

การศึกษาพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งสับปะรดแช่เย็น

The Study of Parameters for the Analysis of Pineapple Glacé Drying

อารีย์ เทียนไชย¹ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์²
Aree Teanchai and Somchart Soponronnarit

ABSTRACT

The objectives of this study are to determine experimentally some properties of pineapple glacé such as equilibrium moisture content, moisture diffusion coefficient, density and specific heat. These parameters are useful and necessary for drying analysis. The equations describing these parameters were found out by curve fitting using least square technique.

The equilibrium moisture content was determined by static method using saturated salt solution. It was found that equilibrium moisture content decreased with the temperature for relative humidity range from 0-35 percent, but increased with the temperature for relative humidity higher than 45 percent. The equation of Iglesias & Chirife, 1978 was found to be accurate to describe the experimental results.

The results of the drying of pineapple glacé showed that moisture diffusion coefficient increased exponentially with drying temperature and the effect of air velocity was not significant. The temperature range from 55-65°C was suitable for drying pineapple glacé regarding to good quality.

For other parameters such as density and specific heat, it was found that the density increased linearly with moisture content in dry basis and specific heat increased linearly with moisture content in wet basis.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการศึกษาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์การอบแห้งสับปะรดแช่เย็น ซึ่งได้แก่ ความชื้นสมดุล สัมประสิทธิ์การแพร่ ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น โดยทำการทดลองและวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้อธิบายพารามิเตอร์ดังกล่าว

จากการทดลองหาความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิระหว่าง 50-72°C และความชื้นสัมพัทธ์ 10-80% โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นสมดุลจะลดต่ำลงในช่วงความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 35% แต่มีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 45% และจากการเลือกรูปแบบสมการสำหรับอธิบายผลการทดลองความชื้นสมดุลจาก 6 รูปแบบ สมการของ Iglesias & Chirife

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

² คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

(1987) สามารถใช้ได้ผลดี และสมการการแพร่ ความชื้นสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดี ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเอ็กซีโป-เนนเชียล เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้น และความเร็วลมร้อนในการอบแห้งไม่มีผลต่อค่าสัม-ประสิทธิ์การแพร่ สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการอบแห้งสับปะรดเชื่อม อยู่ในช่วง 55-65°ซ นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น เมื่อความชื้นของสับปะรดเชื่อมเพิ่มขึ้น

กานำ

การแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรจำพวกผัก และผลไม้โดยผ่านกระบวนการอบแห้งกำลังได้รับการส่งเสริมในการผลิต เพราะเป็นการนำเอาผลผลิตทางการเกษตรบางชนิดที่ประสบปัญหาการาคาผลผลิตตกต่ำ ไม่สามารถเก็บได้นาน มาแปรรูปเพื่อให้เก็บได้นานขึ้น อีกทั้งยังเป็นการสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจ การวิเคราะห์การอบแห้งเพื่อหาเงื่อนไขของการอบแห้งที่เหมาะสมจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย และช่วยยกระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่ในการวิเคราะห์นั้นต้องทราบพารามิเตอร์ที่จำเป็นได้แก่ ความชื้นสมดุล สัมประสิทธิ์การแพร่ ความร้อนจำเพาะและความหนาแน่น เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาพารามิเตอร์ที่จำเป็นดังกล่าว ต่อการทำนายการอบแห้งของสับปะรดเชื่อม โดยทำการทดลองและวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสม

จากการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการ และผลของผู้ที่ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ด้านการอบแห้งของวัสดุอาหารนั้น สามารถสรุปได้ดังนี้ Siebel (1892) ได้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้นของอาหาร ผัก และผลไม้ในลักษณะเชิงเส้น ภายในสมมุติฐานที่ว่า “ค่าความร้อนจำเพาะ

ของวัสดุเท่ากับผลรวมค่าความร้อนจำเพาะของน้ำที่อยู่ในวัสดุกับค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อแห้งของวัสดุ” ซึ่งก็ได้มีผู้ทำการทดลอง (Hood, 1961 ; Frechette and Zahradnik, 1968 ; Parker, 1966) หาค่าความร้อนจำเพาะของผักและผลไม้ เช่น แดงกวา แอปเปิ้ล และเชอร์รี่เปรี้ยว ที่ความชื้นประมาณ 90% มาตรฐานเปียก ปรากฏว่าค่าความร้อนจำเพาะที่ทดลองได้มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Siebel เล็กน้อย Charm (1971) ได้เสนอสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะของอาหารซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนประกอบต่าง ๆ ในอาหารนั้น (ไขมัน ของแข็ง น้ำ) Turrell and Perry (1957) ได้ทำการทดลองหาความร้อนจำเพาะของผลไม้ประเภทส้ม มะนาว และองุ่นด้วยวิธีของผสม ได้ค่าความร้อนจำเพาะต่างกัน

สำหรับความชื้นสมดุลของอาหาร ได้มีผู้สนใจศึกษาและสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุล อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีทั้งสมการทางทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และสมการจากผลการทดลอง (Brunauer *et al.*, 1938 ; Oswin, 1946 ; Halsey, 1948 ; Henderson, 1952 ; Chung and Pfof, 1967 ; Iglesias and Chirife, 1978) และได้มีผู้ทำการทดลองหาความชื้นสมดุลของอาหารที่มีน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ เช่น กล้วย รุทปีท องุ่น พีช แพร และสตอเบอรี่ เป็นต้น (Saravacos and Stinchfield, 1965 ; Iglesias *et al.*, 1975) เมื่อเลือกใช้สมการของ Iglesias and Chirife (1978) พบว่าสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นได้ดีในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10 ถึง 80% โดยให้ค่า Variance of regression ต่ำกว่า 0.02 Saravacos (1967) ได้รายงานว่ากรรมวิธีของการทำให้แห้งมีผลต่อการดูดซับความชื้นของเส้นไอโซเทอม (isotherms) ของแอปเปิ้ลและมันฝรั่ง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ทำให้แห้งโดยใช้ความเย็นจะมีความชื้น

มากกว่าการทำให้แห้งโดยใช้ลมเป่า Bolin (1980) รายงานว่าค่าความชื้นสมดุลไอโซเทอมขององุ่นแห้งที่ผ่านการทำให้แห้งโดยใช้แสงอาทิตย์ มีค่าต่ำกว่าองุ่นที่แห้งโดยใช้สุญญากาศ Nip (1978) ได้ทดลองหาความชื้นสมดุลของมะละกอผสมเปลือกผงในอัตราส่วน 3 : 2 และ 1 : 2 พบว่ารูปแบบสมการของ Halsey (1948) สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ดี คิวะ และสมชาติ (2531) ได้ทดลองหาความชื้นสมดุลของมะละกอแช่เย็น ปรากฏว่ารูปแบบสมการของ Brunauer *et al.* (1938) สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ดีในช่วงความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 20%

Crank (1975) ได้วิเคราะห์สมการที่ใช้คำนวณการแพร่ความชื้นของวัสดุรูปทรง infinite slab, infinite cylinder, ทรงกระบอก และทรงกลม ซึ่งก็มีผู้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์หลายสมการเพื่อใช้อธิบายการถ่ายเทความชื้นในวัสดุมาอย่างผิว Hougen *et al.* (1939) ได้แนะนำว่าถึงแม้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะขึ้นอยู่กับความชื้น แต่ในการแก้ปัญหาควรสมมุติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ Pabis and Henderson (1961) ได้ทดลอง

หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวโพด โดยใช้สมการการแพร่ความชื้นของวัสดุทรง infinite slab แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิได้สมการในรูปแบบ exponential ในทำนองเดียวกัน คิวะ และสมชาติ (2531) ได้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของมะละกอแช่เย็น ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิในลักษณะเดียวกัน คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะมีค่าสูงขึ้น

ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้งอาหารสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่กับช่วงอัตราการอบแห้งลดลง แต่ในการอบแห้งอาหารซึ่งมีความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤติ (ขึ้นอยู่กับลักษณะอาหารและสภาวะในการอบแห้ง) จะปรากฏเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ในการอบแห้งถ้าสมมุติให้การเคลื่อนที่ของน้ำในเนื้อวัสดุอยู่ในรูปของของเหลวเป็นส่วนใหญ่ และเป็นไปตามกฎของ Fick จะสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลมวลได้ว่า

$$\partial M / \partial t = D [\partial^2 M / \partial r^2 + (A/r) \partial M / \partial r] \quad (1)$$

โดยที่ $A = 0$ สำหรับค่าการแพร่ของความชื้นในวัสดุแผ่นกว้างมาก (infinite slab)

$A = 1$ สำหรับค่าการแพร่ของความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก

$A = 2$ สำหรับค่าการแพร่ของความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม

M = ความชื้น มาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

t = เวลา, h

r = ระยะทางการแพร่ความชื้นสำหรับวัสดุแผ่นกว้างมาก หรือ ระยะรัศมีการแพร่ความชื้นสำหรับวัสดุทรงกระบอกหรือทรงกลม, m

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/h

เมื่อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตสำหรับวัสดุแผ่นกว้างมากดังต่อไปนี้

$$M(x, t) = M_{in} \quad , \quad t = 0 \quad , \quad 0 \leq x \leq L$$

$$M(x, t) = M_{eq} \quad , \quad x = 0 \quad , \quad t > 0$$

$$M(x, t) = M_{eq} \quad , \quad x = L \quad , \quad t > 0$$

และกำหนดให้ $MR(x,t) = (M - M_{eq}) / (M_{in} - M_{eq})$ จะสามารถหาคำตอบของสมการ (1) ได้ดังนี้

$$\overline{MR}(t) = (8/\pi^2) \sum_{m=0}^{\infty} [1/2 (2m+1)^2] \exp [-(2m+1)^2 \pi^2 Dt/L^2] \quad (2)$$

เมื่อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต ของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก ดังนี้

$$M(r,t) = M_{in} \quad , \quad t = 0 \quad , \quad 0 \leq r \leq r_0$$

$$M(r,t) = M_{eq} \quad , \quad r = r_0 \quad , \quad t > 0$$

และกำหนดให้ $MR(r,t) = (M - M_{eq}) / (M_{in} - M_{eq})$ จะสามารถหาคำตอบของสมการ (1) ได้ดังนี้

$$\overline{MR}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [4/(\lambda_n r_0)^2] \exp [-(\lambda_n r_0)^2 (Dt/r_0^2)] \quad (3)$$

เมื่อ	MR	= อัตราส่วนความชื้น
	$\overline{MR}$	= อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย
	M_{in}	= ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ มาตรฐานแห้ง เศษส่วน
	M_{eq}	= ความชื้นสมดุลของวัสดุ มาตรฐานแห้ง เศษส่วน
	L	= ความหนาของวัสดุแผ่นกว้างมาก m
	r_0	= รัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก m
	$\lambda_n r_0$	= ค่าที่สอดคล้องกับ $J_0(\lambda_n r_0) = 0$ ซึ่ง $n = 1, 2, 3, \dots$

สำหรับสมการการแพร่ความชื้นของวัสดุทรงกระบอกสั้น (มีความยาว L และรัศมี r_0) นั้น ให้พิจารณาการตัดกันของวัสดุแผ่นกว้างมาก ซึ่งมีความหนาเท่ากับ L กับวัสดุทรงกระบอกยาวมาก ซึ่งมีรัศมีเท่ากับ r_0 จะได้สมการดังนี้

$$\overline{MR}(t) = (32/\pi^2) \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [1/(2m+1)^2] [1/(\lambda_n r_0)^2] \exp [-(2m+1)^2 \pi^2 Dt/L^2 - (\lambda_n r_0)^2 Dt/r_0^2] \quad (4)$$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม

แคลอริมิเตอร์ ประกอบด้วยกระป๋องทองแดง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร พร้อมแท่งกวน มีโฟมเป็นฉนวนความร้อนหนา 3 เซนติเมตร มีเทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่ด้านบน สามารถอ่านอุณหภูมิได้ละเอียด 0.5 °ซ

Thermister และ data logger ความละเอียดในการอ่าน 0.1 °ซ ใช้ในการวัดและบันทึกอุณหภูมิความร้อนในอุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้ง

Colour Difference Meter และชุดวัดเทียบสี R.H.S. Colour Chart ซึ่งเครื่องแรกมีการบันทึกการอ่านค่าสีด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนชุดวัดเทียบสีจะต้องใช้สายตาในการประมาณระดับสี

วิธีการ

การเตรียมตัวอย่างสับประรดแช่อิ่ม

ใช้สับประรดพันธุ์ปัตตาเวียร์หั่นเป็นแว่นกลมหนาประมาณ 2 เซนติเมตร นำมานึ่งด้วยไอน้ำประมาณ 15 นาที แล้วทำให้เย็นทันที หลังจากนั้นนำไปแช่น้ำเชื่อมซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 องศาบริกซ์ เพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมวันละ 10 องศาบริกซ์ จนกระทั่งความเข้มข้นวันสุดท้าย

ที่จะแช่เป็น 70 องศาบริกซ์ ให้เติมสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ 0.1% โดยน้ำหนักของน้ำเชื่อม (Tanafranca *et al.* 1985) ความชื้นเริ่มต้นของสับปะรดแช่อิ่มที่เตรียมได้มีค่าประมาณ 80% มาตรฐานแห้ง

การหาความชื้นสมดุล

นำสับปะรดแช่อิ่มมาตัดให้มีขนาดประมาณ $5 \times 5 \times 1$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3) แล้วนำมาใส่ตะแกรงลวดแขวนไว้ในขวดที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวของ KNO_3 , NaCl , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ LiCl นำขวดทั้ง 5 ใบ ใส่ไว้ในตู้อบ ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 50, 57, 65 และ 72°C ใช้เวลาประมาณ 15 วันสำหรับการเกิดสมดุล จากนั้นนำตัวอย่างมาหาความชื้น

การหาสัมประสิทธิ์การแพร่

นำสับปะรดแช่อิ่มมาตัดเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.2 มม. และความยาวประมาณ 15 มม. แล้วนำไปหาอัตราการอบแห้งในอุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้งซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศ (สมชาติ และ วิไลพร 2530) โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ $45-75^\circ\text{C}$ และความเร็วมรณะ 0.8 และ 1.3 เมตร/วินาที และอบให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณ 16-19% มาตรฐานแห้ง

หลังจากนั้นนำสับปะรดที่ผ่านการอบแห้งมาสังเกตลักษณะและทำการวัดสีด้วย Colour Difference Meter และวัดเทียบสีด้วย R.H.S. Colour Chart

การหาความร้อนจำเพาะ

นำสับปะรดแช่อิ่มมาหั่นให้มีขนาดประมาณ $5 \times 5 \times 0.5$ มม.³ ทำการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้แคลอรีมิเตอร์ที่ความชื้นของสับปะรดแช่อิ่มต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในช่วง 10-80% มาตรฐานแห้ง

การหาความหนาแน่น

นำสับปะรดแช่อิ่มมาตัดเป็นทรงสี่เหลี่ยม ขั้ว

น้ำหนัก และใช้เวอร์เนียรวัดขนาดเพื่อคำนวณปริมาตร ทำการทดลองที่ความชื้นสับปะรดแช่อิ่มต่าง ๆ ในช่วง 10-80% มาตรฐานแห้ง

การหาความชื้น

นำตัวอย่างซึ่งน้ำหนักและนำเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง แล้วคำนวณหาความชื้น

ผล

จากการทดลองหาความชื้นสมดุลของสับปะรดแช่อิ่ม ที่อุณหภูมิระหว่าง $50-72^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 10-80% โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 1-4 จากการวิเคราะห์สมการถดถอย โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิความชื้นสมดุลและความชื้นสัมพัทธ์อากาศโดยใช้รูปแบบสมการต่าง ๆ กัน ดัง Table 1. ได้ผลดังแสดงใน Table 2. ซึ่งค่าคงที่ในสมการ ของ Brunauer *et al.* (1938), Iglesias and Chirife (1978) และ Oswin (1946) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ต่าง ๆ กับอุณหภูมิด้วย ดังแสดงใน Table 3.

จากการเปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นสมดุลโดยสมการทั้ง 6 รูปแบบดัง Figure 1-4 พบว่าสมการที่สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ดีในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 10-80% คือ สมการของ Brunauer *et al.* (1938), Iglesias and Chirife (1978) และ Halsey (1948) รองลงมาคือ สมการของ Oswin (1946) ส่วนสมการของ Chung and Pfoest (1967) และ Henderson (1952) นั้นไม่เหมาะสมในการใช้อธิบายผลการทดลอง และจากการพิจารณาเปรียบเทียบสมการต่าง ๆ โดยใช้วิธีสถิติวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานระหว่างค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากสมการกับผลการทดลอง พบว่ารูปแบบสมการของ Iglesias and

Table 1 Equations of equilibrium moisture content .

Equations of	Forms	Forms for regression analysis
Brunauer <i>et al.</i> (1938)	$\frac{RH}{(1 - RH)M_{eq}} = \frac{1}{C.M_m} + \frac{(C - 1) RH}{C.M_m}$	$\frac{RH}{(1 - RH)M_{eq}} = \frac{1}{C.M_m} + \frac{(C - 1) RH}{C.M_m}$
Iglesias & Chirife (1978)	$\ln [M_{eq} + \sqrt{M_{eq}^2 + M_{0.5}^2}] = A + B.RH$	$\ln [M_{eq} + \sqrt{M_{eq}^2 + M_{0.5}^2}] = A + B.RH$
Oswin (1946)	$M_{eq} = A [RH / (1 - RH)]^n$	$\ln M_{eq} = \ln A + n \ln [RH / (1 - RH)]$
Halsey (1948)	$RH = \exp \left[- \frac{A.M_{eq}^B}{R (T + 273)} \right]$	$\ln [-R(T + 273) \ln RH] = \ln A + B \ln M_{eq}$
Chung & Pfof (1967)	$\ln RH = \frac{-A \exp (-B.M_{eq})}{R (T + 273)}$	$\ln [-R(T + 273) \ln RH] = \ln A - B.M_{eq}$
Henderson (1952)	$1 - RH = \exp [-A(T + 273) M_{eq}^B]$	$\ln \left[- \frac{1}{(T + 273)} \ln (1 - RH) \right] = \ln A + B \ln M_{eq}$

where RH = relative humidity, decimal
 M_{eq} = equilibrium moisture contents, % d.b.
 M_m = monolayer moisture content, % d.b.
 $M_{0.5}$ = moisture content at 50% RH, % d.b.
T = temperature, °c
R = gas constant = 8.314 KJ/kg.mole - K
A,B,C,n = constants

Table 2 Constants in equations of equilibrium moisture content of pineapple glaze'.

Equations of	Temperature °C	Constants			R
		A or C	B or M_m	n or $M_{0.5}$	
Brunauer <i>et al.</i> (1938)	50	226.31	6.73	-	0.97
	57	17.29	7.56	-	0.98
	65	6.83	8.44	-	0.97
	72	2.73	12.60	-	0.82
Iglesias & Chirife (1978)	50	2.37	2.36	14.80	0.99
	57	2.23	2.57	15.35	0.99
	65	2.11	2.77	14.95	0.98
	72	1.91	3.49	18.85	0.99
Oswin (1946)	50	17.45	-	0.48	0.98
	57	16.67	-	0.54	0.98
	65	16.23	-	0.59	0.97
	72	18.99	-	0.77	0.99
Halsey (1948)	50-72	36923.21	-1.0587	-	0.97
Chung & Pfost (1967)	50-72	6974.55	0.0611	-	0.93
Henderson (1952)	50-72	6.7291×10^5	1.1595	-	0.94

Table 3 Equations relating constants and temperature (equations of Brunauer *et al.* 1938, Iglesias and Chirife, 1978 and Oswin, 1946).

Equations of	Constants		Equations	R
Brunauer <i>et al.</i> (1938)	M_m	M_m	$= 1/[0.330136 - 0.002979 T]$	0.97
	C	C	$= \exp [-8.85642 + 688.199/T]$	0.94
Iglesias & Chirife (1978)	$M_{0.5}$	$M_{0.5}$	$= 1/[0.100346 - 0.00063 T]$	0.92
	A	A	$= 3.40318 - 0.020486 T$	0.98
	B	B	$= 1/[0.728827 - 0.005964 T]$	0.95
	A	A	$= T/[0.076149 T - 0.93664]$	0.99
Oswin (1946)	N	N	$= 1/[3.74933 - 0.033061 T]$	0.97

Chirife (1978) ให้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำสุด

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อความชื้นสับปะรดเชื่อม โดยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมมูลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 50-72 °ซ Figure 5. ตามรูปแบบสมการของ Iglesias and

Chirife (1978) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความชื้นสมมูลจะมีค่าต่ำลงในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 0-35% แต่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 45% ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ความดันไอของสับปะรดเชื่อมจะสูงขึ้น ทำให้ความชื้นสมมูลมีค่าต่ำลง ส่วนในช่วงหลัง

การที่ความชื้นสมดุลมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เพราะอิทธิพลของความดันไอน้ำน้อยกว่าอิทธิพลของน้ำตาลที่สามารถดึงไอน้ำในอากาศที่มีปริมาณสูงมาละลายได้ จึงทำให้ความชื้นสมดุลมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแตกต่างจากเมล็ดพืชจากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ความชื้นของสับประรดแช่แข็ง ช่วงอุณหภูมิ 45-75 °ซ พบเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น Figure 6. เมื่อนำค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งของแต่ละอุณหภูมิมาวิเคราะห์สมการถดถอยโดยใช้สมการ (4) โดยเลือกใช้จำนวนเทอมที่มีความสำคัญ ($m = 0, 1, 2, 3, 4$ และ $n = 1, 2,$

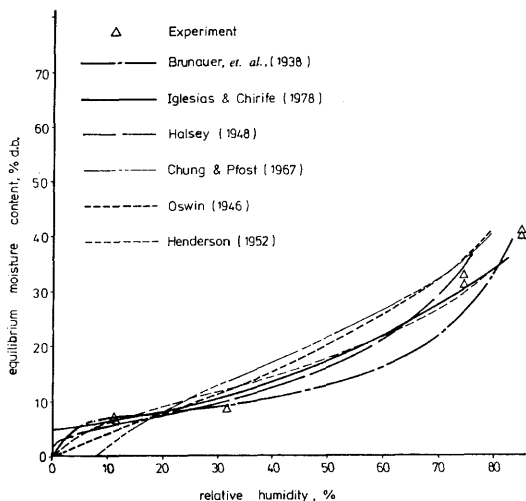


Figure 1 Comparison between experimental and calculated moisture isotherms of pineapple glacé at 50°C

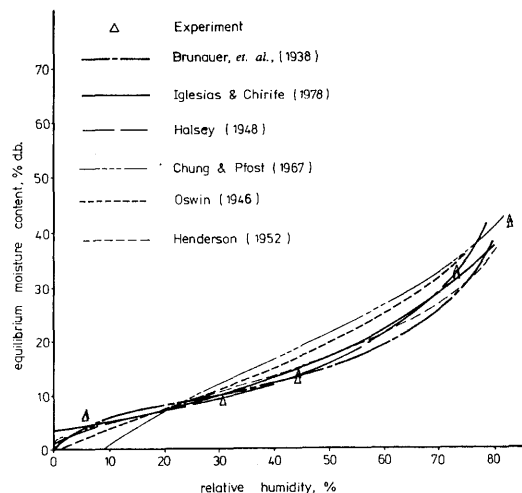


Figure 2 Comparison between experimental and calculated moisture isotherms of pineapple glacé at 57°C.

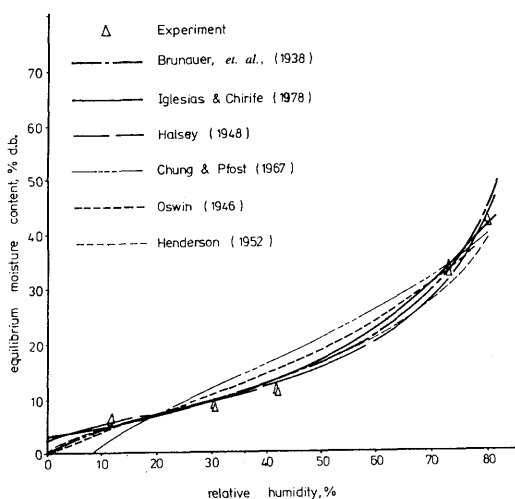


Figure 3 Comparison between experimental and calculated moisture isotherms of pineapple glacé at 65°C.

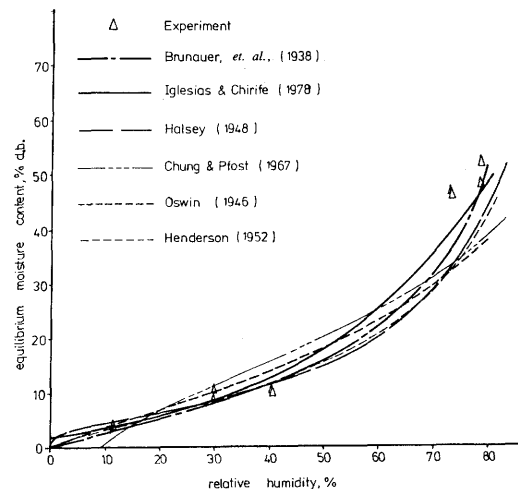


Figure 4 Comparison between experimental and calculated moisture isotherms of pineapple glacé at 72°C.

3, 4, 5) ขนาด 5×5 ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาเริ่มต้นประมาณ 0.8859 ได้ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ดังแสดงใน Figure 7. และจากการวิเคราะห์สมการถด

$$D = \exp (-13.2393 - 86.9162/T)$$

เมื่อ D = สัมประสิทธิ์การแพร่ m^2/h

T = อุณหภูมิลมร้อน $^{\circ}\text{C}$

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามรูปที่ 7 พบว่าเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะสูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความดันไอภายในและภายนอกวัสดุแตกต่างกันมากขึ้น ทำให้น้ำเคลื่อนที่ผ่านออกทางรูพรุนได้มาก และจากการศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยทดลองอบที่ความเร็วลม 0.8 เมตร/วินาที และ 1.3 เมตร/วินาที พบว่าความเร็วลมร้อนไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ทั้งนี้เป็นเพราะการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยน้ำจึงถูกจำกัดด้วยอัตราการแพร่ของน้ำภายในเนื้อผลิตภัณฑ์

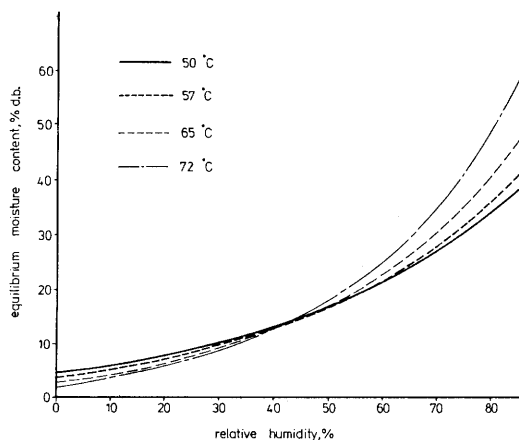


Figure 5 Calculated moisture isotherms of pineapple glacé (using Iglesias & Chirife, 1978's equation).

ถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิลมร้อน ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้ (ค่า coefficient of correlation เท่ากับ 0.98)

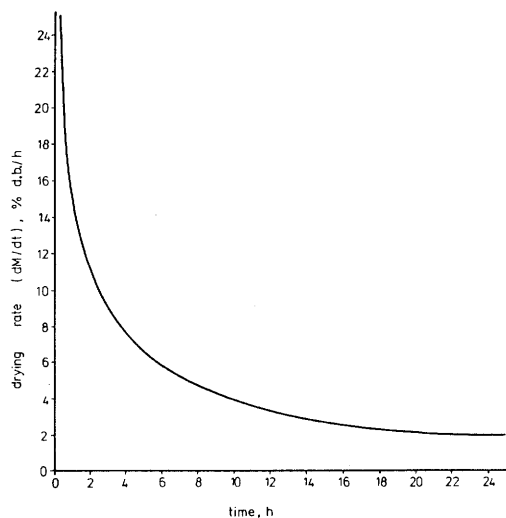


Figure 6 Drying rate of pineapple glacé at 57 °C.

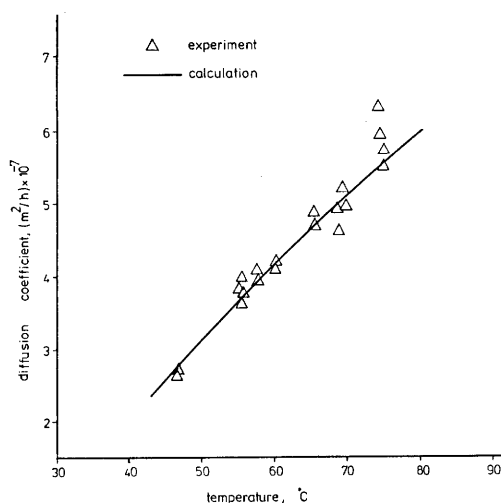


Figure 7 Diffusion coefficient of pineapple glacé.

สำหรับช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมนั้น ใช้การพิจารณาลักษณะและสีของสับปะรดแช่อิ่มที่ผ่านการอบแห้งเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาด โดยใช้เครื่องมือวัดสี Colour Difference meter และการวัดเทียบสีด้วย R.H.S. Colour Chart ซึ่งแสดงผลดัง Table 4 พบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มอยู่ในช่วง 55-65 °ซ เพราะจะทำให้ลักษณะและสีของสับปะรดแช่อิ่มเหมือนกับที่มีขายในท้องตลาดและใช้เวลาการอบแห้งประมาณ 20 ชั่วโมงเพื่อลดความชื้นของสับปะรดแช่อิ่มตามขนาดที่

ใช้ทดลองให้เหลือ 18% มาตรฐานแห้งซึ่งซึ่งไม่นานจนเกินไป

จากผลการทดลองหาความร้อนจำเพาะของสับปะรดแช่อิ่มดังแสดงใน Figure 8. พบว่าเมื่อความชื้นของสับปะรดแช่อิ่มมีค่าสูงขึ้น ความร้อนจำเพาะจะสูงขึ้นด้วย เพราะค่าความร้อนจำเพาะขึ้นอยู่กับสัดส่วนประกอบของน้ำที่มีอยู่ในอาหาร และจากการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะกับความชื้นสับปะรดแช่อิ่ม ได้ผลดังนี้ (ค่า coefficient of correlation = 0.96)

$$C = 1.7522 + 2.882 (M/100)/(1 + M/100)$$

เมื่อ C = ความร้อนจำเพาะของสับปะรดแช่อิ่ม, kJ/kg. °ซ

M = ความชื้นสับปะรดแช่อิ่ม, % มาตรฐานแห้ง

จากผลการทดลองหาความหนาแน่นของสับปะรดแช่อิ่มแสดงตาม Figure 9. พบว่าเมื่อความชื้นสับปะรดแช่อิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นจะมีค่าสูงขึ้น และจากการวิเคราะห์สมการถดถอย

โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความชื้นของสับปะรดแช่อิ่ม ได้สมการดังนี้ (ค่า coefficient of correlation = 0.96)

$$p = 1171.5 + 3.488 M$$

เมื่อ p = ความหนาแน่นของสับปะรดแช่อิ่ม, kg/m³

M = ความชื้นของสับปะรดแช่อิ่ม, % มาตรฐานแห้ง

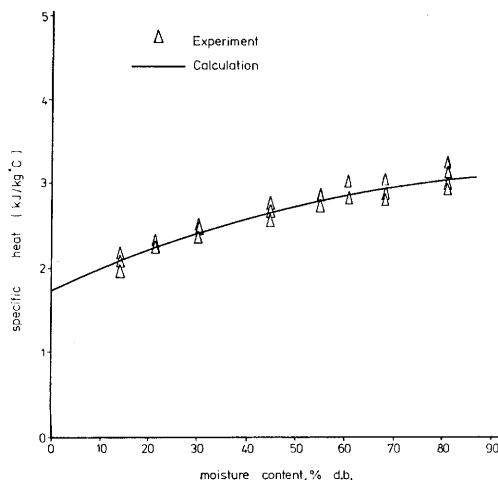


Figure 8 Specific heat of pineapple glacé.

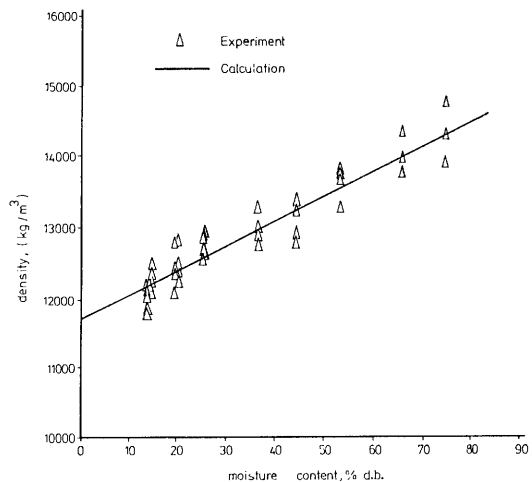


Figure 9 Density of pineapple glacé.

Table 4 Appearance of pineapple glace'

Drying temperature	Hunter Value		CIE value		RHS colour chart	Appearance
	L	b	Y	Z		
55 °C	47.92	+18.36	22.96	12.27	yellow group	yellow, dry skin,
	48.01	+15.61	23.05	14.58	13-B	soft texture
	47.52	+17.35	22.58	12.76		
60 °C	48.10	+17.64	23.13	13.00	yellow group	yellow, dry skin,
	47.02	+17.75	22.11	12.02	13-B	soft texture
	47.89	+16.93	22.93	13.40		
65 °C	46.93	+17.30	22.02	12.31	yellow group	yellow, dry skin,
	47.21	+16.54	22.28	13.15	13-B	soft texture
	47.38	+16.97	22.45	12.95		
70 °C	43.83	+17.25	19.21	9.93	yellow group	dark yellow,
	44.57	+16.36	19.86	11.16	13-A	hard skin,
	44.96	+16.93	20.21	11.03		dry texture
75 °C	41.24	+15.95	17.00	8.99	yellow orange	brown yellow
	42.73	+16.03	18.25	10.00	group	hard skin,
	42.79	+15.55	18.30	10.40	21-B	hard texture
Product (Chin Hua company)	49.41	+21.55	24.41	26.90	yellow group	yellow, hard
	52.59	+19.76	27.66	15.23	13-B	skin, soft texture
	50.88	+20.83	25.88	12.69		

สรุป

รูปแบบสมการความชื้นสมดุลที่เหมาะสมสำหรับสับปะรดเชื่อมคือสมการของ Iglesias and Chirife (1978) ซึ่งสามารถใช้ได้ตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 10-80% และช่วงอุณหภูมิ 45-75 °ซ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการอบแห้งในรูป exponential และใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิร้อน 45-80 °ซ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะหรือความหนาแน่นกับความชื้นของสับปะรดเชื่อมอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นและสามารถใช้คำนวณได้สำหรับทุก ๆ ค่าของความชื้น

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และสมชาติ โสภณธณฤทธิ์, 2531. การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่เชื่อม. ในเอกสารหลังการประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง อุปกรณ์และเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- สมชาติ-โสภณธณฤทธิ์ และวิไลพร นพรัตน์ไกรลาส. 2530. อุปกรณ์ศึกษาอัตราการอบแห้งเมล็ดพืชและผลการทดสอบข้าวเปลือก. ในเอกสารหลังการประชุมวิชาการเรื่องเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- Bolin, H.R. 1980. Relation of moisture to water activity in prunes and raisins. J. Food Sci. 45 : 1190.

- Brunauner, S., R.H. Emmett and E. Teller. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Amer. Chem. Soc., 60 : 309-319.
- Charm, S.E. 1971. The Fundamentals of Food Engineering. 2nd Edition. AVI Publishing Company. Inc, Westport, Connecticut.
- 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.
- Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion. 2 nd ed. Clarendon Press, Oxford. 414 p.
- Frechette, R.J. and J.W. Zahradnik. 1968. Thermal properties of the McIntosh Apples. Trans. ASAE 11 (1) : 21-24 and 27.
- Halsey, G. 1948 Physical adsorption on non-uniform surfaces. J. Chem. Phys. 16 : 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 Bulk Cucumbers. Unpublished Master Thesis, North Carolina State University.
- Hougen, D.A., H.J. McCauley and W.R. Marshall Jr. 1939. Trans Am. Inst. Chem. Engng. 35 : 183.
- 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.
- Iglesias, H.A., J. Chirife and J.L. Lombardi. 1975. Compression of water vapor sorption by sugar beet root components. J. Food Technol. 10 : 385.
- 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) 64 : 419-421.

- Pabis, S. and S.M. Henderson. 1961 Grain drying theory II. A critical analysis of the drying curve for shell corn. J. Agr. Eng. Res. 6 : 272-277.
- Parker, R.E. 1966. Design Parameters for Hydrocooling Cherries. Ph.D. Thesis in Agricultural Engineering, Michigan State University, East Lansing, Michigan.
- Saravacos, G. D. 1967. Effect of the drying method on the water sorption of dehydrated apple and potato. J. Food Sci. 32 : 81.
- Saravacos, G.D. and R.M. Stinchfield. 1965. Effect of temperature and pressure on the sorption of water vapor by freeze dried food materials. J. Food Sci. 30 : 779.
- Siebel, E. 1982. Specific heat of various products. Ice and Refrigeration 2 : 256-257.
- Tanafranca, D.E., L.B. Farre, L.C. Angeles and M.R. Sariano. 1985. Dehydration technologies of some Philippine fruits. Proc. 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. Amer. Soc. Hort. 70 : 261-265.