ว. เกษตรศาสตร์ (วิทย.) 24 : 196 - 207 (2533)

การศึกษาพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม

Studies of Parameters for the Analysis of Papaya Glacé Drying

ศิวะ อัจฉริยวิริยะ [1] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ [2]

Siva Achariyaviriya and Somchart Soponronnarit

ABSTRACT

The paper describes the studies of parameters for the analysis of papaya glacé drying by conducting experiments and finding out appropriate equations to describe these parameters. From the study of drying rate, it was found that diffusion equation could explain the drying rate and that the diffusion coefficient increased exponentially with drying temperature. From the study of equilibrium moisture content by using saturated salt solution, it was found that when temperature increased, the equilibrium moisture content decreased if relative humidity was lower than 25% but increased if relative humidity was higher than 45%. The equation of Brunauer was found appropriated in describing the experimental results. Finally, it was found that density and specific heat increased linearly with moisture content.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม โดยทำการทดลองและฟิตกราฟหารูปแบบสมการที่เหมาะสม เพื่อใช้อธิบายพารามิเตอร์ดังกล่าว จากการศึกษาหาอัตราการอบแห้ง พบว่าสมการการแพร่ความชื้นสามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ดี และพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลเมื่ออุณหภูมิของอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้น จากการทดลองหาความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิระหว่าง 40–65°ซ. และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 10–90% โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นสมดุลลดต่ำลงในช่วงความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 25% แต่สูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 45% จากการเลือกสมการสำหรับอธิบายผลการทดลองความชื้นสมดุล 5 รูปแบบ พบว่า สมการของ Brunauer สามารถใช้ได้ผลดี และจากการทดลองหาความหนาแน่น และความร้อนจำเพาะ พบว่าความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นเมื่อความชื้นของมะละกอแช่อิ่มเพิ่มขึ้น

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand.

[2] คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

คำนำ

มะละกอเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญและรู้จักกันอย่างแพร่หลายมานานแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตร้อน นอกจากการบริโภคมะละกอสุกแล้ว ยังสามารถนำมาแปรรูป เช่น มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการอบแห้งระหว่างขั้นตอนการผลิต การวิเคราะห์การอบแห้งจะช่วยให้หาเงื่อนไขของการอบแห้งที่เหมาะสมและประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์นั้นจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมะละกอแช่อิ่ม เช่น ความชื้นสมดุล ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์การแพร่ เป็นต้น

จากการสำรวจเอกสารเกี่ยวกับวิธีการหาพารามิเตอร์ของวัสดุอาหาร สามารถสรุปได้ดังนี้ Hood (1961) ได้ทดลองหาความร้อนจำเพาะของแตงกวาโดยวิธีผสม พบว่า ที่ความชื้น 96% w.b. ให้ค่าความร้อนจำเพาะ 4.09 kJ/kg-° C ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการที่เสนอโดย Siebel (1892) ที่กล่าวว่า " ความร้อนจำเพาะจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับน้ำที่มีอยู่ในวัสดุอาหาร " พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน Turrel and Perrey (1957) พบว่า ค่าความร้อนจำเพาะของผลไม้ตระกูลส้มแต่ละชนิดที่ความชื้นเดียวกัน มีค่าความร้อนจำเพาะต่างกันน้อยมาก แต่ถ้าความชื้นต่างกัน จะมีค่าความร้อนจำเพาะต่างกัน Wolf *et al.* (1973) ได้ทดลองหาความชื้นสมดุลของกล้วย พบว่า เมื่อนำข้อมูลการทดลองมาฟิตกับสมการที่ใช้รูปแบบของ Henderson (1952) ได้ค่า variance of regression ต่ำกว่าที่ใช้รูปแบบของ Iglesias and Chirife (1978) Nip (1978) ได้ทดลองหาความชื้นสมดุลของมะละกอผสมเผือกผง การทดลองแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่แต่ละกลุ่มใช้อัตราส่วนระหว่างมะละกอต่อเผือกผงเท่ากับ 3 : 2 และ 1 : 2 พบว่า การฟิตกราฟที่ใช้รูปแบบของ Halsey (1948) จะได้ผลดี และกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนผสมของมะละกอสูงจะให้ความชื้นสมดุลสูงกว่า Pabis and Henderson (1961) ได้ทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของข้าวโพด โดยใช้สมการสำหรับการแพร่ของความชื้นของวัสดุทรง infinite slab ฟิตกราฟเข้ากับข้อมูลการทดลอง แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ พบว่า สมการที่ใช้รูปแบบ exponential สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดี

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการทำนายอัตราการอบแห้งของมะละกอแช่อิ่ม เช่น สัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นสมดุล ความร้อนจำเพาะและความหนาแน่น

ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้งอาหารโดยทั่วไปอาจแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ส่วนช่วงที่สองเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ในช่วงแรกนั้นปริมาณน้ำของวัสดุมีมากและอยู่อย่างอิสระที่ผิวของวัสดุ จึงสามารถระเหยได้รวดเร็ว เมื่อความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำลงจนกระทั่งต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต ความชื้นภายในเนื้อวัสดุจะมีค่าสูงกว่าที่ผิว ทำให้เกิดการแพร่ของน้ำจากภายในเนื้อวัสดุไปยังที่ผิว แล้วจึงระเหยกลายเป็นไอ เนื่องจากอัตราการแพร่ของน้ำมีค่าต่ำกว่าอัตราการระเหยน้ำที่ผิว อัตราการอบแห้งจึงถูกจำกัดด้วยอัตราการแพร่ของน้ำในเนื้อวัสดุ ดังนั้น ในช่วงนี้จึงเรียกว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ถ้าหากสมมติว่าการเคลื่อนที่ของน้ำอยู่ในรูปของเหลวเป็นส่วนใหญ่ และสมมติว่าเป็นไปตามกฎของ Fick จะได้ว่า

$$m_w = - AD \frac{\partial C}{\partial x}$$

เมื่อ m_w = อัตราการถ่ายเทมวล, kg/h

A = พื้นที่การถ่ายเทมวล, m^2

C = ความเข้มข้นของความชื้น, kg/m^3

x = ระยะ, m

D = สัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/h

เมื่อพิจารณาอัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าและออกจากปริมาตรบังคับ และอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลในปริมาตรบังคับ จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(D \frac{\partial C}{\partial x})$$

เมื่อหารด้วยความหนาแน่นของวัสดุ และสมมติให้สัมประสิทธิ์การแพร่ไม่ขึ้นกับความชื้นของวัสดุ จะได้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$$

เมื่อ M = ความชื้น มาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

t = เวลา, h

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทมวลในสามทิศทางซึ่งตั้งฉากกันจะได้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D (\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2}) \qquad \text{-------- (1)}$$

โดยมีภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขตดังนี้

$$M (x, y, z, o) = M_{in}$$
$$M (o, o, o, t) = M_{eq} \qquad \text{-------- (2)}$$
$$M (l_x, l_y, l_z, t) = M_{eq}$$

เมื่อ l_x, l_y และ l_z = ความหนาของวัสดุในทิศ x, y และ z ตามลำดับ
M_{in} = ความชื้นเริ่มต้น มาตรฐานแห้ง, เศษส่วน
M_{eq} = ความชื้นสมดุล มาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

เมื่อทำการหาคำตอบของสมการ (1) โดยมีภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขตตามสมการ (2) จะได้คำตอบสำหรับการแพร่ความชื้นในรูปทรงสี่เหลี่ยม ดังนี้

$$MR = (\frac{8}{\pi^2})^3 \left[\sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left\{ -(2i+1)^2 \frac{\pi^2}{l_x^2} Dt \right\} \right]$$

$$\left[\sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \exp\left\{ -(2j+1)^2 \frac{\pi^2}{l_y^2} Dt \right\} \right]$$

$$\left[\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} \exp\left\{ -(2k+1)^2 \frac{\pi^2}{l_z^2} Dt \right\} \right] \qquad \text{-------- (3)}$$

เมื่อ MR = อัตราส่วนความชื้น = $(M - M_{eq})/(M_{in} - M_{eq})$
M = ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุ มาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

ใช้มะละกอพันธุ์โกโก้ หั่นตามความยาวของผลหนาประมาณ 2 เซนติเมตร แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.7% เป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วนำมาลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 25 นาที หลังจากนั้นแช่ในน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 30 องศาบริกซ์ เพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมวันละ 10 องศาบริกซ์ จนกระทั่งความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 70 องศาบริกซ์ (Tanafranca *et al,* 1985) ความชื้นเริ่มต้นก่อนอบแห้งมีค่าประมาณ 50% มาตรฐานแห้ง

การหาความชื้นสมดุล

นำมะละกอที่ผ่านการแช่อิ่มมาตัดให้มีขนาดประมาณ 1 × 1 × 1 เซนติเมตร (ควรมีขนาดเล็กกว่านี้) แล้วนำมาใส่ตะแกรง แขวนไว้ในขวดที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวของ KNO_3, NaCl, $Mg(NO_3).6H_2O$, $MgCl_2.6H_2O$ และ LiCl นำขวดทั้ง 5 ใส่ไว้ในตู้อบ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 42, 45, 52 และ 62°ซ. ใช้เวลาประมาณ 12 วัน สำหรับการเกิดสมดุล จากนั้นนำตัวอย่างมาหาความชื้น

การหาสัมประสิทธิ์การแพร่

นำมะละกอที่ผ่านการแช่อิ่ม มาตัดเป็นทรงรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 1 × 1 × 1 เซนติเมตร แล้วนำไปหา

อัตราการอบแห้งในอุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้งทำการทดลองที่อุณหภูมิและความเร็วลมร้อนต่าง ๆ กัน โดยอบให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณ 15–19% มาตรฐานแห้ง อุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ระหว่าง ± 1° ซ. ความชื้นสัมพัทธ์อากาศจะแปรค่อนข้างน้อย และจะน้อยลงอีกเมื่ออุ่นอากาศให้ร้อนขึ้น (สมชาติ และ วิไลพร, 2530)

การหาความร้อนจำเพาะ

นำมะละกอที่ผ่านการแช่อิ่ม มาตัดให้มีขนาดประมาณ 1 × 1 × 1 เซนติเมตร (ควรมีขนาดเล็กกว่านี้) แล้วนำไปทดสอบในแคลอรีมิเตอร์ ทำการทดลองที่ความชื้นมะละกอแช่อิ่มต่าง ๆ กัน

การหาความหนาแน่น

นำมะละกอที่ผ่านการแช่อิ่ม มาตัดให้เป็นรูปทรงเหลี่ยม ชั่งน้ำหนัก ใช้เวอร์เนียร์วัดขนาดเพื่อคำนวณปริมาตร ทำการทดลองที่ความชื้นมะละกอแช่อิ่มต่าง ๆ กัน

การหาความชื้นวัสดุ

นำตัวอย่างชั่งน้ำหนักแล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 103°ซ. เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง แล้วคำนวณหาความชื้น

เครื่องมือวัดที่ใช้

เครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้เป็นเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม

แคลอรีมิเตอร์ที่ใช้เป็นกระป๋องทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร พร้อมแท่งกวน มีโฟมเป็นฉนวนความร้อนหนา 3 เซนติเมตร เทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่ด้านบน สามารถอ่านอุณหภูมิได้ละเอียด 0.5° ซ.

การวัดอุณหภูมิลมร้อนในอุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้งใช้ thermister ต่อเข้ากับ data logger ความละเอียดในการอ่าน ± 1° ซ.

ผล

จากการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของมะละกอแช่อิ่ม ที่อุณหภูมิระหว่าง 40° ซ. – 80° ซ. โดยใช้อุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้ง พบว่า ไม่ปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ คงมีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น เมื่อนำค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งของแต่ละอุณหภูมิมาวิเคราะห์สมการถดถอยโดยใช้สมการ (3) โดยลองใช้จำนวน 1 เทอม (i, j, k มีค่า 0) และ 3 เทอม (i, j, k มีค่า 0–2) จะได้ผลดัง Figure 1 จาก Figure 1 จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์โดยใช้จำนวน 3 เทอมให้ผลการฟิตกราฟได้ดีกว่ามาก ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวน 3 เทอม วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งของแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแต่ละอุณหภูมิตาม Table 1 (ค่า coefficient of correlation อยู่ในช่วง 0.90–0.95) และจากการวิเคราะห์สมการถดถอย โดยใช้ข้อมูลจาก Table 1 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิลมร้อน ได้

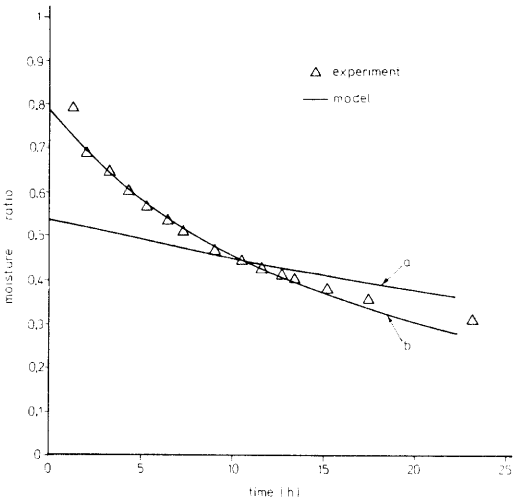


Figure 1. Results of curve fitting by using solution of diffusion equation.
a 1 term
b 3 terms

ความสัมพันธ์ดังนี้ (ค่า coefficient of correlation เท่ากับ 0.85)

$$D = 0.000917 \exp | -2877.5/(T+273) |$$

เมื่อ D = สัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/h

T = อุณหภูมิลมร้อน, °C

Table 1 Diffusion coefficient of papaya glacé.

Temperature (°C)	Diffusion coefficient ($m^2/hx10^{-7}$)	Temperature (°C)	Diffusion coefficient ($m^2/hx10^{-7}$)	Temperature (°C)	Diffusion coefficient ($m^2/hx10^{-7}$)
44.8	1.225	62.3	1.369	69.67	2.229
51.7	1.389	68.9	1.840	69.6	1.768
51.9	1.313	69.3	2.166	69.6	1.934
55.0	1.336	69.3	2.020	75.3	2.597
59.2	1.600	69.3	2.140	76.9	2.995

Figure 2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะสูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความดันไอภายในและภายนอกวัสดุแตกต่างกันมากขึ้น ทำให้น้ำเคลื่อนที่ผ่านออกทางรูพรุนได้มากขึ้น

จากการศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมร้อน โดยทดลองที่ความเร็ว 0.7 m/s และ 1.3 m/s พบว่า ความเร็วลมร้อนไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ทั้งนี้เป็นเพราะการอบแห้งอยู่ในช่วงความเร็วลดลง อัตราการระเหยน้ำจึงถูกจำกัดด้วยอัตราการแพร่ของน้ำภายในเนื้อผลิตภัณฑ์

จากการทดลองหาความชื้นสมดุลของมะละกอแช่อิ่ม ทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 40 – 65° ซ. และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 10 – 90% โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว (LiCl, $MgCl_2.6H_2O$, $Mg(NO_3)_2$, NaCl และ KNO_3) เป็นสารควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศและใช้ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ ได้ผลตาม Table 2 จากการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นสมดุล อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ โดยใช้รูปแบบสมการต่าง ๆ กันตาม Table 3 ได้ผลตาม Table 4

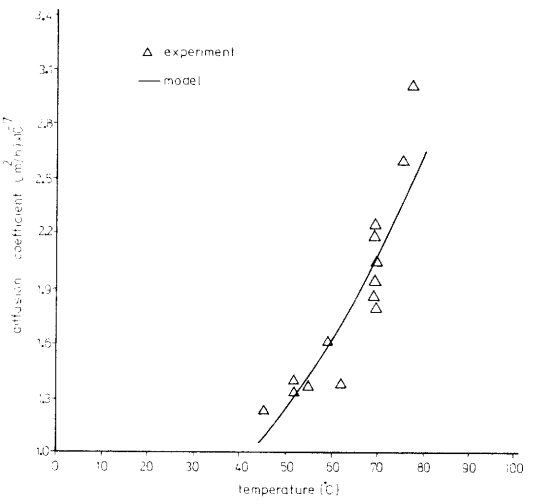


Figure 2. Diffusion coefficient of papaya glacé.

Table 2 Equilibrium moisture content of papaya glacé (sorption).

Temperature 42°C		Temperature 45°C		Temperature 52°C		Temperature 62°C	
RH	M_{eq} %[1]	RH%	M_{eq} %	RH%	M_{eq} %	RH%	M_{eq} %
11.2	9.97	11.2	7.79	11.2	7.61	11.2	6.89
11.2	8.54	11.2	7.92	11.2	7.46	11.2	7.20
31.9	12.68	31.7	8.78	31.4	8.76	30.7	9.32
31.9	11.01	31.7	8.87	31.4	8.52	30.7	8.34
48.7	15.43	47.7	12.78	46.0	12.27	43.5	12.57
48.7	14.04	47.7	12.92	46.0	12.34	43.5	12.18
75.1	41.22	74.9	40.79	74.3	40.51	73.6	39.73
75.1	41.09	74.9	39.12	74.3	39.91	73.6	41.10
87.4	70.79	86.4	70.36	84.6	69.14	82.1	69.70
87.4	72.07	86.4	68.20	84.6	70.41	82.1	71.71

[1] % dry basis

Table 3 Equations of equilibrium moisture content.

References	Forms	Forms of graph fitting
Henderson (1952)	$1-RH = \exp[-A(T+273)(M_{eq})^{B}]$	$\ln[-\ln(1-RH)] = \ln A+\ln(T+273)+B\ln M_{eq}$
Chung & Pfost (1967)	$\ln RH = -A\exp(-BM_{eq})/[R(T+273)]$	$\ln[-(T+273)\ln RH] = \ln(A/R)-BM_{eq}$
Brunauer et al. (1938)	$RH/[(1-RH)M_{eq}] = 1/(CM_m)+(C-1)RH/(CM_m)$	$RH/[(1-RH)M_{eq}] = 1/(CM_m)+(C-1)RH/(CM_m)$
Iglesias & Chirife (1978)	$M_{eq}+\sqrt{M_{eq}^2+M_{0.5}} = \exp[A+B.RH]$	$\ln[M_{eq}+\sqrt{M_{eq}^2+M_{0.5}}] = A+B.RH$
Oswin (1946)	$M_{eq} = A[RH/(1-RH)]^{B}$	$\ln M_{eq} = \ln A+B\ln[RH/(1-RH)]$

RH = relative humidity, decimal

M_{eq} = equilibrium moisture content, % dry basis

T = temperature, °C

R = gas constant = 8.314 kJ/kgmole-K

A,B,C = constants

M_m = monolayer moisture content, % dry basis

$M_{0.5}$ = moisture content at relative humidity of 0.5, % dry basis

Table 4 Results of graph fitting for equilibrium moisture content.

References	Temperature (°C)	Constants A or C	Constants B or M_m	R^2 according to forms of graph fitting in Table 3
Henderson (1952)	42-62	8.317×10^{-5}	1.0428	0.86
Chung and Pfost (1967)	42-62	4685.8	0.0366	0.84
Brunauer et al (1938)	42	16.62	9.06	0.95
Brunauer et al (1938)	45	6.21	9.54	0.88
Brunauer et al (1938)	52	4.33	10.61	0.80
Brunauer et al (1938)	62	3.55	11.88	0.79
Iglesias and Chirife (1978)	42	2.424	2.673	0.92
Iglesias and Chirife (1978)	45	2.178	2.946	0.92
Iglesias and Chirife (1978)	52	2.130	3.064	0.92
Iglesias and Chirife (1978)	62	2.101	3.205	0.94
Oswin (1946)	42	21.246	0.535	0.91
Oswin (1946)	45	18.955	0.595	0.89
Oswin (1946)	52	19.221	0.627	0.89
Oswin (1946)	62	20.088	0.667	0.91

จาก Table 4 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่ใช้รูปแบบของ Brunauer *et al.* (1938), Oswin (1946) และ Iglesias and Chirife (1978) จะมีค่าคงที่ของแต่ละอุณหภูมิ ดังนั้นเพื่อให้ใช้แบบจำลองได้ทุก ๆ อุณหภูมิในช่วงของการทดลอง จึงหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่เหล่านี้กับอุณหภูมิ โดยการวิเคราะห์สมการถดถอย ได้ผลดังนี้

รูปแบบสมการ Brunauer *et al.* (1938) มีค่า C และ M_m ดังนี้

$C = 163.15 \exp (-0.0647\ T)$ $R^2 = 0.79$

$M_m = 3.1987 + 0.1407\ T$ $R^2 = 0.99$

รูปแบบสมการ Oswin (1946) มีค่า A และ B ดังนี้

$A = 20.96 - 0.0217\ T$ $R^2 = 0.58$

$B = 0.31 + 0.00588\ T$ $R^2 = 0.88$

รูปแบบสมการ Iglesias and Chirife (1978) มีค่า A และ B ดังนี้

$A = 2.60 - 0.0082\ T$ $R^2 = 0.67$

$B = 1.80 + 0.0232\ T$ $R^2 = 0.84$

$M_{0.5} = 9.41 + 0.14\ T$

ค่าความชื้นสมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 50% ($M_{0.5}$) หาได้จากการนำข้อมูลการทดลองของแต่ละอุณหภูมิมา iterpolate จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์สมการถดถอย เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 50% กับอุณหภูมิ

จากการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 5 รูปแบบ (Figure 3-6) พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้รูปแบบของ Brunauer *et al.* (1938) ซึ่งมีค่า coefficient of determination ระหว่าง 0.79 – 0.95 สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ดีในช่วงความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 20% และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้รูปแบบของ Iglesias and Chirife (1978) ซึ่งมีค่า coefficient of determination ระหว่าง 0.92 – 0.94 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีเฉพาะ

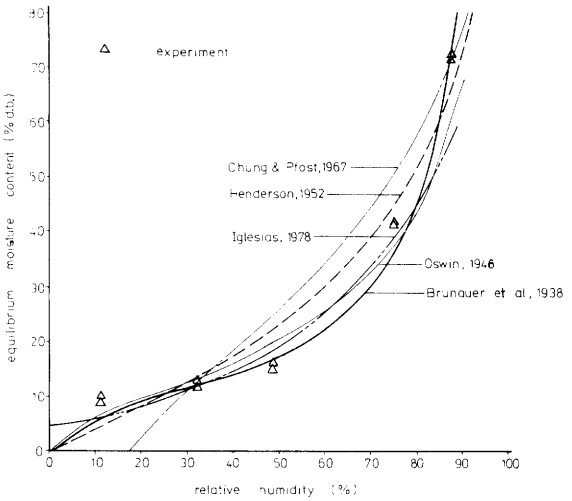


Figure 3. Sorption isotherms of papaya glacé at 42°C.

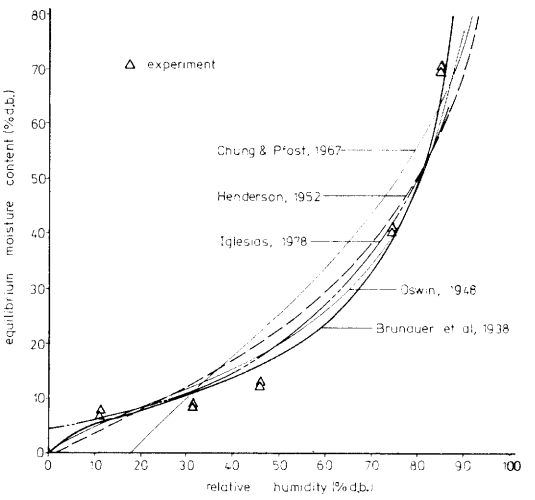


Figure 5. Sorption isotherms of papaya glacé at 52°C.

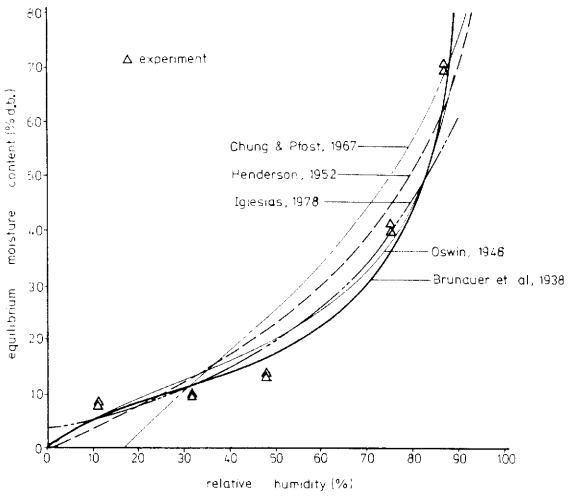


Figure 4. Sorption isotherms of papaya glacé at 45°C.

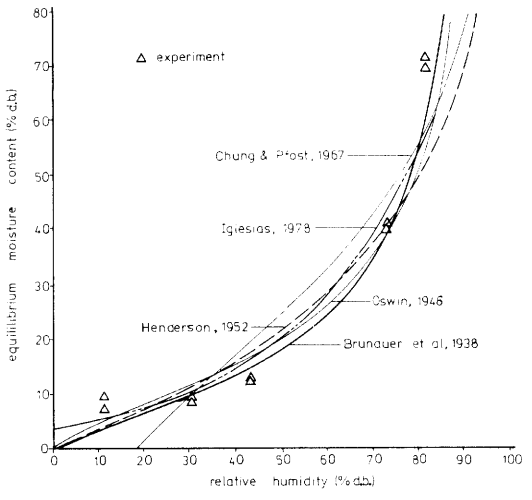


Figure 6. Sorption isotherms of papaya glacé at 62°C.

ช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่ำ ๆ (น้อยกว่า 30%) ส่วนแบบจำลองที่ใช้รูปแบบของ Oswin (1946) ให้ผลคล้ายคลึงกับของ Brunauer *et al.* (1938) แต่ให้ผลด้อยกว่า สำหรับแบบจำลองของ Henderson (1952) และ Chung and Pfost (1967) ไม่สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ดี

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่มีต่อความชื้นสมดุลของมะละกอแช่อิ่ม โดยการนำผลที่คำนวณได้จากสมการของ Brunauer *et al.* (1938) ที่แต่ละอุณหภูมิมาเขียนกราฟจะได้ดัง Figure 7 ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นสมดุลจะต่ำลง ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 0–25% แต่สูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศมากกว่า 45% ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ช่วงแรกที่มีความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความดันไอของมะละกอแช่อิ่มจะสูงขึ้น ทำให้ความชื้นสมดุลต่ำ ช่วงหลังที่มีความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อิทธิพลของความดันไอมีค่าน้อยกว่าอิทธิพลของน้ำตาลที่สามารถดึงไอน้ำในอากาศที่มีปริมาณสูงมาละลายได้ จึงทำให้ความชื้นสมดุลสูงขึ้น ซึ่งแตกต่างจากเมล็ดพืช กล่าวคือ กรณีของเมล็ดพืชเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นสมดุลจะต่ำลงตลอดช่วงของความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

ผลการทดลองหาความหนาแน่นของมะละกอแช่อิ่มแสดงใน Figure 8 จากการทดลองพบว่า เมื่อความชื้นมะละกอแช่อิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นจะสูงขึ้น และจากการวิเคราะห์สมการถดถอย โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกับความชื้นมะละกอแช่อิ่ม ได้ผลดังนี้

$$P = 1306 + 2.343\ M$$

เมื่อ P = ความหนาแน่น, kg/m^3

M = ความชื้นมะละกอแช่อิ่ม, % มาตรฐานแห้ง

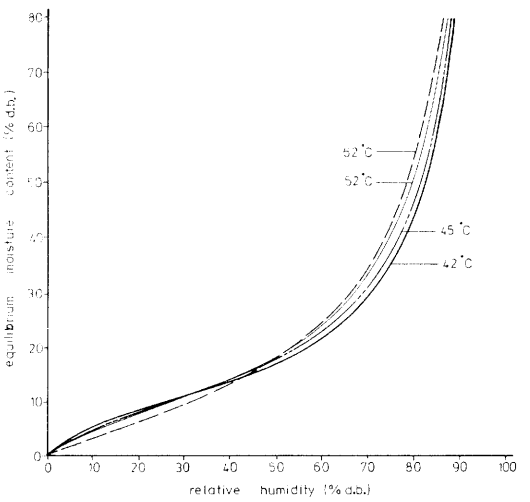


Figure 7. Sorption isotherms of papaya glacé calculated from equation of Brunauer *et al.* (1938).

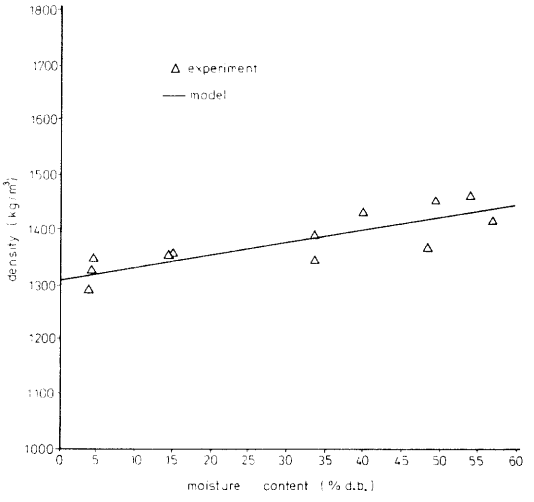


Figure 8. Density of papaya glacé.

ผลการทดลองหาความร้อนจำเพาะมะละกอแช่อิ่มแสดงใน Figure 9 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความชื้นมะละกอแช่อิ่มสูงขึ้น ความร้อนจำเพาะจะสูงขึ้น และจากการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความร้อนจำเพาะ กับความชื้นมะละกอแช่อิ่ม ได้ดังผลนี้

$$C = 1.0247 + 0.0522\ M$$

เมื่อ C = ความร้อนจำเพาะ kJ/kg°C

M = ความชื้นมะละกอแช่อิ่ม, % มาตรฐานแห้ง

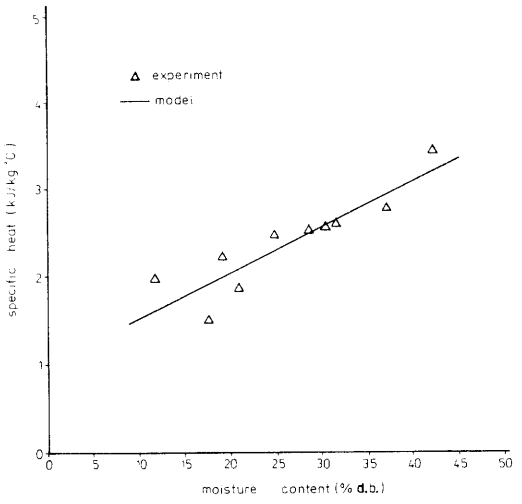


Figure 9. Specific heat of papaya glacé.

สรุป

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการทำนายอัตราการอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมานี้ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ทุก ๆ ค่าของอุณหภูมิลมร้อนช่วง 45 – 80° ซ. ความชื้นสมดุลตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 10 – 90% กับช่วงอุณหภูมิ 40 – 65° ซ. และความร้อนจำเพาะกับความหนาแน่น สามารถหาได้ทุก ๆ ค่าของความชื้นมะละกอแช่อิ่ม

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติที่ได้สนับสนุนโครงการวิจัยนี้ และใคร่ขอขอบคุณคุณวิชัย เทียมประชา คุณนวลวรรณ ทองสุพรรณและคุณวีณา วาฮับ ที่ช่วยเขียนรูปและพิมพ์ต้นฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และวิไลพร นพรัตน์ไกรลาศ, 2530 " อุปกรณ์ศึกษาอัตราการอบแห้งเมล็ดพืชและผลการทดสอบข้าวเปลือก " เอกสารหลังการประชุมวิชาการเรื่อง เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 28–30 ต.ค.

Brunauer, S., P. H. Emmett and E. Teller, 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Amer. Chem. Soc. 60 : 309 - 319.

Chung, D.S. and H.B. Pfost, 1967. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grain and their products. Tran. ASAE 10 : 549-557.

Halsey, G. 1948. Physical adsorption on non-uniform surfaces, J. Chem. Phy. : 931-937.

Henderson, S.M., 1952. A basic concept of equilibrium moisture. Agr. Eng. 33 : 29-32.

Hood, C.E. 1961. The apparent thermal diffusion of bulked cucumbers. Unpublished Master Thesis, North Carolina State University.

Iglesias, H.A. and J. Chirife, 1978. An empirical equation for fitting water sorption isotherms of fruits and related products. Can. Inst. Food Sci. Technol. J. 11 : 83-92.

Nip, W.K. 1978. Development and storage stability of drum-dried guava and papaya-taro flakes. J. Food Sci. 44 : 222.

Oswin, G.R. 1946. The kinetics of package life. III. The isotherm. J. Chem. Ind. (London) 65 : 419-421.

Pabis, S., and S.M. Henderson, 1961. Grain drying theory II. A critical analysis of the drying curve for shell maize. J. Agr. Eng. Res. 6 : 272-277.

Siebel, E. 1892. Specific heat of various products. Ice and Refrigeration 2 : 256-257.

Tanafranca, D.E., L.B.Farre, L.C.Angeles and M.R. Soriano, 1985. Dehydration technologies of some Philippine fruits, Proceeding on Food Research and Technology, 5th ASEAN Working Group, Bangkok.

Turrell, F.M. and R.L. Perry, 1957. Specific heat and heat conductivity of citrus fruit, Proc. of Amer. Soc. Hort. Sci. 70 : 261-265.

Wolf, W., W.E.L. Spiess and G. Jung, 1973. Die Wasserdampfsorptionsisothermen einiger in der Literatur bislangwening berucksichtigter lebensmittel. Lebensm. Wiss. Technol. 6 : 94. From " Handbook of Food Isotherms : Water Sorption Parameters for Food and Food Components " by H.A. Iglesias and J. Chirife, 1982, Academic Press. Inc., New York.