

## การศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้นในแกนสับปะรด ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในกระบวนการ ดองน้ำออกด้วยแรงดันออสโมติก

ชลดา มานะกุล<sup>1</sup> และ สุวิช ศิริวิวัฒน์โยธิน<sup>2</sup>  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

### บทคัดย่อ

สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในแกนสับปะรดที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลต่าง ๆ วัดด้วยการจับแกนสับปะรดที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลต่างกันชั่งกันตามแนวแกน และวัดความเข้มข้นที่ระยะทางต่าง ๆ ณ เวลาที่กำหนด ในช่วงความเข้มข้นของน้ำตาลตั้งแต่ 0.699 ถึง 3.951 กรัมต่อกรัมของแข็ง มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในช่วง  $9.0454 \times 10^{-11}$  ถึง  $4.1045 \times 10^{-10}$  ตารางเมตร/วินาที เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำกับความชื้นเริ่มต้นของ แกนสับปะรด พบว่าไม่เห็นผลของความชื้นต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ อย่างชัดเจน และการแพร่ของน้ำในแกนสับปะรดน่าจะเป็นการแพร่เชิงโมเลกุล

<sup>1</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

<sup>2</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

## Effect of Moisture Content on Diffusion Coefficient in Osmotic Dehydration of Pineapple Core

Cholada Manakul<sup>1</sup> and Suwit Siriwattanayotin<sup>2</sup>

King Mongkut's Institute of Technology Thonburi

---

### Abstract

Effective diffusivity of water in pineapple core was determined by using two pieces of pineapple core with different moisture content. The two pieces were made to contact at a transverse surface area. After contacted for a given period, both were sliced into further smaller pieces. Water content were then measured to obtain concentration profile, a subsequent comparison with theoretical prediction provided the effective diffusivities of water. The effective diffusivities of water in pineapple core with water content of 0.699 to 3.951 gm./gm.solid were found in range between  $9.0454 \times 10^{-11}$  to  $4.1045 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . The correlation coefficient showed that the water content had no effect on effective diffusivities of water. The diffusion process in this system might be molecular diffusion more than osmotic diffusion that shown in apple and pineapple.

---

<sup>1</sup> Graduate Student, Department of Food Engineering

<sup>2</sup> Lecturer, Department of Food Engineering

## บทนำ

การถนอมอาหารโดยการลดความชื้นด้วยวิธีการออสโมซิส หรือการเชื่อมใช้พลังงานน้อยกว่าวิธีการลดความชื้นอื่น ๆ ซึ่งนอกจากจะลดความชื้นแล้วยังเพิ่มน้ำตาลให้กับอาหารด้วยการนำแกนสับปะรดมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เชื่อมอบแห้งจะเพิ่มมูลค่าให้กับแกนสับปะรดได้มากขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของทั้งน้ำและน้ำตาลเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการเชื่อมอบแห้ง การศึกษานี้จะหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในแกนสับปะรดและพิจารณาผลของความเข้มข้นของน้ำที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำ โดยวิเคราะห์ผลจาก ข้อมูลความเข้มข้นและระยะทาง ที่เวลาหนึ่ง

Conway และคณะ [3] หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในชิ้นแอปเปิ้ล โดยหลักการวัดความเข้มข้นในสารละลายกับเวลา ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50°C และความเข้มข้นของน้ำตาลที่ 50 60 และ 70 Brix ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในชิ้นแอปเปิ้ล ( $D$ ;  $m^2/s$ ) กับอุณหภูมิ ( $T$ ;K) และความเข้มข้นของน้ำตาล ( $B$ ; Brix) เป็น  $\text{Log } D = 11.639 - 5875.20 (1/T) - 0.1940 B + 58.427 (B/T)$  ซึ่งมีค่าในช่วง  $1.52 \times 10^{-7}$  ถึง  $1.52 \times 10^{-8} m^2/s$

Beristain และคณะ [1] หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในชิ้นสับปะรด โดยหลักการวัดความเข้มข้นในสารละลายกับเวลาเช่นกัน ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50°C ความเข้มข้นของน้ำตาล 50, 60 และ 70 Brix และสรุปว่า ค่า  $D$  มีค่าลดลงเมื่อ Brix มากขึ้น และ  $D$  เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิตามลักษณะ Arrhenius โดยมีค่าพลังงานกระตุ้นในช่วง 12.0-12.5 kcal/mol และมีค่า  $D$  ในช่วง  $0.5 \times 10^{-9}$  ถึง  $2.7 \times 10^{-9} m^2/s$ .

## ทฤษฎี

เมื่อนำแกนสับปะรดทรงกระบอกสองชิ้น ที่มีความเข้มข้นของน้ำสม่ำเสมอเป็น  $C_{10}$  และ  $C_{20}$  กรัม/กรัมของแข็ง มาชนกันตามแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 1 ได้แบบสมมติ โดยสมมุติฐานว่าไม่มีความต้านทานระหว่างผิวสัมผัส ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลน้ำระหว่างแกนสับปะรดสองชิ้นจำลองได้โดยสมการ

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} \quad (1)$$

และ

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} \quad (2)$$

เมื่อ  $C_1, C_2$  เป็นความเข้มข้นของน้ำ กรั้ม/กรั้มของแข็ง ในชั้นแกนสับปรดที่ 1 และ ชั้นที่ 2  $t$  เป็นเวลา (วินาที)  $x$  เป็นระยะทาง (เมตร) และ  $D_1, D_2$  เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลปรากฏ ( $m^2/s$ ) โดยที่มีสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต เป็นดังนี้

$$t = 0, \quad C_1 = C_{10}, \quad x > 0 \quad (3)$$

$$t = 0, \quad C_2 = C_{20}, \quad x < 0 \quad (4)$$

$$t > 0, \quad \frac{C_2}{C_1} = k, \quad x = 0 \quad (5)$$

$$t > 0, \quad D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} = D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x}, \quad x = 0 \quad (6)$$

โดย  $k$  เป็นอัตราส่วนของความเข้มข้นที่สม่ำเสมอบริเวณระหว่าง  $x < 0$  กับ  $x > 0$ .

เมื่อให้  $C'_2 = C_2 - C_{20}$ ,  $C'_1 = C_1 - C_{20}$  และ  $C_0 = C_{10} - C_{20}$  แล้ว

สมการ (1) และ (2) จะเป็น

$$\frac{\partial C'_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C'_1}{\partial x^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial C'_2}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 C'_2}{\partial x^2} \quad (8)$$

ส่วนสมการของสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต (3) - (6) จะเป็น

$$t = 0, \quad C_1 = C_0, \quad x > 0 \quad (9)$$

$$t = 0, \quad C_2 = 0, \quad x < 0 \quad (10)$$

$$t > 0, \quad \frac{C_2}{C_1} = K, \quad x = 0 \quad (11)$$

$$t > 0, \quad D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} = D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x}, \quad x = 0 \quad (12)$$

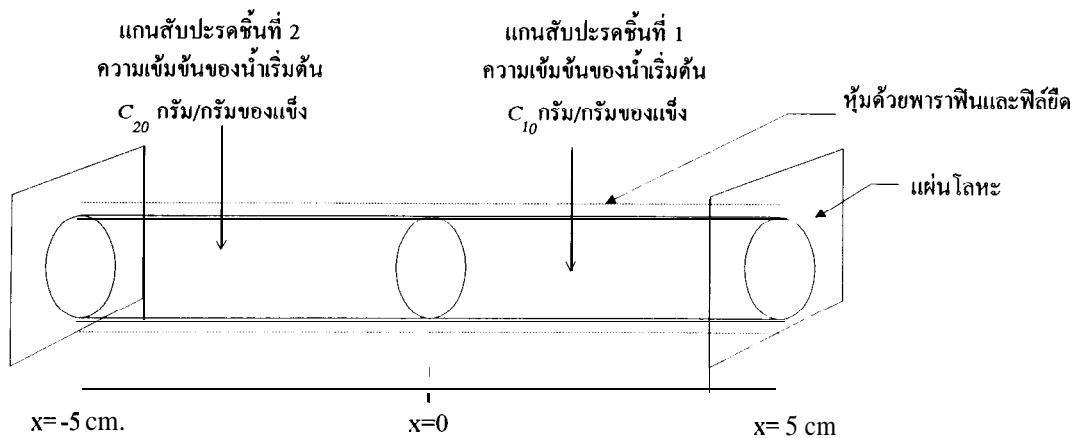
คำตอบของสมการ (7), (8) ตามสภาวะขอบเขต (9), (10) (11) และ (12) หาได้จากตำราของ Crank [4] ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{1}{1+K(D_2/D_1)^{1/2}} \left\{ 1+K(D_2/D_1)^{1/2} \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} \right\} \quad (13)$$

$$\frac{C_2}{C_0} = \frac{K}{1+K(D_2/D_1)^{1/2}} \operatorname{erfc} \frac{|x|}{2\sqrt{D_2 t}} \quad (14)$$

## วัสดุและวิธีการทดลอง

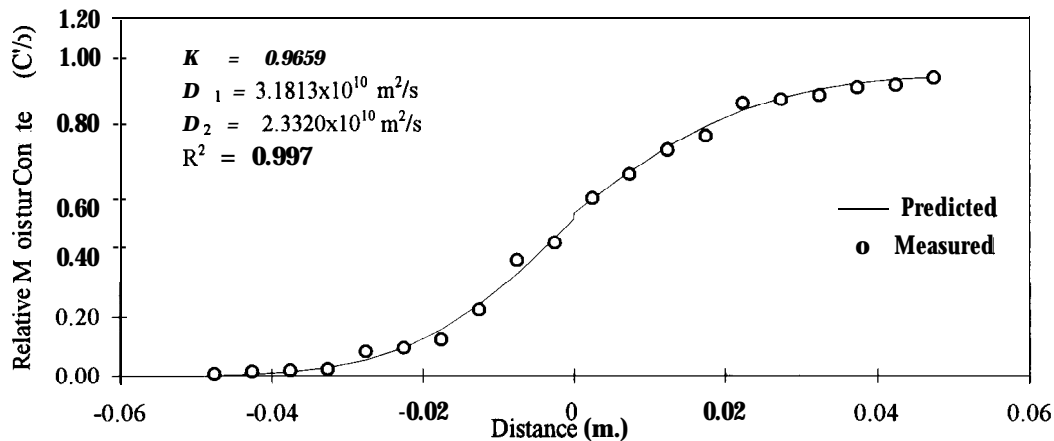
แกนสับปะรด (จากสับปะรดพันธุ์ Smooth Cayene อายุประมาณ 18 เดือนนับจากปลูก) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $2.6 \pm 0.2$  เซนติเมตร ที่ผ่านกระบวนการแช่ในน้ำเชื่อม (น้ำตาลซูโครส) 30, 40, 50, 60 และ 70 Brix แล้ว เก็บไว้ห้องเย็นอุณหภูมิประมาณ  $5^{\circ}\text{C}$  นานประมาณ 1 เดือน เพื่อให้มันใจว่าความเข้มข้นในแกนสับปะรดสม่ำเสมอ วัดความชื้นเริ่มต้นของแกนสับปะรดแต่ละความเข้มข้นด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  เลือกแกนสับปะรดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันตัดให้หน้าตัดเรียบได้ฉาก ยาว 5 เซนติเมตร ความเข้มข้นแตกต่างกัน 2 ชั้น นำมาชนกันตามแนวแกนแล้วหุ้มทั้งหมดด้วยฟิล์มยืดและพาราฟิน วางในแผ่นโลหะพับที่เตรียมขึ้นมาดังรูปที่ 1 โดยใช้แกนสับปะรดที่มีความเข้มข้น (Brix) ตามคู่ลำดับเหล่านี้มาชนกัน (30 40), (30 50), (30 60), (30 70), (50 60), (50 70) และ (60 70) ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ( $\approx 27^{\circ}\text{C}$ ) นานประมาณ 7-9 วัน ตัดตัวอย่างเป็นแว่นช่วงละ 5 เซนติเมตร เอาพาราฟินและฟิล์มยืดออก หาคความเข้มข้นของน้ำในแต่ละแว่นด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความชื้นของแต่ละแว่นโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 1 ลักษณะการวางตัวอย่างทดลอง

## ผลการทดลองและวิจารณ์

จากผลการทดลอง ดังเช่นในรูปที่ 2 แสดงค่าความเข้มข้นของน้ำที่ระยะต่างๆ ที่วัดได้ระหว่างแกนสับปะรดที่ผ่านน้ำเชื่อมเข้มข้น 30 Brix และ 40 Brix โดยเทียบกับความชื้นเริ่มต้นในแกนสับปะรดที่ผ่านน้ำเชื่อมเข้มข้น 40 Brix แสดงให้เห็นว่ามีการเคลื่อนที่ของน้ำจากแกนสับปะรดที่ผ่านการแช่น้ำเชื่อม 30 Brix ไปยังแกนสับปะรดที่ผ่านน้ำเชื่อม 40 Brix และใช้ข้อมูลความเข้มข้นที่ระยะต่างๆ ณ เวลาที่วางทิ้งไว้ มาคำนวณหาค่า  $D_1$ ,  $D_2$  และ  $K$  จากสมการ (13) และ (14) โดยมีข้อสมมุติฐานว่าชั้นตัวอย่างมีความชื้นที่วัดได้เป็นตัวแทนของระยะนั้นๆ กับค่าที่ได้จากการทำนาย โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย ด้วยวิธีของ Gauss-Newton [2] ซึ่งเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MatLab [6]



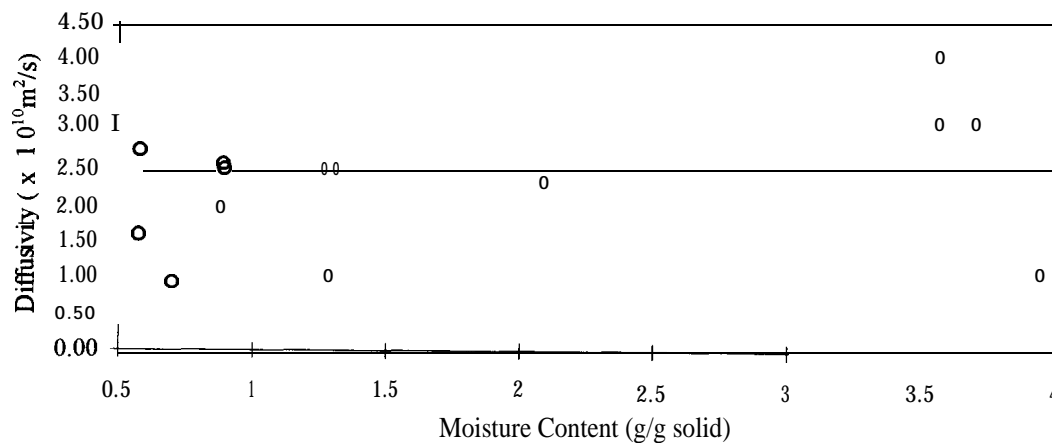
รูปที่ 2 ความชื้นในแกนสับปะรดที่วัดได้กับค่าที่ทำนาย ระหว่างแกนสับปะรดที่ผ่านน้ำเชื่อมเข้มข้น 30 Brix และ 40 Brix โดยเทียบกับ ความชื้นเริ่มต้นในแกนสับปะรดที่ผ่านน้ำเชื่อมเข้มข้น 40 Brix

คำนวณค่า  $D_1$ ,  $D_2$  และ  $K$  จากผลการทดลองของคู่ลำดับต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1 โดยค่าสัมประสิทธิ์แพร่ของน้ำที่ความชื้นเริ่มต้นของแกนสับปะรดในช่วง 0.573 ถึง 3.951 กรัม/กรัม ของแข็ง มีค่าอยู่ในช่วง  $9.0454 \times 10^{-11}$  ถึง  $4.1045 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในสารละลายน้ำตาล (sucrose) ในช่วงความเข้มข้นของน้ำตาล 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าระหว่าง  $1 \times 10^{-10}$  ถึง  $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  [5] แต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าความชื้นมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำ ถึงแม้จะมีแนวโน้มสูงขึ้นก็ตาม เพราะเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำกับความชื้นเริ่มต้นของแกนสับปะรดดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กัน ( $R^2 = 0.125$ )

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในแกนสับปะรด กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในชิ้น แอปเปิ้ล [3] และในชิ้นสับปะรด [1] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในแกนสับปะรดที่วัดได้มีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจเป็นเพราะระบบดังกล่าวมีความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นสูง และโครงสร้างเซลล์ส่วนใหญ่เป็น เซลล์พืชน (Parenchyma cell) ที่ยังมีชีวิต ทำให้การแพร่ของน้ำเกิดขึ้นจากผลของแรงดันออสโมติกมากกว่าการแพร่เชิงโมเลกุล ขณะที่กลไกการแพร่ของน้ำในแกนสับปะรดน่าจะเป็นการแพร่เชิงโมเลกุลผ่านทั้งสารละลายและของแข็งในแกนสับปะรดมากกว่าผลของแรงดันออสโมติก เนื่องจากโครงสร้างของแกนสับปะรดมีความหนาแน่นมากกว่า กับที่สภาวะเริ่มต้นสารละลายในแกนสับปะรดมีความหนืดสูงกว่า อีกทั้งโครงสร้างเซลล์ส่วนใหญ่เป็น เซลล์โฟลเอ็ม (Phloem) และเซลล์ไซเลม (Xylem) ซึ่งแรงดันออสโมติกจะมีผลต่อการแพร่ของน้ำน้อย ถึงแม้ว่าการแพร่จะขนานกับแนวเซลล์โฟลเอ็มและเซลล์ไซเลมของแกนสับปะรดก็ตาม

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำที่คำนวณได้กับความชื้นเริ่มต้นของแกนสับปะรด

แกนสับปะรดชั้นที่ 1		แกนสับปะรดชั้นที่ 2		$D_1$	$D_2$	$K$	$R^2$
Brix	ความเข้มข้นของน้ำ, $C_{10}$ (กรัม/กรัมของแข็ง)	Brix	ความเข้มข้นของน้ำ, $C_{20}$ (กรัม/กรัมของแข็ง)				
30	3.69263	40	2.100775	$3.1813 \times 10^{-10}$	$2.3320 \times 10^{-10}$	0.966	0.997
30	3.57247	50	1.294631	$4.1045 \times 10^{-10}$	$2.5001 \times 10^{-10}$	0.793	0.982
30	3.57247	60	0.893581	$3.2688 \times 10^{-10}$	$2.8036 \times 10^{-10}$	0.781	0.987
30	3.95049	70	0.699524	$1.1291 \times 10^{-10}$	$0.9045 \times 10^{-10}$	0.794	0.998
50	1.29252	60	0.887149	$0.9527 \times 10^{-10}$	$2.8660 \times 10^{-10}$	0.701	0.982
50	1.28258	70	0.572822	$2.8078 \times 10^{-10}$	$1.5886 \times 10^{-10}$	0.977	0.997
60	0.88893	70	0.575796	$1.9741 \times 10^{-10}$	$2.7420 \times 10^{-10}$	0.921	0.994



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำกับความชื้นเริ่มต้นของแกนสับปะรด

เมื่อเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในมะละกอแช่อิ่มขณะอบแห้ง [8] ที่ความชื้นเริ่มต้น 2.76 กรัม/กรัมของแข็ง อุณหภูมิอบแห้ง 54.4°C มีค่า  $1.84 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในกระเทียมขณะอบแห้ง [7] ที่ความชื้นเริ่มต้น 2.40 กรัม/กรัมของแข็ง อุณหภูมิอบแห้ง 61°C มีค่า  $1.06 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s และสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในชั้นหอมหัวใหญ่ขณะอบแห้ง [7] ที่ความชื้นเริ่มต้น 6.00 กรัม/กรัมของแข็ง อุณหภูมิอบแห้ง 62°C มีค่า  $4.17 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s แล้วค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในแกนสับปะรดมีค่าอยู่ในเกณฑ์สูง และกระบวนการแช่อิ่มแกนสับปะรดในแต่ละช่วงความเข้มข้นของน้ำเชื่อมอาจใช้เวลาใกล้เคียงกันได้ เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลไม่ต่างกันมากนัก

อย่างไรก็ดีวิธีการวัดลักษณะนี้ใช้เวลานานซึ่งอาจทำให้มีการระเหยของน้ำหรือดูดซับน้ำ ระหว่างตัวอย่างและสภาวะแวดล้อมได้ และมีข้อผิดพลาดจากกระบวนการวัดละเอียด รวมถึงความแก่อ่อนของแกนสับปะรดด้วย

## เอกสารอ้างอิง

1. Beristan, C.I., Azuara, E., Cortes, R. and Garcia, H.S., 1990, "Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Pineapple Rings", *International Journal of Food Science and Technology*, Vol. 25, No. 4, pp. 576-502.
2. Constantinides, A., 1987, *Applied Numerical Methods with Personal Computers*, McGraw Hill, pp. 565-568
3. Conway, J., Castaigne, F., Picard, G. and Vonvan, X., 1983, "Mass Transfer Considerations in Osmotic Dehydration of Apples", *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 25 - 29.
4. Crank, J., 1975, *Mathematics of Diffusion*, Oxford, Clarendon, pp. 38 - 39
5. King, C.J., 1983, Physical and Chemical Properties Governing Volatilization of Flavor and Aroma Components in *Physical Properties of Foods*, M. Peleg and E.B. Bagley (editors), AVI Publishing, Connecticut, pp. 411-416
6. Etter, D.M., 1993, *Engineering Problem Solving with MatLab*, Prentice-Hall International, Inc., 433 p.
7. Okos, R.M., Narsimhan, G., Singh, K.R. and Weitnauer, C.A., 1992, *Food Dehydration in Handbook of Food Engineering*, D.R. Heldman and D.B. Lund (editors), Marcel Dekker, Inc., pp. 463-475
8. ศิวะ อัจฉวิริยะ และ สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2533, การศึกษาหาพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่ส้ม ว.เกษตรศาสตร์ (วิทย.) 24, หน้า 196-207