pp.151-155, 2012.

[4] สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ "แบบจำลองฮีสเตอร์ริสและไอโซเทอมความชื้นสมดุลสำหรับการอบแห้งลำไยแผ่น" การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 วันที่ 4-5 เมษายน จังหวัดเชียงใหม่ หน้า 493-503 พ.ศ. 2555.

[5] Taitano, L.Z. and Singh, R.P. "Moisture Adsorption and Thermodynamic Properties of California Grown Almonds (Varieties: Nonpareil and Monterey)," International Journal of Food Studies, Vol.1, pp.61-75, 2012.

[6] Sobukola, O., Popoola, I. and Munoz, L. "Experimental and Mathematical Description of Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Salted and Dried African Catfish (Clarias gariepinus)," International Journal of Food Engineering, Vol.8, Iss.2, Article 5, pp.1-23, 2012.

[7] Wasan, J., Thossaporn, C., Sutep, C. and Chalerm, S. "Comparison of Mathematical Models Equilibrium Moisture Content for Sheet Rubber. KKU ENGINEERING JOURNAL, Vol.39, Iss.1, pp.11-21, 2012.

[8] Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. "Drying Cereal Grains," 3rd Ed., The AVI publishing company, Inc., Westport, Connecticut, 265 p., 1981.

[9] Bala, B.K. "Drying and Storage of Cereal Grains," Oxford & IBH Publishing, New Delhi, 302 p., 1997.

[10] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ "การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร, 375 หน้า พ.ศ. 2540.

[11] Crank, J. "The Mathematics of Diffusion," Oxford University Press, London, 414 p., 1975.

[12] AOAC. "Official Methods of Analysis," 18th Ed., Association of official analytical chemists, Washington, D.C., 2005.

[13] Ilknur, A. "Selection of the Best Suitable Thin-Layer Drying Mathematical Model for Vacuum Dried Red Chili Pepper," J. BIOL. ENVIRON. SCI., Vol.6, Iss.17, pp.161-170, 2012.