

ค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนของขนุน

อัมพวัน ตันสกุล¹ ศักรินทร์ ภูมิรัตน์² และ สิริลักษณ์ เพ็ชรขาว³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนของขนุนในช่วงอุณหภูมิ 60-90°C และความชื้นร้อยละ 30-75 ค่าความร้อนจำเพาะวัดด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) ค่าการนำความร้อนวัดด้วยอุปกรณ์วัดค่าการนำความร้อนแบบ Line Heat Source (Probe)

จากการศึกษาพบว่าความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนของขนุน เมื่อความชื้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) และค่าการนำความร้อน (k) ของขนุนมีค่าสูงขึ้น ส่วนการวางเรียงชั้นขนุนแบบแนวนอนและแนวตั้งทำให้ค่าการนำความร้อนต่างกันเพียงเล็กน้อยสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางความร้อนของเนื้อขนุนกับสัดส่วนความชื้น (X_w) และอุณหภูมิ (T) คือ $C_p = 1.053 + 5.069X_w + 0.01035T - 3.05X_w^2$ ($R^2 = 0.901$) และ $k = 1.111 - 0.164X_w^2 - 0.0247T + 0.000163T^2 + 0.875X_w T$ ($R^2 = 0.841$)

คำสำคัญ : ขนุน / ค่าความร้อนจำเพาะ / ค่าการนำความร้อน

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ

³ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

Specific Heat and Thermal Conductivity of Jackfruit

Ampawan Tansakul ¹ Sakarindr Bhumiratana ² and Siriluk Petchkaw ³

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

Abstract

Specific heat and thermal conductivity of jackfruit flesh were determined at temperature range 60–90°C and moisture content range 30–75 %. The specific heat was measured by the Differential Scanning Calorimeter (DSC). The bulk thermal conductivity was performed using the Line Heat Source (probe) Method.

The bulk thermal conductivity (**k**) and the specific heat (C_p) of jackfruit flesh were found to depend on the moisture content and the temperature. They were found to increase with increasing moisture content (X_w) and temperature (T). Thermal conductivity changed slightly with the different direction. The empirical equations of these properties were found to be $C_p = 1.053 + 5.069 X_w + 0.01035T - 3.05X_w^2$ ($R^2=0.901$) and $k = 1.111 - 0.164X_w^2 + 0.0247T + 0.000163T^2 + 0.875 X_w T$ ($R^2=0.841$)

Keywords : Jackfruit / Specific Heat / Thermal Conductivity

¹ Lecturer, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering

² Associate Professor, National Center for Genetic Engineering and Biotechnology

³ Graduate Student, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering

บทนำ

ขนุนเป็นผลไม้เมืองร้อนที่พบได้ทั่วไปในประเทศไทย ปัจจุบันมีการสนับสนุนให้ปลูกเพิ่มมากขึ้น ขนุนมีรสชาติดี กลิ่นหอม เนื้อขนุนสามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิดเช่น ขนุนในน้ำเชื่อม บรรจุกระป๋อง ขนุนอบแห้งกรอบ ขนุนเชื่อมแห้ง สำหรับการอบแห้งต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาของอาหารระหว่างกระบวนการทำแห้ง จึงจำเป็นต้องทราบสมบัติทางความร้อนของอาหารนั้น สมบัติที่สำคัญคือค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อน ซึ่งขึ้นกับหลายปัจจัยได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร อุณหภูมิ และโครงสร้างทางกายภาพ [1] ข้อมูลสมบัติทางความร้อนเป็นค่าเฉพาะของวัตถุดิบแต่ละชนิด และมีค่อนข้างจำกัด การสร้างสมการคณิตศาสตร์สำหรับประเมินสมบัติดังกล่าวโดยอาศัยปัจจัยที่เกี่ยวข้องจึงได้รับความสนใจและมีผู้ศึกษากันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น

Choi [2] สร้างแบบจำลองทำนายสมบัติทางความร้อนของอาหารจากสัดส่วนโดยน้ำหนักหรือโดยปริมาตรของแต่ละองค์ประกอบหลักกับค่าสมบัติทางความร้อนของแต่ละองค์ประกอบหลักนั้น ที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง -40 ถึง 150 °C

$$C_p = \sum c_{p_i} X_i^w \quad (1)$$

$$k = \sum k_i X_i^v \quad (2)$$

โดย C_p และ k_i คือค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนของแต่ละองค์ประกอบตามลำดับ X_i^w และ X_i^v คือสัดส่วนโดยน้ำหนักและโดยปริมาตรของแต่ละองค์ประกอบ

Vagenas และคณะ [3] พัฒนาสมการทำนายค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนจากข้อมูลในเอกสารอ้างอิงด้วยวิธีถดถอย ได้สมการเอมไพริคอลทำนายค่าความร้อนจำเพาะของผลไม้ ($X_w = 0.25-0.90$ อุณหภูมิ $0-90$ °C $R^2=0.669$) และสมการทำนายค่าการนำความร้อนของผลไม้ ($X_w = 0-0.96$ อุณหภูมิ $0-80$ °C $R^2=0.835$) ที่ขึ้นกับสัดส่วนความชื้น (X_w) และอุณหภูมิ (T , °C)

$$C_o = 1.3767 + 2.9293 X_w + 3.181 \times 10^{-3} T \quad (3)$$

$$k = -0.022 + 0.587 X_w + 0.001924 T \quad (4)$$

สมการที่ใช้ทำนายอาหารทั่วไปนี้สมมติให้แต่ละองค์ประกอบในอาหารต่างชนิดมีค่าสมบัติทางความร้อนที่เหมือนกัน ซึ่งไม่จริงเสมอไป [1] สมการเฉพาะของวัตถุดิบแต่ละชนิดจึงประมาณค่าได้ถูกต้องมากกว่า งานวิจัยนี้ได้กำหนดขึ้นเพื่อประเมินสมบัติทางความร้อนของเนื้อขนุนสำหรับการแปรรูปด้วยความร้อนสูงและการอบแห้ง โดยการพิจารณาผลของปริมาณความชื้น อุณหภูมิ และการวางเรียงชั้นขนุนในลักษณะที่ต่างกันแบบแนวนอนและแนวตั้ง แล้วสร้างสูตรสมการเอมไพริคอลของความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนกับปัจจัยเหล่านี้

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่าง

ขนุนที่ใช้เป็นขนุนหนัง (*Artocarpus heterophyllus* Lamk.) พันธุ์มาเลย์ เลือกผลขนุนแก่ที่มีน้ำหนักผลประมาณ 10-20 กิโลกรัม นำมาบ่มจนสุก แยกเนื้อขนุน นำมาหั่นแบ่งครึ่งตามยาว คัดที่มีสีเหลืองทองและความหนาใกล้เคียงกัน ขนุนที่ใช้ในการทดลองมีค่าความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 75.94 ± 3.52 ปริมาณน้ำตาล 20.98 ± 3.42 °Brix ความหนาแน่น 1029 ± 22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และสีอยู่ในช่วง (H V/C) 2.01Y 5.91/6.17 ถึง 3.75Y 7.25/8.71 เตรียมให้มีค่าความชื้นตามที่ต้องการ โดยอบในตู้อบอุณหภูมิ 70 °C (เก็บไว้ที่ 5 °C จนกว่าจะทำการทดลอง)

2. ค่าความร้อนจำเพาะ

วัดค่าความร้อนจำเพาะของขนุนที่ความชื้นร้อยละ 30 45 60 75 และอุณหภูมิ 60 70 80 90 °C โดยใช้เครื่อง DSC แบบกำลังชดเชย (Perkin Elmer รุ่น Pyris 1, USA.) ซึ่งตรวจวัดและบันทึกความแตกต่างของพลังงานความร้อนที่ชดเชยเพื่อทำให้ตัวอย่างและตัวอ้างอิงอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งเสมอตลอดการทดลอง ด้วยการทำงานร่วมกันของตัวตรวจวัดอุณหภูมิและตัวให้ความร้อน ผลการวัดแสดงเป็นกราฟความร้อนและอุณหภูมิ หากค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่างโดยการวัดเปรียบเทียบกับตัวมาตรฐานแซฟไฟร์ (Sapphire, Al_2O_3) ที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะแล้วคำนวณจากสมการที่ (5)

$$C_p = \frac{Y}{Y'} \frac{m'}{m} C'_p \quad (5)$$

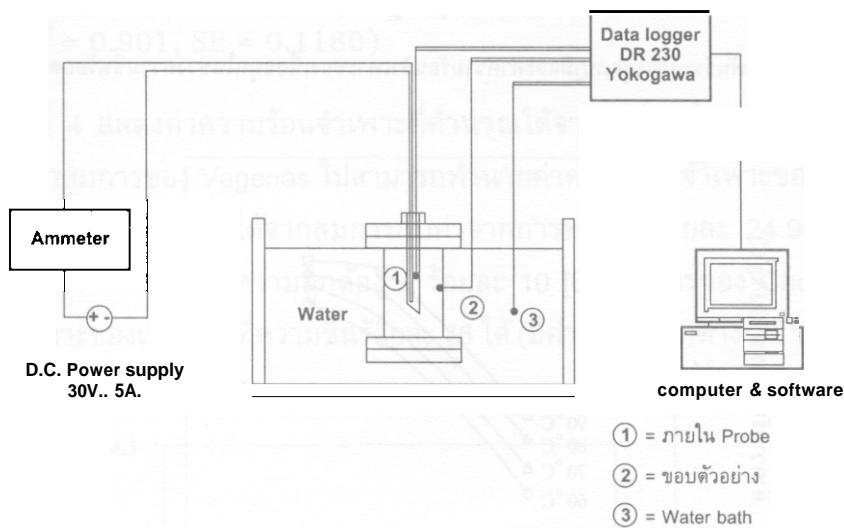
โดย	C_p	ค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง, kJ/kg °C
	C'_p	ค่าความร้อนจำเพาะของแซฟไฟร์, kJ/kg °C
	m	มวลของตัวอย่าง, kg.
	m'	มวลของแซฟไฟร์, kg.
	Y	ค่าเบี่ยงเบนจาก Baseline ของกราฟความร้อนและอุณหภูมิของตัวอย่าง
	Y'	ค่าเบี่ยงเบนจาก Baseline ของกราฟความร้อนและอุณหภูมิของแซฟไฟร์

3. ค่าการนำความร้อน

อุปกรณ์วัดค่าการนำความร้อนออกแบบและสร้างโดย อัจฉรา นิต์ศันกุล [4] อาศัยหลักการของ Line Heat Source Probe ประกอบด้วยชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำความร้อน ซึ่งได้แก่ Probe ทำจากเข็มฉีดยามีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.65 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.4 mm. และยาว 75 mm. ภายในบรรจุด้วยลวดให้ความร้อนเป็นลวดนิโครมกับตัววัดอุณหภูมิคือเทอร์โมคัปเปิ้ล type E

เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm. ครอบกัใส่ตัวอย่างทำจากพลาสติกอะคริลิกมีเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 50 mm. สูง 95 mm. แสดงการต่อชุดอุปกรณ์วัดดังรูปที่ 1 วัดค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนที่ความชื้นร้อยละ 30 45 60 75 ที่อุณหภูมิ 60 70 80 90 °C และการวางเรียงชั้นขนุนแบบแนวนอนและแนวตั้ง การเรียงแบบแนวนอนจะตัดชั้นขนุนให้เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับครอบกัใส่ตัวอย่างแล้วเรียงใส่ครอบกัจนเต็ม ส่วนการเรียงในแนวตั้งจะเรียงชั้นขนุนโดยวางตะแคงตามแนวตั้งจนเต็ม ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างขนุนที่เรียงใส่ลงครอบกัใส่ตัวอย่าง หาความหนาแน่นโดยรวม (bulk density) ของตัวอย่างขนุนโดยคำนวณจาก สมการที่ (6)

$$\text{ความหนาแน่นโดยรวม} = \frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตรของครอบกัใส่ตัวอย่าง}} \quad (6)$$

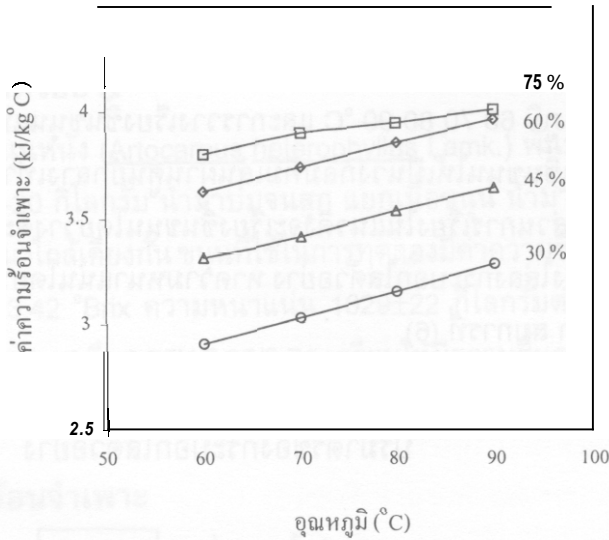


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำความร้อนแบบ Probe

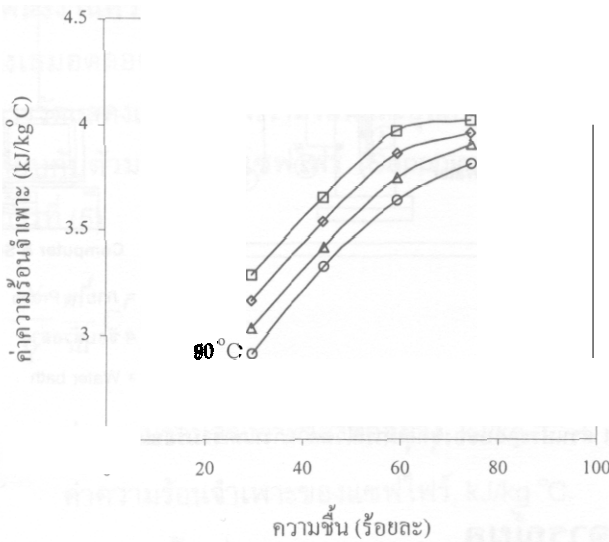
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. ค่าความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะของขนุนที่ความชื้นร้อยละ 30-75 และอุณหภูมิ 60-90 °C มีค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ อยู่ในช่วง 2.905-4.009 kJ/kg°C ค่าความร้อนจำเพาะของขนุนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ และมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพหุนามเกี่ยวกับความชื้น ดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะของขนุนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อความชื้นของขนุนเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจำเพาะจะสูงขึ้นเนื่องจากมีสัดส่วนของน้ำซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะสูงเพิ่มขึ้น [5] ความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะมากกว่าอุณหภูมิ โดยความชื้นในช่วงร้อยละ 30-75 ทำให้ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของขนุนเพิ่มขึ้นร้อยละ 26.80 และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 60-90 °C ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.36



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อขนุนในช่วงความชื้นร้อยละ 30 - 75



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อขนุนในช่วงอุณหภูมิ 60-90 °C

Rahmann [5] กล่าวถึงแนวคิดของ Siebel ที่ทำนายค่าความร้อนจำเพาะของอาหารความชื้นสูงจากผลรวมของค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_w) กับค่าความร้อนจำเพาะของแข็ง (C_s) มีรูปแบบของสมการคือ

$$C_p = C_s + (C_w - C_s)X_w \tag{7}$$

หาสมการความสัมพันธ์ของเนื้อขนุนที่มีรูปแบบดังสมการที่ 7 โดยวิเคราะห์การถดถอย ข้อมูลการทดลอง ได้สมการทำนายค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อขนุนจากสัดส่วนความชื้นที่มีค่า R^2 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error, SE) ดังนี้

$$C_p = 2.623 + 1.778 X_w \tag{8}$$

($R^2 = 0.752$, SE = 0.182)

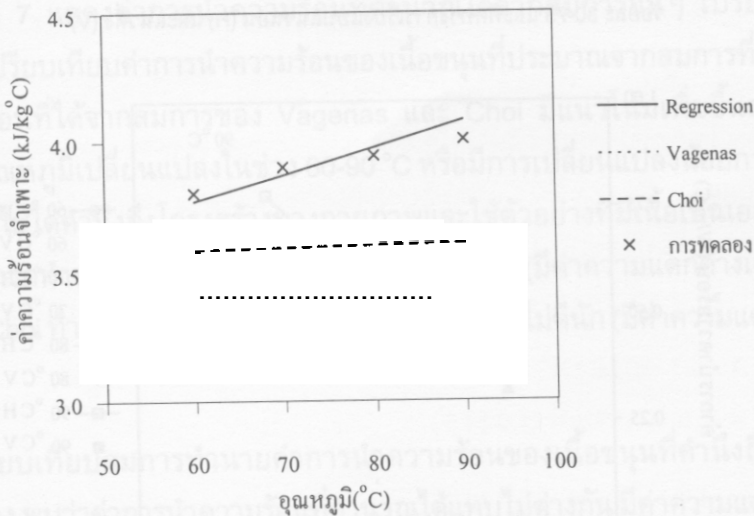
จากสมการที่ 7 และ 8 ได้ค่า $C_s = 2.623 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ และค่า $C_w = 4.401 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของน้ำที่ได้จากสมการที่ 8 หรือค่าความร้อนของน้ำในเนื้อขนุนมีค่าสูงกว่าน้ำบริสุทธิ์ อาจเนื่องมาจากค่า C_w ของน้ำอยู่ในโครงสร้าง (bound water) มีค่าสูงกว่าน้ำอิสระ (free water) หรืออาจมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะของน้ำในอาหาร [5] ดังนั้นการใช้สมการทำนายค่าความร้อนจำเพาะตามแนวคิดของ Siebel จึงน่าจะใช้ค่า C_s และ C_w ที่ได้จากการทดลองวัดค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่ความชื้นระดับต่างๆ มากกว่าการวัดค่า C_s จากอาหารแห้งและใช้ค่า C_w ของน้ำบริสุทธิ์

สมการแสดงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อขนุนกับสัดส่วนความชื้น ($X_w = 0.30-0.75$) และอุณหภูมิ ($60-90^\circ\text{C}$) จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อนคือ

$$C_p = 1.053 + 5.069 X_w + 0.01035T - 3.05 X_w^2 \quad (9)$$

$(R^2 = 0.901, SE = 0.1180)$

จากรูปที่ 4 แสดงค่าความร้อนจำเพาะที่คำนวณได้จากสมการอื่นๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง พบว่าสมการของ Vagenas ไม่สามารถทำนายค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อขนุนได้ มีความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างค่าที่ได้จากสมการกับค่าจากการทดลองร้อยละ 24.96 (สมการทำานสำหรับงานเชิงวิศวกรรมต้องการความถูกต้อง \pm ร้อยละ 10 [6]) สมการของ Choi สามารถทำนายค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อขนุนที่ความชื้นร้อยละ 75 ได้ (มีค่าความแตกต่างเฉลี่ยร้อยละ 8.19) แต่แนวโน้มทำนายได้ไม่ดีที่อุณหภูมิสูง

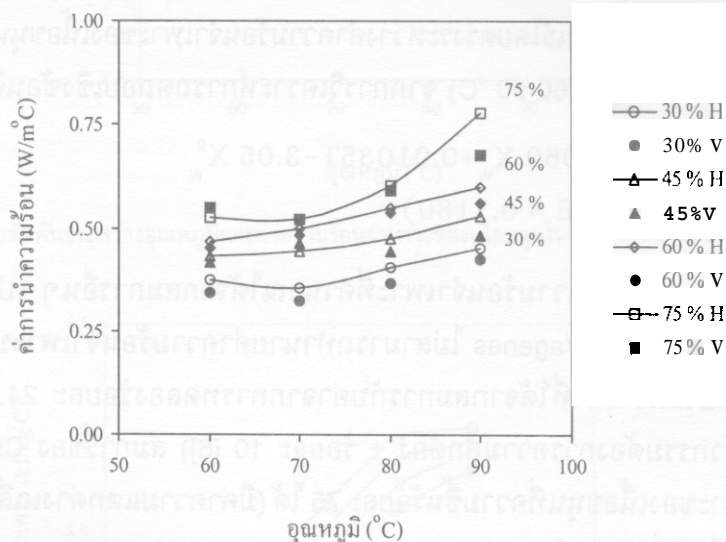


รูปที่ 4 ค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อขนุนที่ระดับความชื้นร้อยละ 75

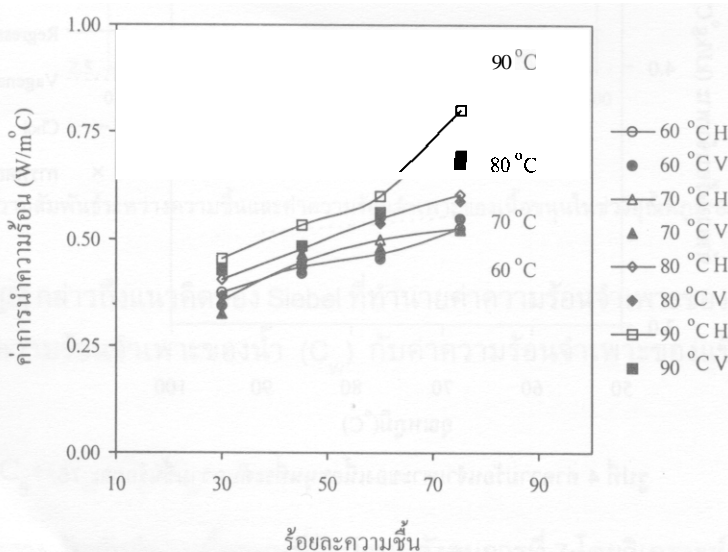
2. ค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนของ Agar gel 0.5 % ที่ 30°C มีค่าเฉลี่ยจากการวัด 4 ซ้ำเท่ากับ $0.617 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.007) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (ค่าการนำความร้อนของ Agar gel 0.5% ที่ 30°C เท่ากับ $0.628 \text{ w/m}^\circ\text{C}$ [7]) มีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าอ้างอิงร้อยละ 1.83 ดังนั้นอุปกรณ์วัดสามารถวัดค่าการนำความร้อนได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

ตัวอย่างขนุนที่ใช้ในการทดลองวัดค่าการนำความร้อนมีค่าความหนาแน่นโดยรวม (bulk density) 930-1050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขึ้นอยู่กับระดับความชื้น ที่ระดับความชื้นเดียวกันค่าความหนาแน่นโดยรวมของขนุนที่เรียงแบบแนวนอนและแนวตั้งมีค่าไม่แตกต่างกันค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนที่ความชื้นร้อยละ 30-75 อุณหภูมิ 60-90 °C และการวางเรียงชั้นขนุนแบบแนวนอนกับแนวตั้งมีค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ อยู่ในช่วง 0.343-0.780 W/m°C ความชื้น อุณหภูมิ และการวางเรียงชั้นขนุน มีผลต่อค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนที่ความชื้น อุณหภูมิ และทิศทางต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนที่ความชื้นระหว่างร้อยละ 30-75 และทิศทางการเรียงแบบแนวนอน (H) และแนวตั้ง (V)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนที่อุณหภูมิระหว่าง 60-90 °C และทิศทางการเรียงแบบแนวนอน (H) และแนวตั้ง (V)

ความชื้นของเนื้อขนุนที่เพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 30-75 ทำให้ค่าการนำความร้อนเฉลี่ยสูงขึ้นร้อยละ 56.54 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่าง 60 ถึง 90 °C ทำให้ค่าการนำความร้อนเฉลี่ยสูงขึ้นร้อยละ 26.12 และการวางเรียงขนุนแบบแนวนอนและแนวตั้งทำให้ค่าการนำความร้อนเฉลี่ยเปลี่ยนไป ร้อยละ 5.70 โดยค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนเพิ่มขึ้นแบบโพลีโนเมียลกับความชื้นและอุณหภูมิ

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนกับสัดส่วนความชื้น ($X_w = 0.30-0.75$) และอุณหภูมิ (60-90 °C) และทิศทางการวางเรียงของชั้นขนุนแบบแนวนอน ($d = 0$) และแบบแนวตั้ง ($d = 1$) จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อนคือ

$$k = 1.126 - 0.16 X_w^2 - 0.025T + 0.0001635T^2 + 0.8766 X_w T - 0.025d \quad (10)$$

$$(R^2 = 0.856, SE = 0.0396)$$

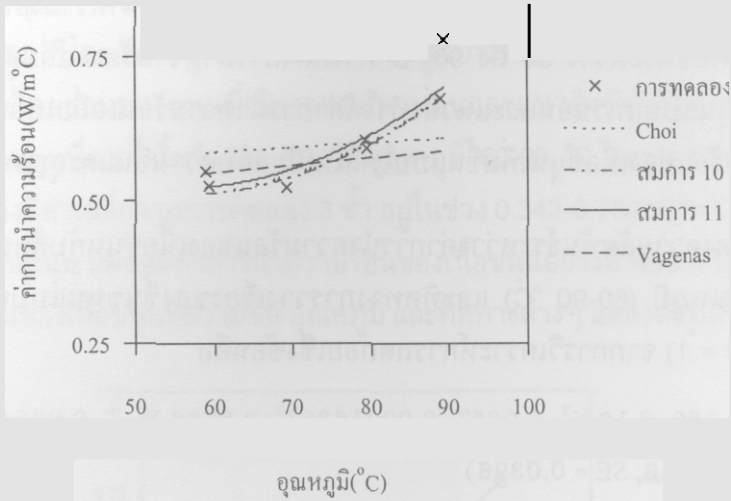
ถ้าพิจารณาผลของการวางเรียงขนุนต่อค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุน พบว่ามีผลค่อนข้างน้อยเนื่องจากทำให้ค่าการนำความร้อนต่างกันเพียงร้อยละ 5.7 และสมการทำนายสำหรับงานเชิงวิศวกรรมต้องการความถูกต้อง \pm ร้อยละ 10 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนกับสัดส่วนความชื้น ($X_w = 0.30-0.75$) และอุณหภูมิ (60-90 °C) จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อนคือ

$$k = 1.111 - 0.164X_w^2 - 0.0247T + 0.000163T^2 + 0.875 X_w T \quad (11)$$

$$(R^2 = 0.841, SE = 0.0415)$$

จากรูปที่ 7 แสดงค่าการนำความร้อนที่คำนวณได้จากสมการอื่นๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง และเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนที่ประมาณจากสมการที่ 10 และ 11 พบว่าค่าการนำความร้อนที่ได้จากสมการของ Vagenas และ Choi มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่างจากข้อมูลจากการทดลองเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วง 60-90 °C หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า อาจเพราะแบบจำลองของ Choi ไม่ได้คำนึงถึงโครงสร้างทางกายภาพและใช้ตัวอย่างที่มีเนื้อเป็นเอกพันธ์ สมการของ Vagenas ไม่สามารถทำนายค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนได้ (มีค่าความแตกต่างเฉลี่ยร้อยละ 12.46) ส่วนสมการของ Choi ทำนายค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนได้ไม่ดีนัก (มีค่าความแตกต่างเฉลี่ยร้อยละ 9.90)

เมื่อเปรียบเทียบสมการทำนายค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนที่คำนึงถึงทิศทางและแบบไม่คำนึงถึงทิศทาง พบว่าค่าการนำความร้อนที่คำนวณได้แทบไม่ต่างกัน มีค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 3.69 และ 3.98 ตามลำดับ ถ้าคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งานและจำนวนของตัวแปรที่ต้องการในการทำนายแล้ว สมการที่ไม่คำนึงถึงทิศทาง (สมการที่ 11) เหมาะสมกว่า



รูปที่ 7 ค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนที่ระดับความชื้นร้อยละ 75

สรุป

ค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อขนุนในช่วงอุณหภูมิ 60-90 °C และความชื้นร้อยละ 30-75 มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.905-4.009 kJ/kg°C ค่าความร้อนจำเพาะของขนุนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความชื้นและอุณหภูมิสูงขึ้น โดยความชื้นมีผลมากกว่าอุณหภูมิ และได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อขนุนกับ สัดส่วนความชื้นและอุณหภูมิคือ

$$C_p = 1.053 + 5.069 X_w + 0.01035T - 3.05 X_w^2$$

$$(R^2 = 0.901, SE = 0.1180)$$

ค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนในช่วงอุณหภูมิ 60-90 °C ความชื้นร้อยละ 30-75 และการวางเรียงชั้นขนุนแบบแนวนอนและแนวตั้ง มีค่าอยู่ในช่วง 0.343-0.780 W/m°C ค่าการนำความร้อนของขนุนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความชื้นและอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนการวางเรียงแบบแนวนอนและแนวตั้งทำให้ค่าการนำความร้อนต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นและอุณหภูมิ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อขนุนกับสัดส่วนความชื้นและอุณหภูมิคือ

$$k = 1.111 - 0.164X_w^2 - 0.0247T + 0.000163T^2 + 0.875 X_w T$$

$$(R^2 = 0.841, SE = 0.0415)$$

สมการทำนายของ Choi และ Vagenas ไม่สามารถทำนายค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนของเนื้อขนุนได้อย่างถูกต้อง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ส่วนงานกลาง สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ปีงบประมาณ 2541 แก่โครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Sweat, V.E., 1995, "Thermal Properties of Foods," Engineering Properties of Foods, 2nd ed, Edited by Rao, M.A. and Rizvi, **S.S.H.**, Marcel Dekker, New York, p.126-135.
2. Choi, **Y.**, 1985, Food Thermal Property Prediction as Effected by Temperature and Composition, Doctor of Philosophy Thesis, Purdue University, 269 p.
3. Vagenas, **G.K.**, Drouzas, A.E., and Marinos-Kouris, D., 1990, Predictive Equations for Thermophysical Properties of Plant Foods, Engineering and Food *Vol.1* Physical Properties and Process Control, Edited by Spiess, W.E.L. and Schubert, H., Elsevier Applied Science, London, pp. 399-407.
4. อัจฉรา นิต์ศน์กุล, 2541, การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดย **Line Heat Source (Probe) Method** ที่สภาวะเหนือจุดเยือกแข็ง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 110 หน้า.
5. Rahman, **S.**, 1995, Food Properties Handbook, CRC Press, New York, pp. 225-337.
6. Berg, L. **van den**, and Lentz, C.P., 1975, "Effect of Composition on Thermal Conductivity of Fresh and Frozen Food," Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 79-83.
7. Sweat, V.E. and Haugh, C.G., 1974, "A Thermal Conductivity Probe for Small Food Samples," Transactions of *the ASAE*, Vol. 17, No. 1, pp. 56-58