

## การจำลองการถ่ายโอนความร้อนของสับประรดแวน ในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋องในระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อ

ปณิตา จันทรศรี<sup>1</sup> สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน<sup>2</sup> และ ทิพาพร อยู่วิทยา<sup>2</sup>  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

### บทคัดย่อ

จากการจำลองการถ่ายโอนความร้อนของสับประรดแวนในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋องระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (ADINA) เพื่อคำนวณการกระจายความร้อนภายในกระป๋องและหาเวลาในการฆ่าเชื้อ โดยใช้ตัวอย่างเป็นสับประรดแวน 10 ชิ้น ในน้ำเชื่อมร้อยละ 25 (โดยน้ำหนัก) บรรจุแบบเต็มกระป๋อง ในกระป๋องขนาด 300x407 ให้ความร้อนด้วยไอน้ำจากหม้อฆ่าเชื้อแบบไม่มีการเคลื่อนที่ของกระป๋องแนวนอนที่อุณหภูมิ 121.1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 นาที พบว่าการจำลองกระบวนการดังกล่าวให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง ในส่วนของน้ำเชื่อมมีค่าความแตกต่างสัมพัทธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คำนวณจากแบบจำลองกับผลการทดลองเท่ากับร้อยละ 1.45 และในชั้นสับประรดมีค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 5.43 สำหรับการเปรียบเทียบค่า  $F_0$  ระหว่างค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองและผลการทดลอง พบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดลองมีค่าเป็น 2.46 และ 2.73 นาทีตามลำดับ คิดเป็นความแตกต่างเท่ากับร้อยละ 9.89 เทียบกับผลการทดลอง

<sup>1</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

## Simulation of Heat Transfer in Canned Sliced Pineapples in Syrup During Sterilization Process

Panita Chansri<sup>1</sup> Suwit Siriwattanayotin<sup>2</sup> and Tipaporn Yoovidhya<sup>2</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

### Abstract

The heat transfer in canned sliced pineapples in syrup during sterilization process was simulated using a commercially available software (ADINA) in order to predict the heat distribution in the can and calculated as sterilizing time. The experiments were performed with ten slices of pineapple in 25% (w/w) syrup fully filled in 300x407 can size, and heated by steam using a horizontal still retort at 121.1 °C for 18 minutes. The almost agreement of two results was found. The relative difference of heating temperature were 1.45 and 5.43 percent in syrup and pineapple respectively. The  $F_0$  value calculated from simulation was 2.46 minutes while the value of 2.73 minutes was obtained from experiment, the relative difference was 9.89 percent.

---

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

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Food Engineering.

## 1. บทนำ

การใช้ความร้อนในกระบวนการฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์อาหารบรรจุกระป๋องเป็นวิธีการหนึ่งที่ยิยมใช้ในการถนอมอาหารโดยใช้ความร้อนไปทำลายสปอร์และจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและเป็นสาเหตุให้อาหารเน่าเสีย ปริมาณความร้อนที่ใช้ควรจะทำลายเฉพาะสปอร์และจุลินทรีย์ แต่ไม่ควรทำให้คุณค่าทางอาหารสูญเสียไป นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค รวมทั้งมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าด้วย ดังนั้นจึงต้องกำหนดอุณหภูมิและเวลาในการฆ่าเชื้อที่เหมาะสม โดยทั่วไปการกำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อของอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารบรรจุกระป๋องจำเป็นต้องทำการทดลองวัดอุณหภูมิภายในกระป๋องขณะให้ความร้อนทุกผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นวิธีที่ยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายในการทดลองมาก นอกจากนี้อาหารดังกล่าวมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่แตกต่างกัน โดยชิ้นอาหารมีการถ่ายโอนความร้อนแบบการนำความร้อน ซึ่งมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนช้ากว่าอาหารเหลวที่มีการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อน ดังนั้นการหาเวลาในการฆ่าเชื้อของอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารจึงมีความซับซ้อนมากกว่าอาหารประเภทที่มีการถ่ายโอนความร้อนแบบการนำความร้อน หรือการพาความร้อนเพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุผลนี้จึงต้องศึกษาการจำลองการถ่ายโอนความร้อนของอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อ เพื่อคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อที่ให้ผลแม่นยำมากขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองการถ่ายโอนความร้อนของอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารภายในภาชนะบรรจุ เพื่อคำนวณเวลาในการฆ่าเชื่อนั้นแบ่งตามสภาวะของอาหารเหลวได้ 2 แบบ แบบแรกกำหนดให้ภายในกระป๋องมีอาหารเหลวที่มีการผสมกันอย่างดี ทำให้ได้รับความร้อนเท่ากันซึ่งง่ายต่อการคำนวณ ดังเห็นได้จากงานวิจัยของ Lenz และ Lund [1], Lekwauwa และ Hayakawa [2], Stoforos และ Merson [3] ที่ทำการจำลองกระบวนการฆ่าเชื้อในหม้อฆ่าเชื้อที่มีการเคลื่อนที่ของกระป๋องในหม้อ ส่วนในงานวิจัยของ Sastry, Beelman และ Speroni [4], Akerian [5] จำลองกระบวนการฆ่าเชื้อในหม้อฆ่าเชื้อที่ไม่มีเคลื่อนที่ของกระป๋องภายในหม้อ ซึ่งการกำหนดสมมติฐานดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับสภาวะที่เป็นจริง ส่วนแบบที่สองกำหนดให้ภายในกระป๋องมีอาหารเหลวที่ไม่มีผสมกันดี ทำให้ได้รับความร้อนไม่เท่ากัน โดยส่วนที่เป็นอาหารเหลวจะแสดงลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection heat transfer) ซึ่งแบบจำลองลักษณะนี้สามารถคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อที่เหมาะสมได้ถูกต้องมากขึ้นดังงานวิจัยของ รัชชู พลทิพย์ [6] เพียงแต่ระบบอาหารที่ทำการศึกษาไม่ได้ใช้อาหารจริง และไม่ใช้ลักษณะของอาหารจริงตามธรรมชาติคือ มีชิ้นอาหารเพียงชิ้นเดียวภายในกระป๋อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์จะจำลองการถ่ายโอนความร้อนในกระบวนการฆ่าเชื้อของอาหารจริงโดยใช้สับปะรดแฉกในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋องเป็นตัวอย่าง ทั้งนี้กำหนดให้น้ำเชื่อมมีการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ สำหรับทดลองวัดการแทรกผ่านความร้อน (heat penetration)

## 2. การจำลองกระบวนการฆ่าเชื้อสับประรดแวนในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง

การจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสับประรดแวนในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง ทำโดยใช้สมการสมดุลมวล โมนเมนต์ และพลังงาน ร่วมกับข้อสมมุติดังนี้

1. ระบบเป็น 2 มิติ รูปทรงกระบอก แบบสมมาตรในแนวเชิงมุม
2. น้ำเชื่อมที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีค่าสมบัติทางความร้อนคงที่ ไม่คิดค่าความหนาแน่นในเทอมแรงลอยตัวเนื่องจากเป็นการพาความร้อนตามธรรมชาติ และกำหนดให้สับประรดมีค่าสมบัติทางความร้อนคงที่เช่นกัน
3. กำหนดให้สับประรดแต่ละชั้นลอยอยู่ห่างกันประมาณ 0.2 เซนติเมตร ซึ่งได้จากการสังเกตการณ์จริงในการทดลองเบื้องต้น
4. ไม่คิดค่าการต้านทานความร้อนระหว่างผิวกระป๋องกับตัวกลางให้ความร้อนกระป๋อง เนื่องจากตัวกลางให้ความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงมาก และกระป๋องมีความหนาน้อยมาก
5. กำหนดให้อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อเท่ากับ 121.1 องศาเซลเซียส (394.1 เคลวิน) และอุณหภูมิที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส (303 เคลวิน)
6. สภาวะการไหลของน้ำเชื่อมเป็นการไหลแบบราบเรียบ
7. ไม่มีช่องว่างเหนืออาหาร (headspace) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7] พบว่าพื้นที่ช่องว่างเหนืออาหารมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในกระป๋อง

จากข้อสมมุติดังกล่าวสมการอนุพันธ์ทั้งหมด [8] สามารถลดรูปได้ดังนี้  
สมการจำลองสมดุลด้านต่างๆ ในน้ำเชื่อม

สมดุลมวล

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r\rho_f \mu)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho_f v)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

สมดุลโมเมนต์แนวรัศมี

$$\rho_f \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (ru)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

สมการสมดุลโมเมนต์แนวแกน

$$\rho_f \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \bar{\rho}_f g_z \left( 1 - \bar{\beta} (T_f - \bar{T}_f) \right) \quad (3)$$

สมการสมดุลพลังงาน

$$\left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + u \frac{\partial T_f}{\partial r} + v \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = \frac{k_f}{\rho_f C \rho_f} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

**สมการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสลับประดแ่วนในกระป๋อง**

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{k_p}{\rho_p C_p} \left[ \frac{1}{r_p} \frac{\partial}{\partial r_p} \left( r_p \frac{\partial T_p}{\partial r_p} \right) + \frac{\partial^2 T_p}{\partial z_p^2} \right] \tag{5}$$

สภาวะขอบเขตระหว่างน้ำเชื่อมกับผิวกระป๋องด้านใน

$$T_f = T_w, u = 0, v = 0 \text{ for } 0 \leq r \leq R \text{ at } z = 0 \text{ and } z = H \tag{6}$$

$$T_f = T_w, u = 0, v = 0 \text{ for } 0 \leq z \leq H \text{ at } r = R$$

สภาวะขอบเขตระหว่างน้ำเชื่อมกับชั้นสลับประด

$$u = 0, v = 0 \text{ for } R_{pi} \leq r_p \leq R_{po} \text{ at } z_p = 0 \text{ and } z_p = H_p \tag{7}$$

$$u = 0, v = 0 \text{ for } 0 \leq z_p \leq H_p \text{ at } r_p = R_{pi} \text{ and } r_p = R_{po}$$

$$T_f = T_p \text{ at } r_p = R_{pi}, r_p = R_{po}, r_p = R_{pi} \text{ and } r_p = R_{po}$$

สภาวะขอบเขตที่แนวสมมาตร

$$\frac{\partial T_f}{\partial r} = 0, \frac{\partial v}{\partial r} = 0 \text{ for } r = 0 \text{ and } 0 \leq z \leq H \tag{8}$$

สภาวะเริ่มต้น

$$u = 0, v = 0 \quad T_f = 303 \text{ for } 0 \leq z \leq H \text{ and } 0 \leq r \leq R \tag{9}$$

$$T_f = 303 \quad 0 \leq z_p \leq H_p \text{ and } R_{pi} \leq r_p \leq R_{po}$$

ลักษณะของสมการอนุพันธ์ทั้งหมดและสภาวะขอบเขตข้างต้น สามารถที่จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคำนวณหาคำตอบได้ ซึ่งในงานนี้เลือกใช้ ADINA รุ่น 7.3 แบบ 900 จุด โดยสร้างแบบจำลองให้มี 1260 เอลิเมนต์ จำนวนจุดต่อ 704 จุด ใช้เอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมเชิงเส้น ดังรูปที่ 1 โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของน้ำเชื่อมมีทั้งหมด 1020 เอลิเมนต์ (สีขา) ส่วนของชั้นสลับประดแ่วนทั้ง 10 ชั้น แบ่งเป็นชั้นละ 24 เอลิเมนต์ (สีเหลือง) ค่าสมบัติทางความร้อนของน้ำเชื่อมและสลับประดที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 1

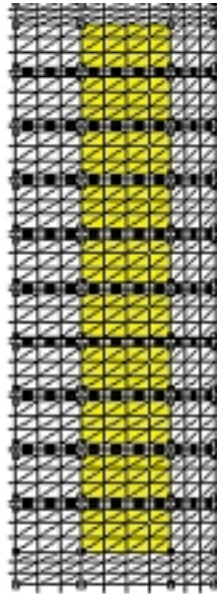
**ตารางที่ 1** สมบัติของน้ำเชื่อมและชั้นสลับประด

สมบัติ	น้ำเชื่อมร้อยละ 25 (โดยน้ำหนัก)	ชั้นสลับประด <sup>3</sup>
ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg.°K)	3980 <sup>2</sup>	3680
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	1027.516 <sup>2</sup>	1010
การนำความร้อน (W/m.°K)	0.571 <sup>1</sup>	0.549
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (1/°K)	0.0004529 <sup>2</sup>	
ความหนืด (Pa.s)	0.0022 <sup>1</sup>	

<sup>1</sup>Rahman [9]

<sup>2</sup>ทำการทดลองหาจากห้องปฏิบัติการ

<sup>3</sup> Sweat [10]



รูปที่ 1 การแบ่งอิเล็กโทรดสำหรับแบบจำลองสับประรดแวนในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง

### 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### อุปกรณ์และวัสดุ

1. สับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย น้ำตาลทราย และกระป๋องโลหะเคลือบดีบุกขนาด 300x407
2. เครื่องคอมพิวเตอร์ รุ่น Intel Pentium III 800 MHz และโปรแกรมสำเร็จรูป ADINA รุ่น 7.3
3. ชุดอุปกรณ์วัดค่า  $F_0$  บริษัท ELLAB รุ่น CMC-821-UZ พร้อมชุดอุปกรณ์เจาะกระป๋อง
4. เครื่องไล่อากาศ (exhauster) เครื่องปิดฝากระป๋อง และหม้อฆ่าเชื้อแนวนอนแบบไม่มีการเคลื่อนที่ของกระป๋อง

#### วิธีการทดลอง

เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่คำนวณจากแบบจำลองกับผลการทดลองที่ตำแหน่งเดียวกันทั้งในน้ำเชื่อมและชั้นสับประรด เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยมีขั้นตอนการทดลองเก็บข้อมูล ดังนี้

1. กำหนดตำแหน่งที่จะวัดอุณหภูมิของน้ำเชื่อมและชั้นสับประรด เจาะรูกระป๋อง กระป๋องละ 1 รู ตำแหน่งละ 2 ซ้ำ เพื่อใส่เข็มยัดในกระป๋อง (packing gland)

2. บรรจุชั้นสับปะรดลงในกระป๋อง โดยใช้ชั้นสับปะรดขนาดเท่ากับแบบจำลอง (รัศมีภายใน 0.12 เซนติเมตร รัศมีภายนอก 0.285 เซนติเมตร หนา 0.8 เซนติเมตร) ใส่เข็มยัดในกระป๋องให้ตรงกับตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิของน้ำเชื่อมและชั้นสับปะรด เติมน้ำเชื่อมร้อยละ 25 (โดยน้ำหนัก) จนเต็มกระป๋อง

3. ใส่อากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วปิดผนึกฝากระป๋อง ปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นจนกระทั่งมีอุณหภูมิภายในกระป๋องประมาณ 30 องศาเซลเซียส

4. เสียบเทอร์มอคับเป็ลลงในเข็มยัดในกระป๋อง และต่อสายเทอร์มอคับเป็ลเข้าเครื่องวัดค่า  $F_0$  บริษัท ELLAB รุ่น CMC-821- UZ

5. นำกระป๋องไปให้ความร้อนด้วยหม้อฆ่าเชื้อแนวนอนแบบที่ไม่มีเครื่องเคลื่อนที่ของกระป๋องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121.1 องศาเซลเซียส โดยวางกระป๋องในลักษณะแนวตั้ง (vertical) ตำแหน่งตรงกลางของหม้อฆ่าเชื้อ เริ่มกระบวนการฆ่าเชื้อ เก็บข้อมูลของอุณหภูมิที่วัดได้ทุก ๆ 30 วินาที รวมถึงอุณหภูมิของตัวกลางให้ความร้อนด้วย เมื่ออุณหภูมิภายในกระป๋องมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของตัวกลางให้ความร้อนจึงหยุดกระบวนการ ทำการทดลอง 3 ครั้ง

6. นำข้อมูลอุณหภูมิกับเวลาที่ได้ไปหาค่า  $F_0$

#### 4. ผลการทดลองและวิเคราะห์

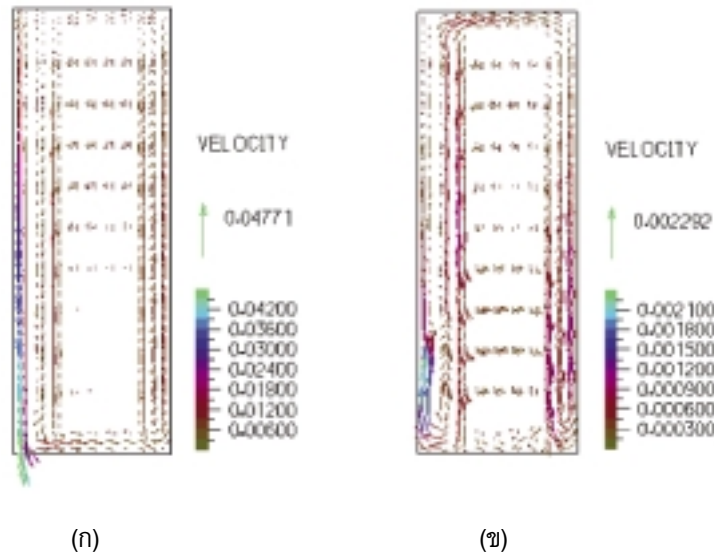
##### ผลการจำลองและวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง

ผลการจำลองการถ่ายโอนความร้อนของสับปะรดแวนในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋องขนาด 300 x 407 ระหว่างการให้ความร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ADINA จะแสดงรูปแบบการไหลเป็น เวกเตอร์ ซึ่งความยาวของลูกศรแสดงถึงขนาดของความเร็ว และหัวลูกศรแสดงถึงทิศทางการไหล ด้านขวาของรูปแสดงค่าของความเร็ว และแสดงอุณหภูมิด้วยแถบสี โดยอุณหภูมิต่ำสุดแสดงด้วยสีม่วงและอุณหภูมิสูงสุดแสดงด้วยสีแดง ทางด้านซ้ายมือของแบบจำลองเป็นแนวแกนที่สมมาตร ส่วนด้านขวาแสดงค่าอุณหภูมิของแถบสีต่างๆ ซึ่งเป็นสภาวะภายในกระป๋องหลังจากได้รับความร้อนนาน 1.5 นาที และ 15 นาที แสดงดังในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

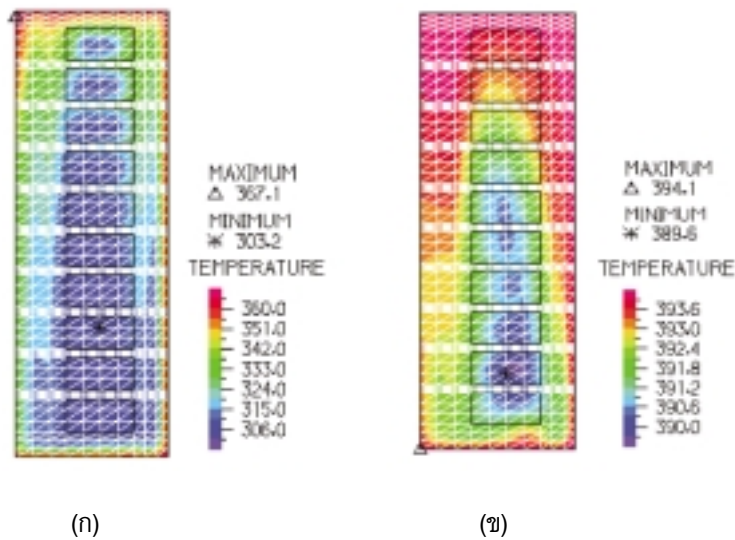
เมื่อน้ำเชื่อมได้รับความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และมีความหนาแน่นต่ำลง ทำให้ลอยขึ้นสู่ด้านบนในแนวแกน z ขณะเดียวกันน้ำเชื่อมที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายโอนความร้อนให้กับน้ำเชื่อมที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้มีอุณหภูมิลดลง และความหนาแน่นของน้ำเชื่อมกลับสูงขึ้นอีกครั้ง จึงไหลวนตกลงมาที่บริเวณแนวแกนกลางของกระป๋อง และบางส่วนไหลผ่านผิวด้านนอกของสับปะรดวงแหวนไปสู่กันกระป๋อง เป็นการไหลวนแบบทวนเข็มนาฬิกา ดังรูป 2 (ก) และ 2 (ข)

เมื่อน้ำเชื่อมได้รับความร้อนนานขึ้นเป็นเวลา 15 นาที พบว่าลักษณะการไหลโดยรวมเหมือนเดิม แต่ขนาดของความเร็วลดลงตามเวลาที่เพิ่มมากขึ้น และมีการไหลวนเกิดขึ้นอีกหนึ่งแห่งที่บริเวณด้านล่างกระป๋อง ระหว่างแนวแกนกลางกระป๋องกับผิวสับปะรดวงแหวนด้านใน เป็นการไหลวนแบบตามเข็มนาฬิกา ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเชื่อมบริเวณด้านล่างมีอุณหภูมิสูงขึ้น ขณะที่น้ำเชื่อมที่ไหลตกลงมามีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูง และ

มีอิทธิพลของแรงลอยตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงเวลาแรกที่ทำให้ความร้อน จึงเกิดลักษณะการไหลในทิศทางที่กลับขึ้นสู่ด้านบน



รูปที่ 2 รูปแบบจำลองลักษณะการไหลของน้ำเชื่อมที่มีสับปะรดแวน ในกระป๋องขนาด 300 x 407 เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลา (ก) 1.5 นาที และ (ข) 15 นาที ซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ADINA



รูปที่ 3 แบบจำลองลักษณะของอุณหภูมิของน้ำเชื่อมและสับปะรดแวนในกระป๋องขนาด 300 x 407 เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลา (ก) 1.5 นาที และ (ข) 15 นาที ซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ADINA



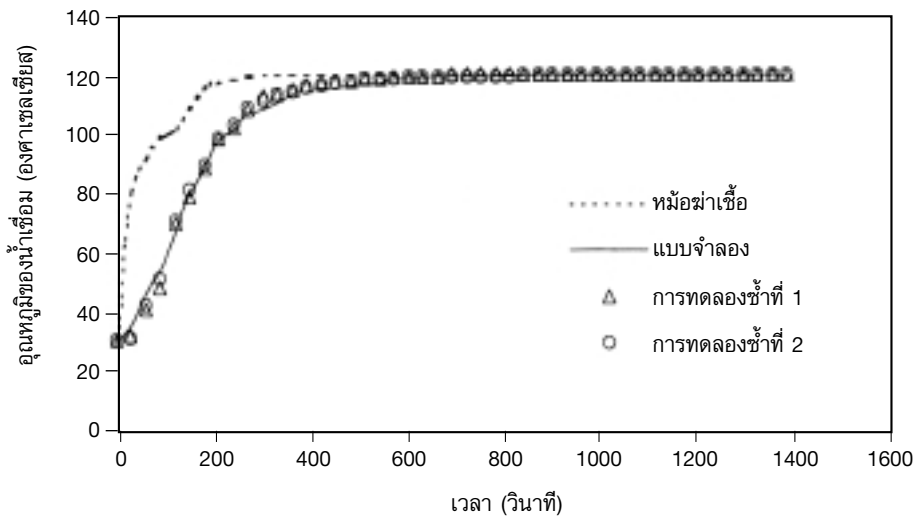
ค่าความเร็วสูงสุดที่พบอยู่ที่แนวแกนกลางกระป๋องมีทิศทางลงสู่ด้านล่างกระป๋อง โดยมีค่าเป็น  $4.7 \times 10^{-2}$  กับ  $2.2 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ที่เวลา 1.5 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ หรือลดลงถึงประมาณ 20 เท่า

ลักษณะของอุณหภูมิภายในกระป๋องที่เวลา 1.5 นาที และ 15 นาที แสดงในรูปที่ 3 (ก) และ 3 (ข) ตามลำดับนั้น จะเห็นว่าอุณหภูมิของน้ำเชื่อมบริเวณด้านบนสูงกว่าด้านล่างของกระป๋อง การกระจายอุณหภูมิมิมีลักษณะไม่สมมาตร เนื่องจากน้ำเชื่อมที่อยู่รอบชั้นสลับประตมอุณหภูมิไม่เท่ากัน ทำให้ชั้นสลับประตมด้านล่างกระป๋องมีอุณหภูมิต่ำกว่าด้านบนกระป๋อง ซึ่งตำแหน่งของจุดร้อนซ้ำที่สุดอยู่ที่ระยะ  $1/3$  ของความสูงของชั้น ( $r$  และ  $z$  เท่ากับ 2.025 และ 1.86 เซนติเมตร) และเป็นชั้นสลับประตมที่สองนับจากด้านล่างของกระป๋อง

## 5. การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและเวลาการให้ความร้อนจากการแทนค่าพจน์ต่างๆ ในแบบจำลองกับการวัดในการทดลอง

### อุณหภูมิของน้ำเชื่อม

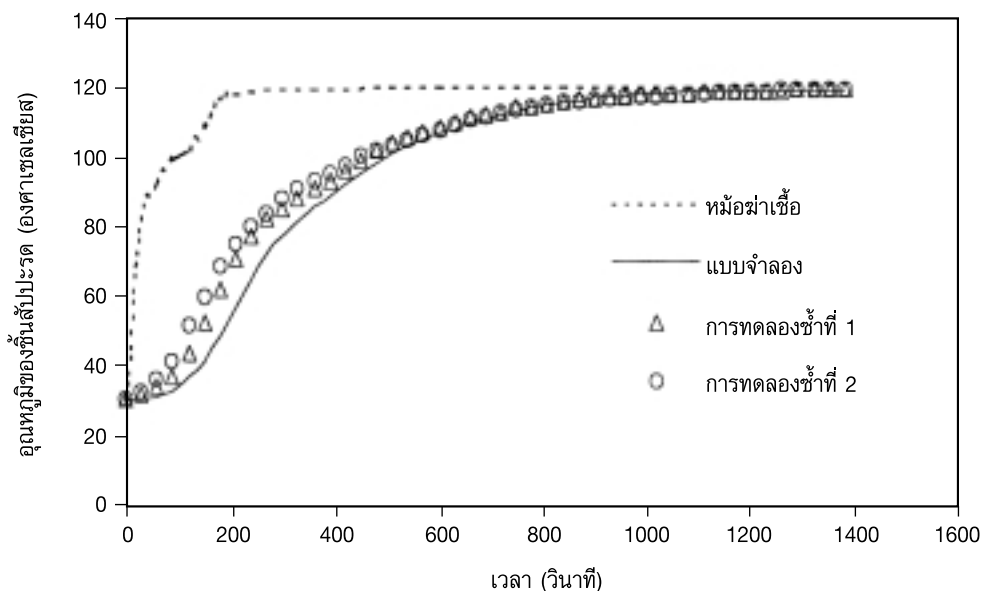
เมื่อเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิน้ำเชื่อมระหว่างค่าที่ได้จากการแทนค่าพจน์ต่างๆ ในแบบจำลองกับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จริง ณ ตำแหน่งแนวแกนกลางกระป๋องสูงจากก้นกระป๋องขึ้นมา 3.6 เซนติเมตร ได้ผลแสดงในรูปที่ 4 พบว่าในช่วงเวลา 100 วินาทีแรก อุณหภูมิของน้ำเชื่อมที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่วัดจากการทดลองเล็กน้อย เนื่องจากในช่วงแรกของการทดลองน้ำเชื่อม มีสภาวะเริ่มต้นอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง และตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิของน้ำเชื่อมเป็นบริเวณแกนกลางของกระป๋อง จึงอาจต้องอาศัยช่วงเวลาหนึ่งในการที่จะเริ่มเคลื่อนที่ หลังจากนั้นอุณหภูมิของน้ำเชื่อมที่ได้จากการทดลองจึงมีค่าสูงกว่าการคำนวณได้จากแบบจำลองเล็กน้อย อาจเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเชื่อมภายในกระป๋องที่ทดลองมีค่าสูงมาก ทำให้ความเร็วของน้ำเชื่อมเพิ่มมากขึ้นจนเกิดการไหลแบบปั่นป่วนเล็กน้อย ซึ่งในแบบจำลองกำหนดไว้ว่าการไหลของน้ำเชื่อมเป็นแบบราบเรียบ และเมื่อให้ความร้อนนานขึ้นความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเชื่อมภายในกระป๋องลดน้อยลง ทำให้มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อให้ความร้อนนานประมาณ 10 นาทีขึ้นไป อุณหภูมิของน้ำเชื่อมที่คำนวณได้จากแบบจำลองและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น โดยมีค่าความแตกต่างเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 1.45 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำเชื่อมระหว่างค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง

#### อุณหภูมิในชั้นสับปะรด

อุณหภูมิภายในชั้นสับปะรดที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลอง ณ ตำแหน่งแกนกลางที่ระยะ  $1/3$  ของความสูงของชั้นสับปะรด (ชั้นที่สองนับจากด้านล่างกระป๋อง) หรือค่า  $r$  และ  $z$  เท่ากับ 1.86 และ 2.025 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 5 พบว่าในช่วง 10 นาทีแรกของการให้ความร้อน อุณหภูมิของชั้นสับปะรดที่คำนวณจากแบบ



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในชั้นสับปะรดระหว่างค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง

จำลองมีค่าต่ำกว่าที่วัดได้จากการทดลอง ทั้งนี้อาจเป็นผลจากสมมติฐานที่กำหนดไว้ ได้แก่การกำหนดให้ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของชั้นสลับประตมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการฆ่าเชื้อซึ่งในความเป็นจริงเมื่อชั้นสลับประตได้รับความร้อนจะมีสมบัติต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เช่น ความชื้นเพิ่มขึ้นหรือมีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มลง ทำให้ค่าสมบัติทางความร้อนเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย นอกจากนี้ในแบบจำลองมีการกำหนดให้การไหลของน้ำเชื่อมเป็นแบบราบเรียบตลอดทั้งกระบวนการ แต่ในสภาวะจริงน้ำเชื่อมน่าจะมีการไหลแบบปั่นป่วนเล็กน้อยในช่วงแรกของการให้ความร้อน [6] รวมทั้งชั้นสลับประตปกติจะมีรูพรุน จึงอาจมีอิทธิพลของการแพร่ของน้ำเชื่อมที่แทรกผ่านเข้าสู่ชั้นสลับประตระหว่างการให้ความร้อนด้วย และในการจำลองนี้กำหนดให้ชั้นสลับประตไม่เคลื่อนที่ ซึ่งไม่ทราบชัดว่าในความเป็นจริงนั้นมีลักษณะเช่นไร อย่างไรก็ตามก็มีความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากทั้งสองอย่างมีค่าเฉลี่ยทั้งหมดเป็นร้อยละ 5.43 เทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งมีค่าไม่มากนัก

### เวลาฆ่าเชื้อ

เมื่อนำค่าอุณหภูมิภายในชั้นสลับประตและเวลาที่ตำแหน่งจุดร้อนช้าสุดทั้งจากแบบจำลองและผลการทดลองมาคำนวณเป็นค่าการฆ่าเชื้อ ( $F_0$ ) ด้วยวิธีทั่วไป พบว่า ค่า  $F_0$  ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองและผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 2.46 และ 2.73 นาที ตามลำดับ โดยมีค่าความแตกต่างกันร้อยละ 9.89 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง แสดงว่าแบบจำลองให้ผลการฆ่าเชื้อที่ปลอดภัยกว่าเล็กน้อย หรือกล่าวได้ว่าสามารถใช้การจำลองในลักษณะนี้แทนการวัดการแทรกผ่านความร้อนได้อย่างปลอดภัย

## 6. สรุปผลการวิจัย

การจำลองการถ่ายโอนความร้อนของสลับประตแวนในน้ำเชื่อมภายในกระป๋องในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนด้วยการใช้สมมูลมวล โมเมนต์ และความร้อน ร่วมกับสภาวะขอบเขตและเริ่มต้นที่เหมาะสม และหาคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่า ตำแหน่งจุดร้อนช้าที่สุดอยู่ในสลับประตชั้นที่สองนับจากด้านล่างกระป๋อง ที่ระยะ 1/3 ของความสูงของชั้นสลับประตแวน ผลจากแบบจำลองสามารถคำนวณอุณหภูมิของน้ำเชื่อมและสลับประตได้ค่อนข้างดี และเมื่อพิจารณาเป็นเวลาฆ่าเชื้อระหว่างค่าจากแบบจำลองและผลการทดลอง พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเอาการจำลองกระบวนการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องมาใช้แทนการวัดการแทรกผ่านความร้อนในกระบวนการกำหนดการฆ่าเชื้อต่อไป

## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับนักศึกษา และให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้

## 8. รายการสัญลักษณ์

$g$ : แรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ )	$H$ : ความสูง (m)
$k$ : ค่าการนำความร้อน ( $W/m \cdot ^\circ K$ )	$R$ : รัศมี (m)
$r$ : ระยะในแนวรัศมี (m)	$T$ : อุณหภูมิ ( $^\circ K$ )
$t$ : เวลา (s)	$\beta$ : ค่าการขยายตัวทางความร้อนของของไหล ( $1/^\circ K$ )
$u$ : ความเร็วในแนวรัศมี (m/s)	$\mu$ : ความหนืด (Pa.s)
$v$ : ความเร็วในแนวแกน (m/s)	$\theta$ : มุม (radian)
$z$ : ระยะแนวแกน (m)	$\rho$ : ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )
$C_p$ : ความจุความร้อนจำเพาะ ( $J/kg \cdot ^\circ K$ )	

### สัญลักษณ์กำกับบนและล่าง

— : ค่าที่อุณหภูมิอ้างอิงที่ 30 องศาเซลเซียส (303 เคลวิน)

$f$  : น้ำเชื่อม  $p$  : สับปะรด

$pi$   $po$  : รัศมีด้านในและนอกของชั้นสับปะรด  $w$  : ที่ผิวกระป๋อง

## 9. เอกสารอ้างอิง

1. Lenz, M. K. and Lund, D. B., 1978, "The Lethality-Fourier Number Method Heating Rate Variation and Lethality Confidence Intervals for Forced-Convection Heated Foods in Containers," *Journal of Food Process Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 227-271.
2. Lekwauwa, A. N. and Hayakawa, K., 1986, "Computerized Model for the Prediction of Thermal Responses of Packaged Solid-Liquid Food Mixture Undergoing Thermal Processes," *Journal of Food Science*, Vol. 51, No. 4, pp. 1042-1049, 1056.
3. Stoforos, N. G. and Merson, R. L., 1995, "A Solution to the Equations Governing Heat Transfer in Agitating Liquid/Particulate Canned Foods," *Journal of Food Process Engineering*, Vol. 18, pp. 165-185.
4. Sastry, S. K., Beelman, R. B., and Speroni, J. J., 1985, "A Three-Dimensional Finite Element Model for Thermally Induced Changes in Foods : Application to Degradation of Agaritine in Canned

Mushroom,” *Journal of Food Science*, Vol. 50, pp. 1296-1299, 1326.

5. Akerian, S. G., 1995, “Numerical Simulation of Unsteady Heat Transfer in Canned Mushrooms in Brine During Sterilization Processes,” *Journal of Food Engineering*, Vol. 25, pp. 45-53.

6. รัชชู ผลทิพย์, 2543, การจำลองกลไกการถ่ายโอนความร้อนของอาหารเหลว/อนุภาคบรรจุกระป๋องในระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 49-50.

7. Ghani, A. G. Mohammed, M. F., and Chen, X. D., 1998. “A CFD Simulation of the Coldest Point during Sterilization of Canned Food,” *The 26<sup>th</sup> Australian Chemical Engineering Conference*, 28-30 September 1998, Port Douglas, Queensland, p. 358.

8. Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N., 1960, *Transport Phenomena*, New York, Wiley & Sons, pp. 71-122, 319.

9. Rahman, S., 1995, *Food Properties Handbook*, Florida, CRC Press, pp. 179-336.

10. Sweat, V. E., 1974, “Experimental Values of Thermal Conductivity of Selected Fruits and Vegetables,” *Journal of Food Science*, Vol. 39, p. 1080.