



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

แบบจำลองความชื้นสมดุลสำหรับกล้วยน้ำว้า

Equilibrium moisture content model for banana (Kluai Nam Wa)

วสันต์ เจินธาดา* และ พรชัย เพชรสงคราม

Wasan Jeentada* and Pornchai Phetsongkram

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา 90000

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkla, Thailand, 90000

Received September 2011

Accepted November 2012

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการหาค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 40 °C, 50 °C, 60 °C และ 70°C ในช่วงวอเตอร์แอคทิวิตี้ 0.10-0.82 ด้วยวิธีสถิต (static method) และนำแบบจำลองความชื้นสมดุล 12 แบบ คือ Oswin, Halsey, Henderson, Henderson-Thompson, Chung and Pfof, GAB, Peleg, Modified Oswin, Modified Halsey, Modified Henderson, Modified Chung-Pfof และ Modified GAB มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อหาแบบจำลองความชื้นสมดุลที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้า จากผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าพบว่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ที่ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้เดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิต่ำลงและที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะสูงขึ้นเมื่อค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้สูงขึ้น ส่วนแบบจำลองความชื้นสมดุลที่ทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าได้ดีที่สุดจากแบบจำลองความชื้นสมดุลทั้ง 12 แบบคือแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Peleg และแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Peleg มีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อนสะดวกต่อการนำไปใช้ทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้า

คำสำคัญ : ความชื้นสมดุล แบบจำลองความชื้นสมดุล กล้วย กล้วยน้ำว้า

Abstract

The objective of this research was to examine values of equilibrium moisture content for banana (Kluai Nam Wa) at temperature 40°C, 50°C, 60°C and 70°C in water activity ranges from 0.10 to 0.82 using a static method. Twelve equilibrium moisture content models-Oswin, Halsey, Henderson, Henderson-Thompson, Chung and Pfof, GAB, Peleg, Modified Oswin, Modified Halsey, Modified Henderson, Modified Chung-Pfof and Modified GAB- were applied to find the most suitable equilibrium moisture content model to precisely predict values of equilibrium moisture content for banana (Kluai Nam Wa). The result indicated that the values of equilibrium moisture content of banana (Kluai Nam Wa) varied on temperature and water activity. At the same value of water activity, the lower a temperature, the higher a value of equilibrium moisture content whereas at the same temperature, the higher a value of water activity, the higher value of equilibrium moisture content. Of the 12 equilibrium moisture content

*Corresponding author. Tel.: +66 7431-7100 to 1915; fax: +66 7431-5185

Email address: wasan.jeen@gmail.com

models, Peleg was found to be the best predicting equilibrium moisture content model. The equation of Peleg is also a simple form and easy to use to predict a value of an equilibrium moisture content of banana (Kluai Nam Wa).

Keywords : Equilibrium moisture content, Equilibrium moisture content model, Banana, Kluai Nam Wa

1. บทนำ

การอบแห้งกล้วยน้ำว้าเป็นการเพิ่มมูลค่าของกล้วยน้ำว้าให้กับกลุ่มเกษตรกรและในประเทศไทยนี้มีผู้ผลิตกล้วยน้ำว้าอบแห้งเพื่อจำหน่ายกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับกระบวนการอบแห้งที่บอกถึงปริมาณความชื้นน้อยสุดที่สามารถมีอยู่ได้ในวัสดุของสภาวะสิ่งแวดล้อมนั้นๆ โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม [1] ความชื้นสมดุลนี้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งเพื่อออกแบบความเหมาะสมของเครื่องอบแห้งและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้จากกระบวนการอบแห้ง [2] จากงานวิจัยที่ผ่านมาการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลที่นิยมนำมาใช้ คือ วิธีสถิต (static method) เป็นการปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศในขณะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของอากาศจนความชื้นของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทดลองในภาชนะปิดที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศให้คงที่ด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัวและควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ด้วยตู้อบ [3-6] Cordeiro et al. [4] ใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของภาชนะต่อปริมาตรของสารละลายเกลืออิ่มตัวเท่ากับ 2.4 Li et al. [7] ใช้อัตราส่วนเท่ากับ 3.8 แบบจำลองความชื้นสมดุลที่ทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุได้ดี คือ Halsey สำหรับใบชาดำเหี่ยวและใบชาเขียวเหี่ยว [8] Henderson -Thompson สำหรับใบพืชสมุนไพร [4] Chung and Pfof สำหรับเห็ด [5] GAB สำหรับแป้งข้าวโพด [2] Peleg สำหรับผงชาเขียวยางพาราแผ่นและใบมะกอก [1, 3, 9] Modified Oswin สำหรับข้าวฟ่างและกล้วยน้ำว้า [10, 11] Modified Halsey สำหรับเมล็ดมันฝรั่ง [6] Modified Henderson สำหรับเมล็ดถั่ว [12] Modified Chung-Pfof สำหรับข้าวสาลี [7] Modified GAB สำหรับข้าวโพด มะเขือเทศและข้าว [13, 14, 15] นอกจากนี้ยังมีแบบจำลองของ Oswin และ Henderson ที่สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุได้ตรงลงมา

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าและแบบจำลองความชื้นสมดุลที่เหมาะสมสำหรับกล้วยน้ำว้า โดยนำแบบจำลอง 12 แบบ คือ Oswin, Halsey, Henderson, Henderson - Thompson, Chung and Pfof, GAB, Peleg, Modified Oswin, Modified Halsey, Modified Henderson, Modified Chung-Pfof และ Modified GAB มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

2. ทฤษฎี

ความชื้นในวัสดุคือปริมาณน้ำหรือของเหลวที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อวัสดุ โดยส่วนใหญ่แล้วมักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$MC_{db} = \left(\frac{m_w}{m_d} \right) \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ MC_{db} คือ ความชื้นฐานแห้ง (%d.b.)

m_w คือ มวลของน้ำ (kg)

m_d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

วอเตอร์แอคทิวิตี (water activity, a_w) เป็นคุณสมบัติที่อธิบายถึงอัตราส่วนความดันไอของน้ำในวัสดุต่อความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน [5] ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$a_w = \left(\frac{p}{p_0} \right)_T = \frac{ERH}{100} \quad (2)$$

เมื่อ a_w คือ วอเตอร์แอคทิวิตี (ไม่มีหน่วย)

p คือ ความดันไอของน้ำในวัสดุ (Pa)

p_0 คือ ความดันไออิ่มตัวของน้ำ (Pa)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ERH คือ ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (%)

ความชื้นสมดุลคือปริมาณความชื้นในวัสดุที่สมดุลกับสภาวะแวดล้อมนั้นๆ ความชื้นจะไม่ลดต่ำกว่านี้อีก การทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุมีแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองความชื้นสมดุล

ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง	อ้างอิง
Oswin	$EMC = A \left[\frac{a_w}{(1-a_w)} \right]^B$	[1, 13, 14, 16]
Halsey	$EMC = \left[\frac{-A}{T \ln(a_w)} \right]^{\frac{1}{B}}$	[14, 16]
Henderson	$EMC = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-AT} \right]^{\frac{1}{B}}$	[6, 13, 17]
Henderson –Thompson	$EMC = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-A(T+B)} \right]^{\frac{1}{C}}$	[4, 6, 9]
Chung and Pfof	$EMC = \frac{1}{-A} \ln \left[\frac{(T+B) \ln(a_w)}{-C} \right]$	[4, 6, 12]
GAB	$EMC = \frac{ABCa_w}{(1-Ba_w)(1-Ba_w+BCa_w)}$	[2, 4, 8, 17]
Peleg	$EMC = A(a_w)^B + C(a_w)^D$	[1, 9, 14]
Modified Oswin	$EMC = (A+BT) \left[\frac{a_w}{(1-a_w)} \right]^{\frac{1}{C}}$	[7, 10, 12, 15]
Modified Halsey	$EMC = \left[\frac{-\exp(A+BT)}{\ln(a_w)} \right]^{\frac{1}{C}}$	[4, 6, 8, 10, 15]
Modified Henderson	$EMC = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-A(T+B)} \right]^{\frac{1}{C}}$	[1, 2, 7, 8, 10, 12, 15]
Modified Chung-Pfof	$EMC = \frac{1}{-C} \ln \left[\frac{(T+B) \ln(a_w)}{-A} \right]$	[2, 7, 10, 15]
Modified GAB	$EMC = \frac{AB \left(\frac{C}{T} \right) a_w}{(1-Ba_w) \left[1-a_w + \left(\frac{C}{T} \right) Ba_w \right]}$	[2, 10, 15]

เมื่อ EMC คือ ความชื้นสมดุล (%d.b.)

a_w คือ วอเตอร์แอกติวิตี (ไม่มีหน่วย)

T คือ อุณหภูมิ (K)

A, B, C, D คือ ค่าคงที่

3. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ

1) กัลยน้ำว่าสุก

2) สารละลายเกลืออิมิตัว 6 ชนิด คือ ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) แมกนีเซียมไนเตรท ($Mg(NO_3)_2$) โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และแอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีอยู่ในช่วง 0.10-0.82 ดังแสดงในตารางที่ 2

3.2 อุปกรณ์

1) ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ BINDER

2) ตาชั่ง ยี่ห้อ SARTORIUS รุ่น ED224S สามารถอ่านค่ามวลได้ทศนิยม 4 ตำแหน่ง มีค่าความผิดพลาด ± 0.0001 กรัม

3) ขวดโหลแบบมีฝาปิดชนิดมีปากกว้างรั้ว ขนาดความจุ 1 ลิตร

3.3 วิธีการทดลอง

1) นำสารละลายเกลืออิมิตัวแต่ละชนิดใส่ในขวดโหลในปริมาณขวดละ 300 มิลลิลิตร (คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของภาชนะต่อปริมาตรของสารละลายเกลืออิมิตัวเท่ากับ 3.3) ขวดโหล 1 ใบใส่สารละลายเกลืออิมิตัว 1 ชนิด

2) นำกัลยน้ำว่ามาตัดตามแนวขวางของผลกัลยให้มีความหนาประมาณ 0.3 เซนติเมตร แล้วแบ่งออกเป็น 6 ส่วนๆ ละประมาณ 15 กรัม

3) นำกัลยน้ำว่าที่แบ่งแล้วมาใส่ในตะแกรง นำไปวางในขวดโหล โดยไม่ให้ตะแกรงสัมผัสกับสารละลายเกลืออิมิตัว จากนั้นปิดฝาขวดโหลให้สนิท

4) นำขวดโหลใส่ในตู้อบแล้วควบคุมอุณหภูมิในตู้อบไว้ที่ $40^\circ C$

5) นำกัลยน้ำว่าในขวดโหลแต่ละขวดโหลมาชั่งน้ำหนักทุกวันจนกว่าน้ำหนักของกัลยน้ำว่าแต่ละขวดโหลมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า 0.002 กรัม

6) นำกัลยน้ำว่าในขวดโหลออกจากขวดโหลแล้วทำการอบแห้งในตู้อบต่อไปเพื่อหาน้ำหนักแห้งของกัลยน้ำว่าแล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความชื้นสมดุลจากสมการที่ (1)

7) ทำการทดลองตามขั้นตอนข้างต้น โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น $50^\circ C$, $60^\circ C$ และ $70^\circ C$

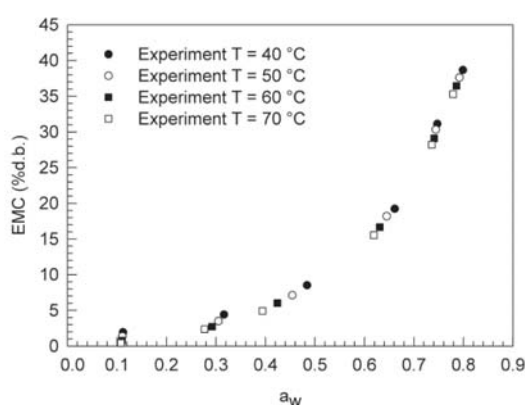
8) หาแบบจำลองสมการความชื้นสมดุลของกัลยน้ำว่าด้วยการเปรียบเทียบกับค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลอง โดยโปรแกรม MATLAB version 7 นำค่า Coefficient of Determination (R^2), Sum of Squared Error (SSE) และ Root Mean Square Error (RMSE) ของแบบจำลองแต่ละแบบมาเปรียบเทียบซึ่งสังเกตค่า R^2 มากที่สุดและ SSE กับ RMSE น้อยสุด

ตารางที่ 2 วอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่างๆ [18]

Salts	$10^\circ C$	$20^\circ C$	$30^\circ C$	$40^\circ C$	$50^\circ C$	$60^\circ C$	$70^\circ C$
(LiCl)	0.113	0.113	0.113	0.112	0.111	0.110	0.108
($MgCl_2$)	0.335	0.331	0.324	0.316	0.305	0.292	0.277
($Mg(NO_3)_2$)	0.574	0.544	0.514	0.484	0.454	0.424	0.394
(KI)	0.721	0.699	0.679	0.661	0.645	0.631	0.619
(NaCl)	0.757	0.755	0.751	0.747	0.744	0.741	0.736
($(NH_4)_2SO_4$)	0.821	0.813	0.806	0.799	0.792	0.786	0.779

4. ผลและการวิเคราะห์ผล

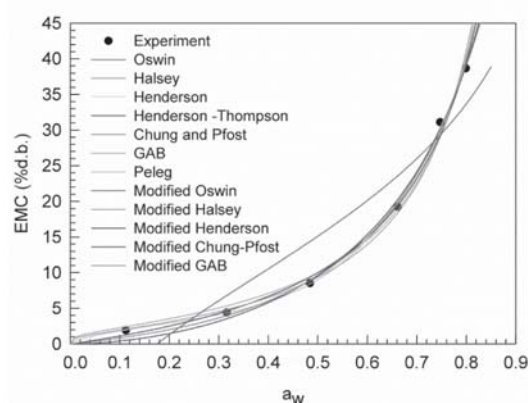
จากผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลในช่วงอุณหภูมิ 40°C - 70°C และช่วงวอเตอร์แอกติวิตี้ 0.10-0.82 พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะสูงขึ้นเมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตี้สูงขึ้นเนื่องจากที่สภาวะค่าวอเตอร์แอกติวิตี้สูงจะมีปริมาณความชื้นในอากาศอยู่สูงกว่าสภาวะที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ต่ำจึงทำให้ความชื้นในวัสดุที่สภาวะค่าวอเตอร์แอกติวิตี้สูงเกิดการสมดุลของความชื้นก่อนสภาวะที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ต่ำ ส่วนที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิต่ำลงเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำการกระตุ้นโมเลกุลของน้ำในวัสดุจะน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงจึงลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำในวัสดุได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ความชื้นในวัสดุที่อุณหภูมิต่ำเกิดการถ่ายเทความชื้นได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงดังแสดงในรูปที่ 1



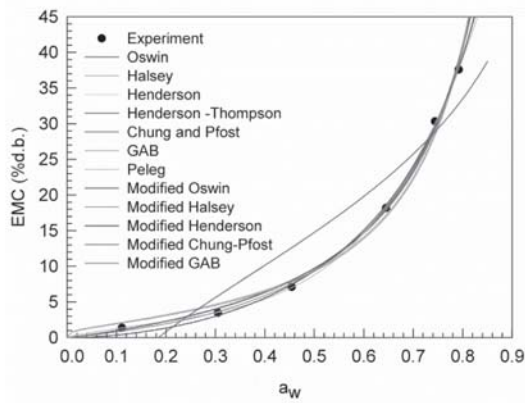
รูปที่ 1 ความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้า

จากผลการหาแบบจำลองความชื้นสมดุลที่เหมาะสมสำหรับกล้วยน้ำว้าพบว่าแบบจำลองของ Peleg สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าได้ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ ในทุกอุณหภูมิ วิเคราะห์จากค่า R^2 มากสุดและ SSE กับ RMSE น้อยสุดของแบบจำลองทั้ง 12 แบบ ที่อุณหภูมิ 40°C มี $R^2 = 0.999$, $SSE = 1.082$ และ $RMSE = 0.7356$ อุณหภูมิ 50°C มี $R^2 = 0.9999$, $SSE = 0.1596$ และ $RMSE = 0.2825$ อุณหภูมิ 60°C มี $R^2 = 0.9999$, $SSE = 0.0753$ และ $RMSE = 0.194$ อุณหภูมิ 70°C มี $R^2 = 1$, SSE

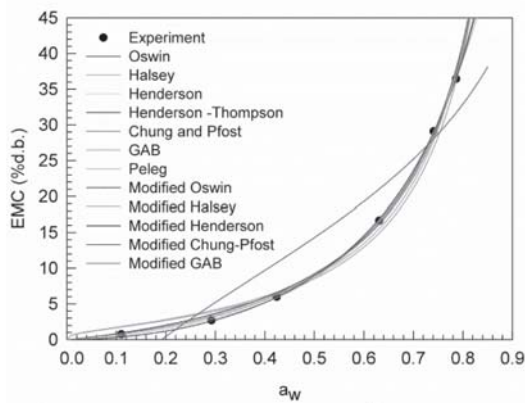
$= 0.002593$ และ $RMSE = 0.03601$ ดังแสดงในตารางที่ 3-6 และเมื่อแทนค่าคงที่ของแบบจำลองความชื้นสมดุลแต่ละแบบลงในแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2-5 พบว่ามีแบบจำลองความชื้นสมดุล 10 แบบ คือ Oswin, Halsey, Henderson, Henderson-Thompson, GAB, Peleg, Modified Oswin, Modified Halsey, Modified Henderson และ Modified GAB สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Modified Halsey ที่ทำนายค่าความชื้นสมดุลได้ดีน้อยกว่าที่สุดจากแบบจำลองความชื้นสมดุลทั้ง 10 แบบ อุณหภูมิ 40°C มี $R^2 = 0.991$, $SSE = 10.2$ และ $RMSE = 1.844$ อุณหภูมิ 50°C มี $R^2 = 0.9924$, $SSE = 8.602$ และ $RMSE = 1.693$ อุณหภูมิ 60°C มี $R^2 = 0.9933$, $SSE = 7.391$ และ $RMSE = 1.57$ อุณหภูมิ 70°C มี $R^2 = 0.9936$, $SSE = 6.793$ และ $RMSE = 1.505$ แต่มีแบบจำลองของ Chung and Pfof และ Modified Chung-Pfof ที่ทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าได้ไม่ดี ส่วนแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Peleg เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในแต่ละอุณหภูมิได้ผลดังแสดงในรูปที่ 6-10 พบว่าสามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าได้อย่างแม่นยำ



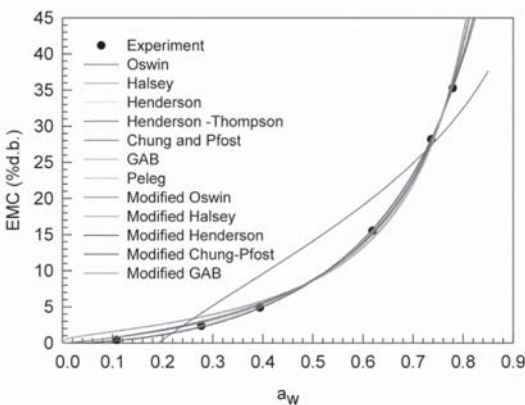
รูปที่ 2 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 40°C



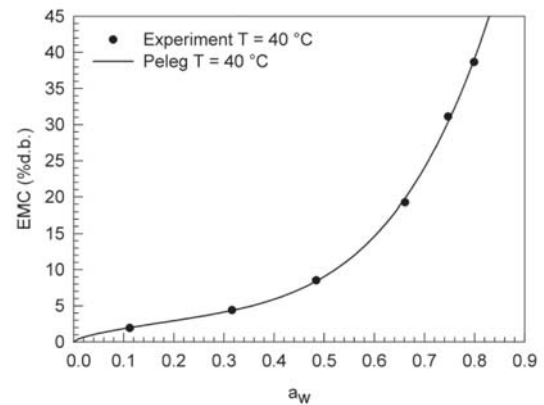
รูปที่ 3 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C



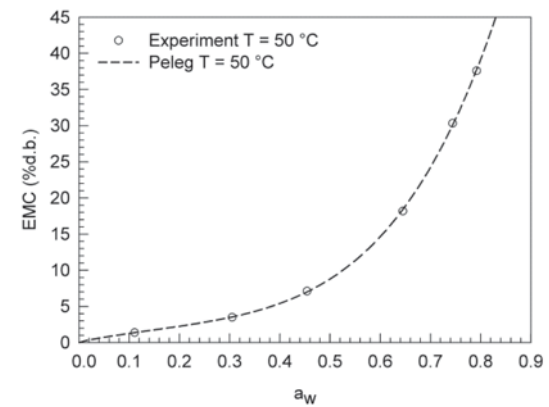
รูปที่ 4 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C



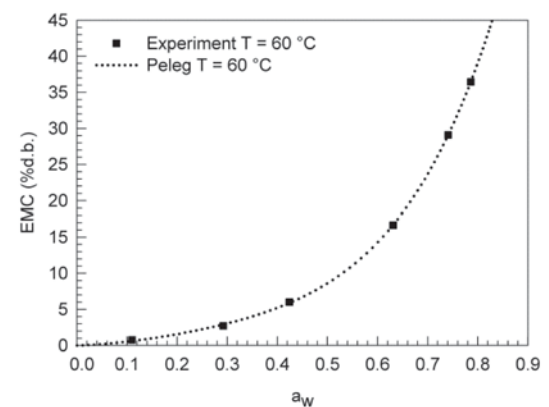
รูปที่ 5 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C



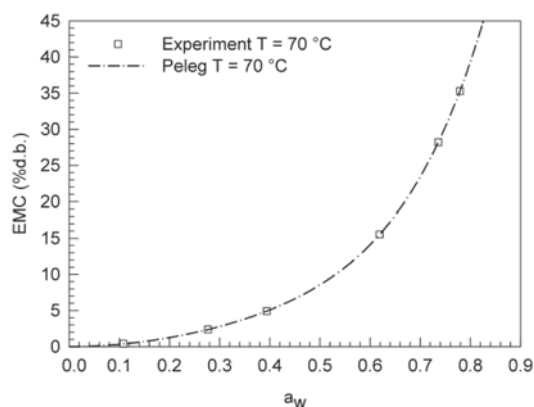
รูปที่ 6 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Peleg กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C



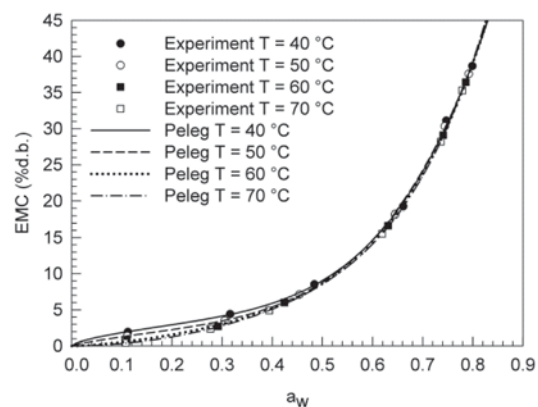
รูปที่ 7 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Peleg กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ 8 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Peleg กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C



รูปที่ 9 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Peleg กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 70°C



รูปที่ 10 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Peleg กับผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของแบบจำลองความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 40°C

Equation	R ²	SSE	RMSE	A	B	C	D
Oswin	0.9956	4.969	1.115	10.02	0.9952	-	-
Halsey	0.9925	8.499	1.458	1407	0.8123	-	-
Henderson	0.9956	5.016	1.12	0.0005662	0.6016	-	-
Henderson –Thompson	0.9956	5.016	1.293	0.0007248	-68.5	0.6016	-
Chung and Pfof	0.8942	119.6	6.313	0.061	-128.2	322.2	-
GAB	0.9972	3.109	1.018	116.4	0.7989	0.07844	-
Peleg	0.999	1.082	0.7356	8.136	0.6445	88.17	4.519
Modified Oswin	0.9956	4.969	1.287	-105.3	0.3683	1.005	-
Modified Halsey	0.991	10.2	1.844	-177	0.5698	0.7658	-
Modified Henderson	0.9956	5.016	1.293	0.0004615	71	0.6016	-
Modified Chung-Pfof	0.8942	119.6	6.313	280.9	-151.9	0.061	-
Modified GAB	0.9972	3.145	1.024	86.23	0.8124	32.11	-

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของแบบจำลองความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 50°C

Equation	R ²	SSE	RMSE	A	B	C	D
Oswin	0.9969	3.535	0.9401	9.617	1.037	-	-
Halsey	0.9924	8.551	1.462	1280	0.7737	-	-
Henderson	0.9985	1.719	0.6555	0.0005787	0.5857	-	-
Henderson -Thompson	0.9985	1.719	0.7569	0.0006318	-27.16	0.5857	-
Chung and Pfof	0.9014	110.9	6.08	0.06046	-143.2	304.4	-
GAB	0.999	1.177	0.6265	299	0.7931	0.02938	-
Peleg	0.9999	0.1596	0.2825	85.43	4.301	7.685	0.7829
Modified Oswin	0.9969	3.535	1.085	2117	-6.524	0.9643	-
Modified Halsey	0.9924	8.602	1.693	-302.6	0.941	0.7656	-
Modified Henderson	0.9985	1.719	0.7569	0.000528	31	0.5857	-
Modified Chung-Pfof	0.9014	110.9	6.08	286	-154	0.06046	-
Modified GAB	0.999	1.177	0.6262	439.8	0.7893	6.487	-

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของแบบจำลองความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 60°C

Equation	R ²	SSE	RMSE	A	B	C	D
Oswin	0.9981	2.104	0.7252	9.057	1.084	-	-
Halsey	0.9933	7.391	1.359	1151	0.735	-	-
Henderson	0.9998	0.2682	0.259	0.0006026	0.5668	-	-
Henderson -Thompson	0.9998	0.2682	0.299	0.0006619	-29.8	0.5668	-
Chung and Pfof	0.9081	100.6	5.791	0.06085	-160.5	285.4	-
GAB	0.9996	0.49	0.4041	367.5	0.81	0.02149	-
Peleg	0.9999	0.0753	0.194	82.36	5.174	18.49	1.544
Modified Oswin	0.9981	2.104	0.8374	-1088	3.295	0.9226	-
Modified Halsey	0.9933	7.391	1.57	1877	-5.633	0.7347	-
Modified Henderson	0.9998	0.2682	0.299	0.0005513	31	0.5668	-
Modified Chung-Pfof	0.9081	100.6	5.791	300	-151.7	0.06085	-
Modified GAB	0.9996	0.4887	0.4036	8205	0.8013	0.3247	-

ตารางที่ 6 ค่าคงที่ของแบบจำลองความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 70°C

Equation	R ²	SSE	RMSE	A	B	C	D
Oswin	0.9984	1.696	0.6511	8.753	1.119	-	-
Halsey	0.9936	6.786	1.302	1084	0.7067	-	-
Henderson	0.9999	0.09093	0.1508	0.0006102	0.5545	-	-
Henderson -Thompson	0.9999	0.09093	0.1741	0.000669	-30.16	0.5545	-
Chung and Pfof	0.9126	92.47	5.552	0.06164	-154.8	311.4	-
GAB	0.9995	0.5659	0.4343	129.8	0.8374	0.056	-
Peleg	1	0.002593	0.03601	82.66	6.113	28.04	1.929
Modified Oswin	0.9984	1.696	0.7518	-155.4	0.4787	0.8937	-
Modified Halsey	0.9936	6.793	1.505	-2122	6.19	0.7099	-
Modified Henderson	0.9999	0.09093	0.1741	0.0005608	30.2	0.5545	-
Modified Chung-Pfof	0.9126	92.47	5.552	327.2	-145.3	0.06164	-
Modified GAB	0.9995	0.56	0.4321	4667	0.8156	0.5478	-

5. สรุป

ความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 40°C, 50 °C, 60°C และ 70°C ช่วงวอเตอร์แอคติวิตี้ 0.10-0.82 พบว่าจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่าวอเตอร์แอคติวิตี้คือที่ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิต่ำลงและที่อุณหภูมิต่างกันค่าความชื้นสมดุลจะสูงขึ้นเมื่อค่าวอเตอร์แอคติวิตี้สูงขึ้นส่วนแบบจำลองความชื้นสมดุลที่ทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง คือ Oswin, Halsey, Henderson, Henderson –Thompson, GAB, Peleg, Modified Oswin, Modified Halsey, Modified Henderson และ Modified GAB โดยที่แบบจำลองความชื้นสมดุลของ Peleg สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าได้ดีที่สุดและมีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อนสะดวกต่อการนำไปใช้ทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้า

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sinija V R and Mishra H N. Moisture sorption isotherms and heat of sorption of instant (soluble) green tea powder and green tea granules. Journal of Food Engineering. 2008;86: 494–50.
- [2] Oyelade O J, Tunde-Akintunde T Y, Igbeka J C, Oke M O, Raji O Y. Modelling moisture sorption isotherms for maize flour. Journal of Stored Products Research. 2008; 44: 179–185.
- [3] Jeentada W, Chankrachang T, Chooklin S, Sirirak C. Comparison of mathematical models equilibrium moisture content for sheet rubber. KKU Engineering Journal. 2012; 39(1): 11-21. (In Thai).

- [4] Cordeiro D S, Raghavan G S V, Oliveira W P. Equilibrium Moisture Content Models for *Maytenus ilicifolia* Leaves. *Biosystems Engineering*. 2006; (94): 221–228.
- [5] Shivhare U S, Arora S, Ahmed J, Raghavan G S V. Moisture adsorption isotherms for mushroom. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol*. 2004; (37): 133–137.
- [6] Barrozo M A S, Silva A A M, Oliveira D T. The use of curvature and bias measures to discriminate among equilibrium moisture equations for mustard seed. *Journal of Stored Products Research*. 2008; (44): 65–70.
- [7] Li X, Cao Z, Wei Z, Feng Q, Wang J. Equilibrium moisture content and sorption isosteric heats of five wheat varieties in China. *Journal of Stored Products Research*. 2011; 47: 39–47.
- [8] Ghodake H M, Goswami T K, Chakraverty A. Moisture sorption isotherms, heat of sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. *Journal of Food Engineering*. 2007; 78: 827–835.
- [9] Bahloul N, Boudhrioua N, Kechaou N. Moisture desorption–adsorption isotherms and isosteric heats of sorption of Tunisian olive leaves (*Olea europaea* L.). *industrial crops and products*. 2008; 28: 162–176.
- [10] Raji A O and Ojediran J O. Moisture sorption isotherms of two varieties of millet. *food and bioproducts processing*. 2010: 1–7.
- [11] Phoungchandang S and Woods J L. Moisture diffusion and desorption isotherms for banana. *Food Engineering and Physical Properties*. 2000;65: 651–657.
- [12] Chen C. Moisture sorption isotherms of pea seeds. *Journal of Food Engineering*. 2003; 58: 45–51.
- [13] Samapundo S, Devlieghere F, Meulenaer B D, Atukwase A, Lamboni Y, Debevere J M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. *Journal of Food Engineering*. 2007; 79: 168–175.
- [14] Goula A M, Karapantsios T D, Achilias D S, Adamopoulos K G. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. *Journal of Food Engineering*. 2008; 85: 73–83.
- [15] Iguaz A and Virseda P. Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures. *Journal of Food Engineering*. 2007; 79:794–802.
- [16] Al-Muhtaseb A H, McMinn W A M, Magee T R A. Water sorption isotherms of starch powders Part 1: mathematical description of experimental data. *Journal of Food Engineering*. 2004; 61: 297–307.
- [17] Hossain M D, Bala B K, Hossain M A, Mondol M R A. Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. *Journal of Food Engineering*. 2001; 48: 103–107.
- [18] Sablani S S, Rahman M S, Labnza T P. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. John Wiley and Sons. 2001: A2.3.2.