หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การวัดค่าสมบัติทางความร้อน

2.1.1 การวัดค่าความร้อนจำเพาะ

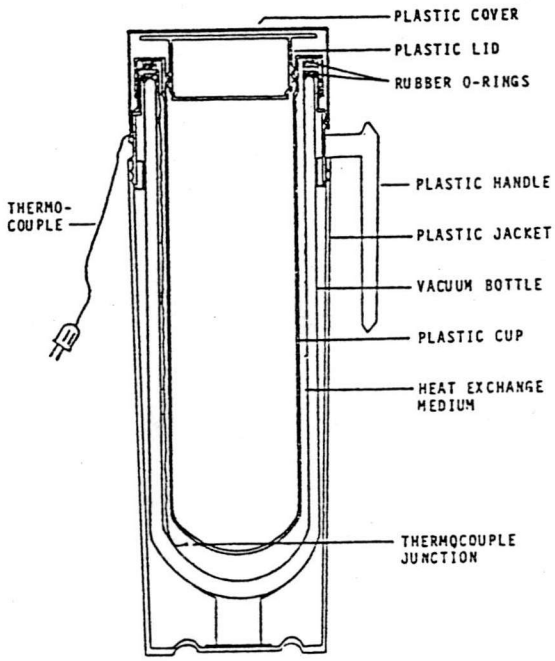
ความร้อนจำเพาะเป็นปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิของสาร มวล 1 หน่วยไป 1 องศา วิธีที่นิยมใช้ในการหาค่าความร้อนจำเพาะคือ

2.1.1.1 การใช้แคลอริมิเตอร์

วิธีนี้ใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน เครื่องมือที่ใช้สำหรับหาค่าความร้อนจำเพาะมีอยู่หลายแบบ แต่หลักการทำงานคล้ายกัน คือใช้แคลอริมิเตอร์ที่มีลักษณะเป็น vacuum - jacket มีช่องที่ใส่กว้างพอสำหรับใส่ตัวอย่าง มีฝาปิดอย่างมิดชิด และมี thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำซึ่งใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนในแคลอริมิเตอร์ (7,8) ดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ยังมีการป้องกันการสูญเสียความร้อนโดยมีฉนวนหุ้มอย่างเพียงพอ เพื่อให้เป็นภาวะ adiabatic ตามทฤษฎี

ความถูกต้องของวิธีนี้ขึ้นกับสมมุติฐานที่ว่า ไม่มีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นในขณะทดลอง ซึ่งอาจทำได้โดยใช้ฉนวนหุ้ม หรือโดยการทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นของแคลอริมิเตอร์ต่ำกว่าอุณหภูมิของบรรยากาศ และใช้ตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงใส่ลงไป จะทำให้การได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อมของแคลอริมิเตอร์ในตอนแรกของการทดลอง ไปชดเชยกับการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง (7) ข้อดีของการใช้แคลอริมิเตอร์ในการหาค่าความร้อนจำเพาะคือ การเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนในการทดลองง่าย สามารถใช้ผู้ที่มีความชำนาญน้อยทดลองได้ และสามารถใช้ได้ไม่เพียงแต่ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ยังนำไปใช้ในขั้นตอนการผลิตได้ด้วย เนื่องจากแคลอริมิเตอร์มีน้ำหนักเบาและมีปริมาตรน้อย มีช่องใส่ตัวอย่างกว้างพอ จึงทำให้การถ่ายตัวอย่างจากขั้นตอนการผลิตลงในแคลอริมิเตอร์ง่าย และใช้เวลาน้อย (8) การคำนวณค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน ดังสมการ (1)

$$C_{PS}.W_s.(\Delta T_s) = C_{Pw}.W_w.(\Delta T_w) + H_c.(\Delta T_c) \qquad .....(1)$$



รูปที่ 2.1 แคลอริมิเตอร์ที่ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะ (8)

การใช้แคลอริมิเตอร์ในการหาค่าความร้อนจำเพาะอาจแบ่งเป็น 2 วิธี คือ

ก. Method of Mixture ทำโดยการผสมตัวอย่างและสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน ที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะ (ปกติจะใช้น้ำ) ในแคลอริมิเตอร์แล้ววัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปต่อเวลา นำไปคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้หลักการอนุรักษ์-พลังงาน วิธีนี้ไม่เหมาะกับตัวอย่างที่สามารถละลายได้ในสารตัวกลาง เพราะจะมีค่าความร้อนของการละลายเข้ามาเกี่ยวข้อง และตัวอย่างยังถูกทำลายด้วย (7) ตัวอย่างที่เคยใช้วิธี method of mixture ในการหาค่าความร้อนจำเพาะ เช่น มะพร้าวตากแห้งเส้น (9) เมล็ดธัญพืช (10,11,12) เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี และถั่วเหลือง เป็นต้น

ข. Modified Method of Mixture หรือ Indirect Mixing Method วิธีนี้ตัวอย่างและสารตัวกลางจะไม่ส้มผัสกัน โดยใส่ตัวอย่างภายในภาชนะบรรจุแยกจากสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน วัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ วิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องการละลายของตัวอย่างในสารตัวกลาง (8,13)

เมื่อเปรียบเทียบการหาค่าความร้อนจำเพาะ โดยวิธี method of mixture กับวิธี modified method of mixture พบว่าวิธี method of mixture เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำ และไม่ละลายในสารตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน เพราะไม่ทำให้เกิดปัญหาการละลายของตัวอย่างในสารตัวกลาง ขณะที่วิธี modified method of mixture ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธี method of mixture แต่ไม่มีการสัมผัสกันระหว่างตัวอย่างและสารตัวกลาง เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีความชื้นสูง (8)

2.1.1.2 Differential Scanning Calorimeter (DSC)

วิธีนี้ใช้หลักในการวัดผลของความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน เครื่องบันทึกจะบันทึกพลังงานที่ได้รับหรือสูญเสียไปขณะที่มีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในรูปของ thermogram ซึ่งพื้นที่ใต้ thermogram จะนำไปคำนวณหาความร้อนที่ตัวอย่างได้รับหรือคายออก วิธีนี้ให้ผลถูกต้องและรวดเร็ว ใช้ตัวอย่างปริมาณน้อย วิธีนี้เคยใช้วัดค่าความร้อนจำเพาะของยาสูบ (4) ถั่วลิสง (14) และแป้งถั่วเหลือง (15) เป็นต้น ข้อเสียของวิธีนี้คือเครื่องมือมีราคาแพงมาก ต้องการการเตรียมตัวอย่างอย่างระมัดระวัง และต้องใช้ผู้ทดลองที่มีความชำนาญ

2.1.2 การวัดค่าสภาพนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งซึ่งลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบการนำความร้อน จะพบเป็นปรากฏการณ์รูปแบบแรกของการถ่ายโอนความร้อนในของแข็งหรือระหว่างของแข็ง สภาพนำความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร็วของการถ่ายโอนความร้อน ถ้าสภาพนำความร้อนมีค่าสูง อัตราเร็วของการถ่ายโอนความร้อนก็จะมีค่าสูงเช่นกัน และสภาพนำความร้อนนี้จะเป็นสมบัติเฉพาะของวัตถุแต่ละชนิด ซึ่งวัตถุทางชีวภาพ (biological materials) จะมีค่าสภาพนำความร้อนที่แตกต่างกันมากกว่าวัตถุทางวิศวกรรม (engineering materials) เนื่องจากวัตถุทางชีวภาพมีลักษณะไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน และมีโครงสร้างของเซลและองค์ประกอบอื่นๆ ต่างๆกันไป (7)

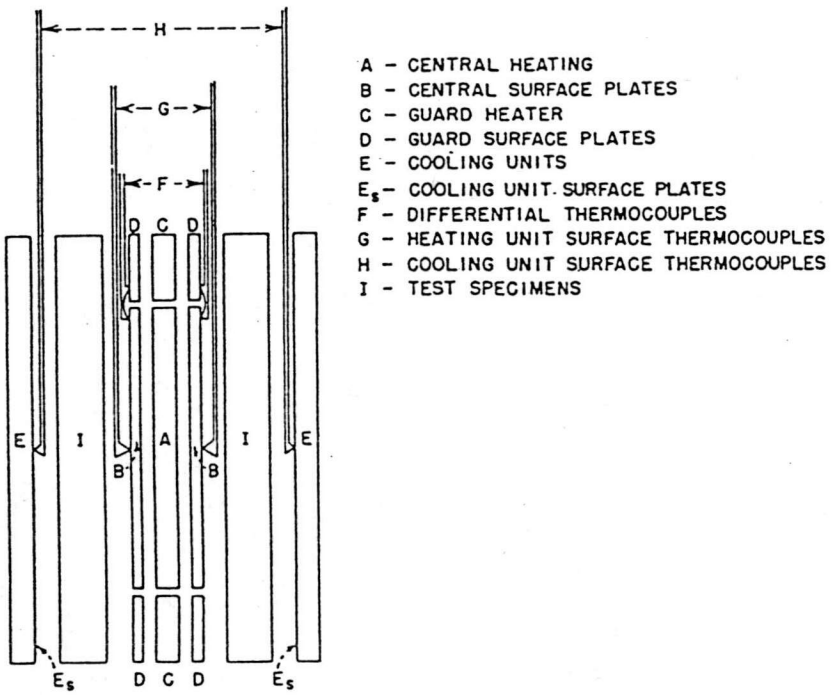
โดยทั่วไปวิธีวัดค่าสภาพนำความร้อนมี 2 วิธีคือ steady - state method และ transient method ซึ่ง steady - state method นี้ จะเป็นการวัดค่าสภาพนำความร้อนในภาวะที่ปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนต่อหนึ่งหน่วยเวลามีค่าคงที่ คืออุณหภูมิที่จุดใดจุดหนึ่งในระบบมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนไปกับเวลา ซึ่งเป็นลักษณะการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อระบบอยู่ในภาวะสมดุล ขณะที่วิธี transient จะวัดค่าสภาพนำความร้อนในระยะเริ่มต้น เมื่อระบบยังอยู่ในภาวะไม่สมดุล ซึ่งปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนจะเปลี่ยนแปรไปกับเวลา อุณหภูมิที่จุดใดจุดหนึ่งในระบบมีค่าไม่คงที่และเปลี่ยนแปรไปกับเวลา

2.1.2.1 Steady - State Method

การหาค่าสภาพนำความร้อนโดย steady - state method (16) ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การใช้ guarded hot plate วิธีนี้ให้ผลค่อนข้างถูกต้องเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง หรืออาหารแช่แข็งที่มีลักษณะเป็นแผ่น (slab) โดยมีแหล่งให้ความร้อน (heat source) เป็นตัวให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง และมีแหล่งรับความร้อน (heat sink) เป็นตัวรับความร้อน มี guard heater สำหรับป้องกันการสูญเสียความร้อน ดังรูปที่ 2.2 และคำนวณค่าสภาพนำความร้อนสำหรับตัวอย่างที่มีความหนา l จากสมการ

$$k = ql/(a\Delta T) \qquad \text{.....(2)}$$

ค่าสภาพนำความร้อนวัดหลังจากที่ตัวอย่างถึงภาวะสมดุลแล้ว ซึ่งอาจใช้เวลานานหลายชั่วโมง และวิธีนี้ให้ผลที่มีความถูกต้องต่ำสำหรับอาหารที่มีความชื้นสูง เนื่องจากเกิดการสูญเสียความชื้นในระหว่างการทดลอง ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วิธีนี้ เช่น การหาค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็ง เจลาตินเจลที่ความเข้มข้นต่างๆ ไขมันและเนื้อสัตว์ชนิดต่างๆ (17) freeze-dried gel (18) และ tomato paste ที่ความเข้มข้น 27-44 ° Brix (19) เป็นต้น

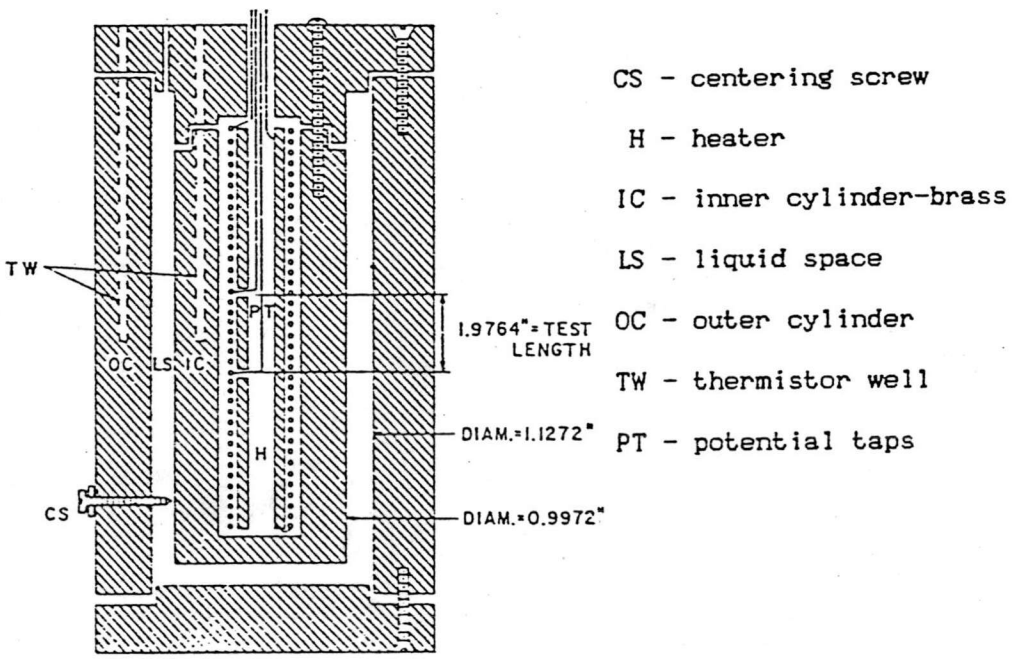


รูปที่ 2.2 เครื่อง guarded hot plate สำหรับหาค่าสภาพนำความร้อน (7)

Concentric cylinder method ก็เป็น steady - state method ที่ใช้หาค่าสภาพนำความร้อนอีกวิธีหนึ่ง โดยที่แหล่งให้ความร้อนมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก ซึ่งสมมุติว่ามีความยาวไม่จำกัด และมีการถ่ายโอนความร้อนในแนวรัศมี (16) ดังรูปที่ 2.3 วิธีนี้ส่วนใหญ่จะใช้กับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง หรือ เม็ดเล็กๆ เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารผง (20) เป็นต้น คำนวณค่าสภาพนำความร้อนจากสมการ

$$k = q \ln (r_2 / r_1) / \{2\pi(T_1 - T_2)\} \qquad \ldots\ldots(3)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิของตัวอย่างที่รัศมี r_1 และ r_2



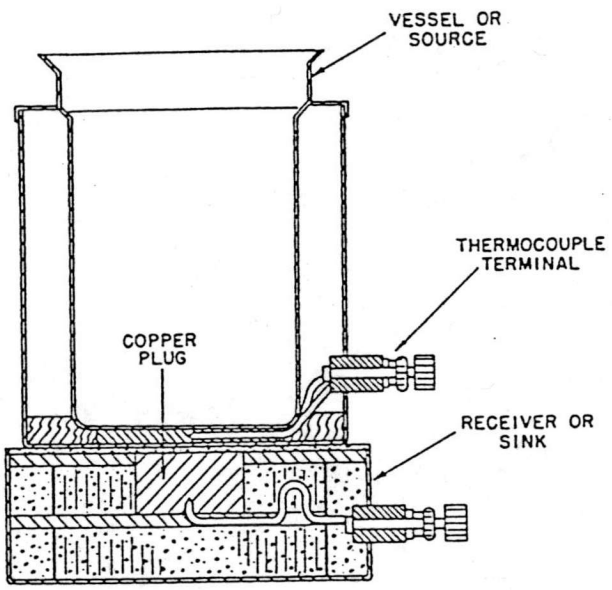
รูปที่ 2.3 เครื่อง concentric cylinder สำหรับหาค่าสภาพนำความร้อน (16)

การหาค่าสภาพนำความร้อนโดยวิธี steady - state เป็นวิธีที่มีการคำนวณง่าย เหมาะสำหรับอาหารที่มีความชื้นต่ำ และสามารถใช้ได้กับตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก แต่ข้อเสียที่สำคัญของวิธีนี้คือ ใช้เวลาในการทดลองแต่ละครั้งนานหลายชั่วโมง และไม่เหมาะสำหรับอาหารที่มีความชื้นสูง นอกจากนี้ยังอาจเกิดการสูญเสียความร้อนจากเครื่องมือได้ง่าย (16)

2.1.2.2 Transient Method

การหาค่าสภาพนำความร้อนโดย transient method ซึ่งเป็นลักษณะการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในระยะเริ่มต้น เมื่อระบบยังอยู่ในภาวะไม่สมดุล วิธีการทั่วไปคือ ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อยู่ในภาวะสมดุล และบันทึกอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างซึ่งเป็นผลมาจากการให้ความร้อน การหาค่าสภาพนำความร้อนโดย transient method นี้ ใช้เทคนิคที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า และเป็นวิธีที่ง่ายกว่า steady - state method นอกจากนี้ยังใช้ได้กับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความชื้นสูง (16)

Fitch Method เป็นวิธี transient ที่ใช้หาค่าสภาพนำความร้อนวิธีหนึ่ง เครื่องมือประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แหล่งให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิคงที่ และแหล่งรับความร้อนที่เป็น copper plug ดังรูปที่ 2.4 โดยตัวอย่างจะอยู่ระหว่างแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อน ซึ่งมี thermocouple สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (7) การหาค่าสภาพนำความร้อนโดยวิธีนี้ง่าย และใช้เวลาประมาณ 10 นาที แต่ความถูกต้องในการวัดยังไม่เป็นที่น่าพอใจ จึงไม่เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องสูง ข้อผิดพลาดของวิธีนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียความร้อนของแหล่งรับความร้อน (16,21)

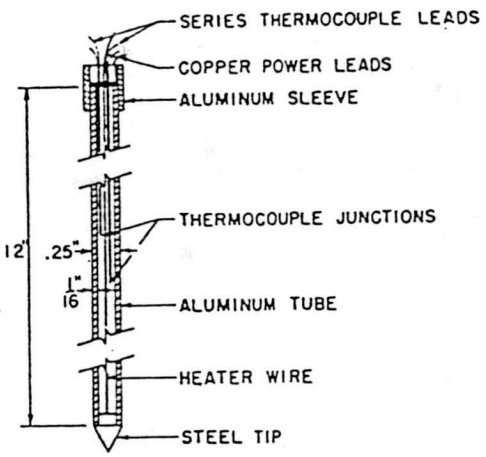


รูปที่ 2.4 เครื่องมือหาค่าสภาพนำความร้อนโดย Fitch (7)

Probe method (7) เป็นวิธี transient ที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน วิธีนี้เป็นวิธีที่พัฒนาดัดแปลงมาจาก line heat source method โดยใช้ thermal conductivity probe ที่มีลักษณะเป็นท่อกลวงหรือเข็ม ซึ่งภายในมี heater wire เป็นแหล่งให้ความร้อน และ thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.5 มีการให้ความร้อนแก่ probe และวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างกับเวลา (t) นำค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับค่า ln(t) มาสร้างกราฟ คำนวณหาค่าสภาพนำความร้อนจากสมการ

$$k = q'/ 4\pi S \qquad \ldots\ldots(4)$$

เนื่องจากการใช้ thermal conductivity probe ใช้เวลาในการทดลองสั้น เหมาะกับอาหารที่มีความชื้นสูง และอาหารแช่แข็ง และไม่มีปัญหาการสูญเสียความร้อนในระหว่างการวัด (16) จึงนิยมใช้ probe ในการหาค่าสภาพนำความร้อนในผัก และผลไม้ต่างๆ (5,6) ดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ ยังใช้หาค่าสภาพนำความร้อนในผลิตภัณฑ์นม และเนยเทียม (22) และในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ (2) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 Thermal conductivity probe สำหรับหาค่าสภาพนำความร้อน (7)

ตารางที่ 2.1 ค่าสภาพนำความร้อนของผักและผลไม้ต่างๆ (5)

Product	Water Content %, w.b.	Temperature C	Density g/cc	Thermal Conductivity Watts m − °C	Thermal Conductivity Btu ft − hr − °F	No. of tests	Standard Deviation % of mean
Apple, green	88.5	28	0.79	0.422	0.278	9	7
Apple, red	84.9	28	0.84	0.513	0.296	9	4
Apple-sauce	78.7	29		0.549	0.317	10	6
Avocado	64.7	28	1.06	0.429	0.248	10	4
Banana	75.7	27	0.98	0.481	0.278	24	8
Beet, red	89.5	28	1.53	0.601	0.347	9	2
Canta-loupe	92.8	28	0.93	0.571		10	6
Carrot	90.0	28	1.04	0.605	0.349	9	3
Cherry tomato (core	92.3	28	1.01	0.462	0.330	5	7
Cherry tomato (side)	92.3	28	1.01	0.527	0.305	5	3
Cucumber	95.4	28	0.95	0.598	0.346	10	5
Grape-fruit, peeled	90.4	26	0.95	0.549	0.317	10	2
Lemon, peeled	91.8	28	0.93	0.525	0.303	9	12
Lime, peeled	89.9	28	1.00	0.490	0.283	9	7
Nectarine	89.8	28	0.99	0.585	0.338	10	2
Onion	87.3	28	0.97	0.574	0.332	15	4
Orange, peeled	85.9	28	1.03	0.580		10	11
Peach	88.5	28	0.93	0.581	0.336	10	2
Pear	86.8	28	1.00	0.595	0.344	10	3
Pineapple	84.9	27	1.01	0.549	0.317	10	6
Plum, blue	88.6	26	1.13	0.551	0.318	10	3
Straw-berry	88.8	28	0.90	0.462	0.267	14	9
Turnip	89.8	24	1.00	0.563	0.325	10	6
Water	100	28		0.611	0.356		

2.1.3 การวัดค่าสภาพแพร่ความร้อน

การถ่ายโอนความร้อนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั่วไป เมื่อมีการให้หรือดึงความร้อนแก่วัตถุ ซึ่งการกระจายอุณหภูมิในวัตถุ ในภาวะ unsteady - state แสดงได้ดังสมการ partial differential ดังนี้

$$dT / dt = (d^2T_x/ dx^2 + d^2T_y/ dy^2 + d^2T_z/ dz^2) \quad ....(5)$$

การหาค่าสภาพแพร่ความร้อนสามารถคำนวณได้โดยตรงจากค่าสภาพนำ-ความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น ดังนี้

$$\alpha = k/\rho C_p \quad .....(6)$$

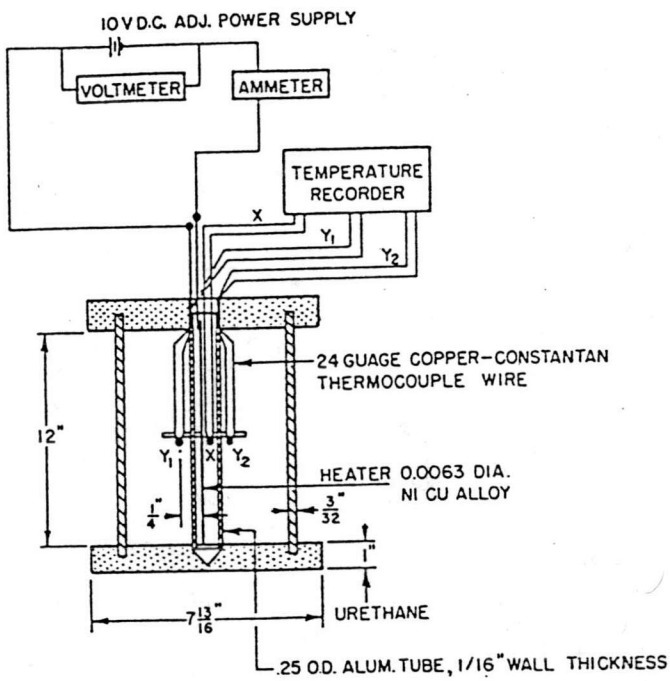
นอกจากการคำนวณจากสมการที่ 6 แล้ว ยังสามารถหาค่าสภาพแพร่ความร้อนได้โดยวิธีต่างๆ ดังนี้

2.1.3.1 การใช้ thermal conductivity probe (7,9) โดยใช้ thermocouple 2 อัน วางห่างจาก heater wire ใน probe เป็นระยะทาง "r" (รูปที่ 2.6) โดยอาศัยการแพร่ความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนใน probe ผ่านตัวอย่างไปยัง thermocouple ในช่วงเวลาหนึ่ง คำนวณหาค่าสภาพแพร่ความร้อน จากสมการ

$$\Delta T = q'/ 2\pi k \left[-C_E /2 -\ln\beta - \{ \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n \beta^{2n} / (n!)(2n)\} \right] \quad ....(7)$$

เมื่อ ΔT คือผลต่างของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของ thermocouple ทั้งสอง กับอุณหภูมิเริ่มต้น ที่เวลา t

โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 1-40 วิธีนี้เหมาะสำหรับสารชีวภาพ (biological material) เพราะใช้เวลาในการทดลองน้อย คือประมาณ 5 นาที (9,23)

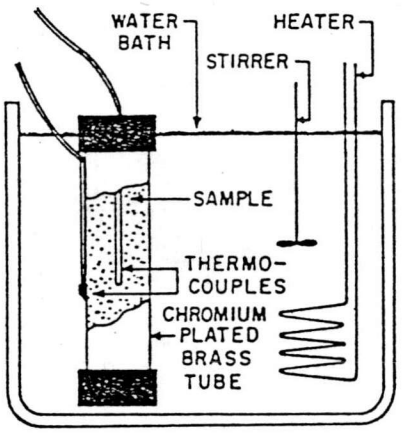


รูปที่ 2.6 Thermal conductivity probe สำหรับหาค่าสภาพแพร่ความร้อน (7)

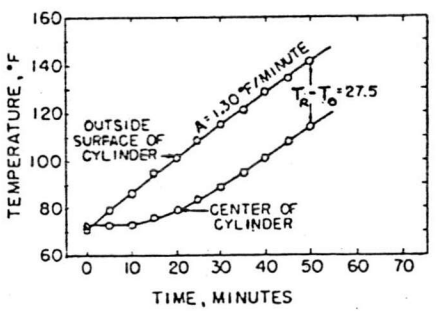
2.1.3.2 การใช้ thermal diffusivity tube (24) เครื่องมือประกอบด้วย thermal diffusivity tube ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกยาว ทำด้วยวัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูง ใช้บรรจุตัวอย่างอาหารที่ต้องการหาค่าสภาพแพร่ความร้อน มี thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างในท่อและที่ผนังด้านนอกของท่อ ใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิพร้อมเครื่องกวน เป็นอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในท่อ (รูปที่ 2.7) นำค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างในท่อ และที่ผนังด้านนอกของท่อกับเวลามาสร้างกราฟ (รูปที่ 2.8) และคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนจากสมการ

$$\alpha = AR^2 / 4(T_R - T_o) \qquad \text{.....(8)}$$

ตัวอย่างอาหารที่ใช้ thermal diffusivity tube หาค่าสภาพแพร่ความร้อน ได้แก่ ผลไม้ต่างๆ เช่น เชอรี มะเขือเทศ แอปเปิล (25) และผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม (3) เป็นต้น



รูปที่ 2.7 Thermal diffusivity tube สำหรับหาค่าสภาพแพร่ความร้อน (24)



รูปที่ 2.8 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการแพร่ความร้อน (24)

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อน

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อนของอาหาร คือ ปริมาณความชื้นในอาหาร นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิ และองค์ประกอบทางเคมี ที่มีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อนของอาหาร

2.2.1 ความชื้น

อาหารที่มีความชื้นต่างกันจะมีผลทำให้ค่าสมบัติทางความร้อนมีค่าต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเป็นตัวนำความร้อนที่ดี และมีค่าความร้อนจำเพาะสูงอีกด้วย คือ 1 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ดังนั้นโดยทั่วไปเมื่อมีปริมาณความชื้นในอาหารสูง จะส่งผลให้ค่าสมบัติทางความร้อนของอาหารนั้นๆ มีค่าสูงตามไปด้วย เช่น พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของยาสูบและถั่วลิสงเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่ม (4,14) ค่าสภาพนำความร้อนของนมพร่องมันเนยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่ม (26) และค่าสภาพแพร่ความร้อนของเนื้อเทียมแปรผันโดยตรงกับความชื้นในช่วงอุณหภูมิ 71.1-93.3 องศาเซลเซียส (3) เป็นต้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับสมบัติทางความร้อนของอาหาร มีลักษณะต่างๆกัน ตามชนิดของผลิตภัณฑ์ ดังตัวอย่างสมการในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (ตารางที่ 2.2)

2.2.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อนของอาหาร เมื่ออุณหภูมิในการผลิตเปลี่ยนไป จะมีผลทำให้ค่าสมบัติทางความร้อนของอาหารเปลี่ยนไปด้วย เช่น พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของยาสูบเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิในช่วง 40-45 องศาเซลเซียส (4) และค่าความร้อนจำเพาะของถั่วลิสงก็เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน (14) โดยทั่วไปพบว่าอาหารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จะมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (30) ทั้งนี้เนื่องจากน้ำแข็งมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าน้ำที่อุณหภูมิห้อง คือค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 2.32 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ขณะที่น้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.585 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน แต่อาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ปกติจะมีค่าความร้อนจำเพาะต่ำกว่าที่อุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็ง เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะของน้ำแข็งมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติทางความร้อนของอาหาร แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับสมบัติทางความร้อนของอาหารบางชนิด

ผลิตภัณฑ์	ความชื้น (ร้อยละ)	สมการ *	เอกสารอ้างอิง
อาหารความชื้นสูง	มากกว่า 80	$C_p = 0.20 + 0.008M$	27
ข้าวเจ้า	10-17	$C_p = 0.286 + 0.009M$	10
ข้าวโอ๊ต	10-17	$C_p = 0.305 + 0.0078M$	10
ข้าวเปลือก	10-17	$C_p = 0.265 + 0.0107M$	10
ผักและผลไม้	มากกว่า 80	$k = 0.148 + 0.00493M$	5
เนื้อสัตว์	60-80	$k = 0.0798 + 0.00517M$	28
ข้าวสาลี	5-20	$k = 0.1169 + 0.0011M$	11
ข้าวโพดเหลือง	5-30	$k = 0.1408 + 0.0011M$	11
ข้าวเปลือก	9.9-19.3	$k = 0.0865 + 0.0013M$	29
ข้าวปลือก	9.9-19.3	$\alpha = 0.0052 + 9.65 \times 10^{-5} M$	29

* C_p มีหน่วยเป็น แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส

k มีหน่วยเป็น วัตต์/เมตร องศาเคลวิน

α มีหน่วยเป็น ฟุต^2/ชั่วโมง

M คือร้อยละของความชื้น

016683

i 1031247X

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติทางความร้อนของอาหารบางชนิด

ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ *	เอกสารอ้างอิง
มะพร้าว	25-55	$C_p = 0.4682 + 0.0073T$	9
ถั่วลิสง	7-38	$C_p = 0.352 + 0.0108T$	31
มะพร้าว	25-55	$k = 0.1150 + 0.0008T$	9
ถั่วลิสง	7-38	$k = 0.0324 + 2.94 \times 10^{-4}T$	31
มันฝรั่ง	20-85	$k = 0.624 + 0.0019T$	32
เนื้อไก่	-20- 0	$k = 0.481 + 0.000865T$	1
มะพร้าว	7-38	$\alpha = 0.00573 - 4.04 \times 10^{-5}T$	9
ถั่วลิสง	5-20	$\alpha = 0.00325 - 1.125 \times 10^{-5}T$	31

* C_p มีหน่วยเป็น แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส

k มีหน่วยเป็น วัตต์/เมตร องศาเคลวิน

α มีหน่วยเป็น ฟุต^2/ชั่วโมง

T มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

2.2.3 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของอาหารที่มีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อน ได้แก่ เส้นใย ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น อาหารที่มีองค์ประกอบต่างกันจะมีค่าสมบัติทางความร้อนต่างๆกันไป นอกจากนี้ทิศทางของเส้นใยในอาหารยังมีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อนด้วย โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ โดยพบว่าค่าสภาพนำความร้อนเมื่อวัดตามทิศทางเดียวกับเส้นใย จะต่างกับค่าที่วัดตามขวางเส้นใย (2)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับองค์ประกอบทางเคมีของอาหาร (33) เช่น

$$C_p = 0.5\ X_F + 0.3\ X_S + 1.0\ X_M \qquad .....(9)$$

เมื่อ X_F , X_S และ X_M คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของไขมัน ของแข็ง และความชื้น ตามลำดับ

C_p มีหน่วยเป็น แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส

2.3 <u>สับปะรด</u> (34)

สับปะรดมีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ เนื่องจากสับปะรดเจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน จึงนิยมปลูกกันมากในประเทศไทย สับปะรดเป็นผลไม้ที่มีความชื้นสูง และมีองค์ประกอบทั่วไป ดังตารางที่ 2.4 สับปะรดที่ปลูกในประเทศไทยมีอยู่ 3 พันธุ์คือ พันธุ์พื้นเมือง พันธุ์ภูเก็ต และพันธุ์ปัตตาเวีย ซึ่งพันธุ์พื้นเมืองนี้มีผลเล็กกว่าพันธุ์ปัตตาเวียแต่ใหญ่กว่าพันธุ์ภูเก็ต โดยมีลักษณะตาลึก เส้นใยมาก ไม่นิยมนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์สับปะรดกระป๋อง เช่นเดียวกับสับปะรดภูเก็ต สำหรับสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียนั้นนิยมปลูกกันมากในประเทศไทย โดยเฉพาะที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และมีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด อาทิเช่น สับปะรดกระป๋อง สับปะรดแช่อิ่ม สับปะรดแช่แข็ง สับปะรดแห้ง และแยมสับปะรด เป็นต้น ปัจจุบันเนื้อที่ในการปลูกสับปะรดได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตสับปะรดกระป๋อง เพื่อเป็นสินค้าออกไปยังประเทศต่างๆทั่วโลก โดยผลไม้กระป๋องที่ผลิตขึ้นได้ในประเทศไทยนั้น เป็นสับปะรดกระป๋องถึงร้อยละ 90 จึงถือได้ว่า สับปะรดเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทั่วไปของสับปะรด (35)

องค์ประกอบ	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
น้ำ (%)	85.3	90.1	81.1
โปรตีน (%)	0.4	0.6	0.2
ไขมัน (%)	0.2	0.3	0.2
เถ้า (%)	0.42	0.7	0.3
น้ำตาล (%)	11.9	15.3	8.2
กรด (ซิตริก)(%)	0.72	1.10	0.39
เส้นใย (%)	0.47	-	-
วิตามิน A (I.U./100 g)	20-200	-	-
วิตามิน B_1 (mg/100g)	0.08	-	-
วิตามิน B_2 (mg/100g)	0.03	-	-
ไนอาซีน (mg/100g)	0.1	-	-
วิตามิน C (mg/100g)	30	-	-
แคลเซียม (mg/100g)	20	-	-
เหล็ก (mg/100g)	0.5	-	-

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรด พบว่า ความร้อนจำเพาะของสับปะรดที่ความชื้นร้อยละ 85.3 ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าและต่ำกว่าจุดเยือกแข็งมีค่าเท่ากับ 0.88 และ 0.45 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ตามลำดับ (30) และจากรายงานวิจัยของ Sweat (5) ที่ได้หาค่าสภาพนำความร้อนของผักและผลไม้ต่างๆ โดยการใช้ thermal conductivity probe พบว่า สับปะรดที่ความชื้นร้อยละ 84.9 ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส มีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.549 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน แต่จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่มีการหาค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรด และยังไม่มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางความร้อนกับสมบัติทางกายภาพของสับปะรด ทั้งในช่วงอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางความร้อนต่างๆ กับความชื้นและอุณหภูมิของสับปะรด ทั้งในช่วงอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง