

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การวัดสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล

2.1.1 ค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity), k

ค่าสภาพนำความร้อน เป็นสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน เป็นการถ่ายโอนพลังงานระดับโมเลกุลซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ทางกายภาพของวัตถุ (physical movement) การถ่ายโอนพลังงานแบบนี้เกิดได้ในระบบที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ (temperature gradient) ซึ่งพลังงานจะเคลื่อนย้ายจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเช่นในของแข็ง ดังนั้นวัตถุจำพวกโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เช่น ทองแดงและอะลูมิเนียม จึงมีค่าสภาพนำความร้อนสูงในทำนองเดียวกันวัตถุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี เช่น แก้วและพลาสติก ก็จะมีค่าสภาพนำความร้อนที่ต่ำ (Bennett and Myers, 1974; Bayazitoglu and Ozisik, 1988)

ที่ภาวะสมดุลค่าสภาพนำความร้อนสามารถคำนวณได้โดยใช้กฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ซึ่งอุณหภูมิของตัวอย่างในแต่ละจุดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และอัตราเร็วในการถ่ายโอนความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งสมการ

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(1)$$

สมการที่ 1 นี้เรียกว่า Fourier equation ซึ่งเครื่องหมายลบที่อยู่ด้านขวามือของสมการเป็นผลสืบเนื่องมาจาก กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดไว้ว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า

ค่าสภาพนำความร้อนสามารถคำนวณจากค่าสภาพนำความร้อนขององค์ประกอบทางเคมี (k_j) และสัดส่วนโดยปริมาตร (X_{vj}) ของแต่ละองค์ประกอบ และมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$k = \sum(k_i x_{vi}) \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ

$$x_{vi} = \frac{x_i \rho}{\rho_i}$$

$$\rho = \frac{1}{(\sum x_i / \rho_i)}$$

โดยค่าสภาพนำความร้อน (k_i) และความหนาแน่น (ρ_i) ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหารสามารถคำนวณความสัมพันธ์ ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ (Toledo, 1991) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนและความหนาแน่นขององค์ประกอบต่างๆ ในอาหารกับอุณหภูมิ

องค์ประกอบ	สมการ	
	k_i	ρ_i
ความชื้น	$k=0.57109+0.0017625T - 6.7306 \times 10^{-6}T^2$	$\rho=997.18+0.0031439T - 0.0037574T^2$
โปรตีน	$k=0.1788+0.0011958T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$	$\rho=1329.9 - 0.51814T$
ไขมัน	$k=0.18707 - 0.0027604T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$	$\rho=925.59 - 0.41757T$
เส้นใย	$k=0.18331+0.0012497T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$	$\rho=1311.5 - 0.36589T$
เถ้า	$k=0.2014+0.0013874T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$	$\rho=2423.8 - 0.28063T$
คาร์โบไฮเดรต	$k=0.2014+0.0013874T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$	$\rho=1599.1 - 0.31046T$

* k มีหน่วยเป็น วัตต์/เมตร องศาเซลเซียส

ρ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/เมตร³

T มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

ในการวัดค่าสภาพนำความร้อนแบ่งได้ 3 แบบคือ

2.1.1.1 Steady state method วิธีนี้ตัวอย่างที่ต้องการวัดจะอยู่ในภาวะสมดุล คืออุณหภูมิ ณ จุดใดๆ คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงไปพร้อมกับเวลา การหาค่าสภาพนำความร้อน สามารถทำได้โดยวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่าง และความแตกต่างของอุณหภูมิ อาจแบ่งได้เป็น 3 หลักการดังนี้

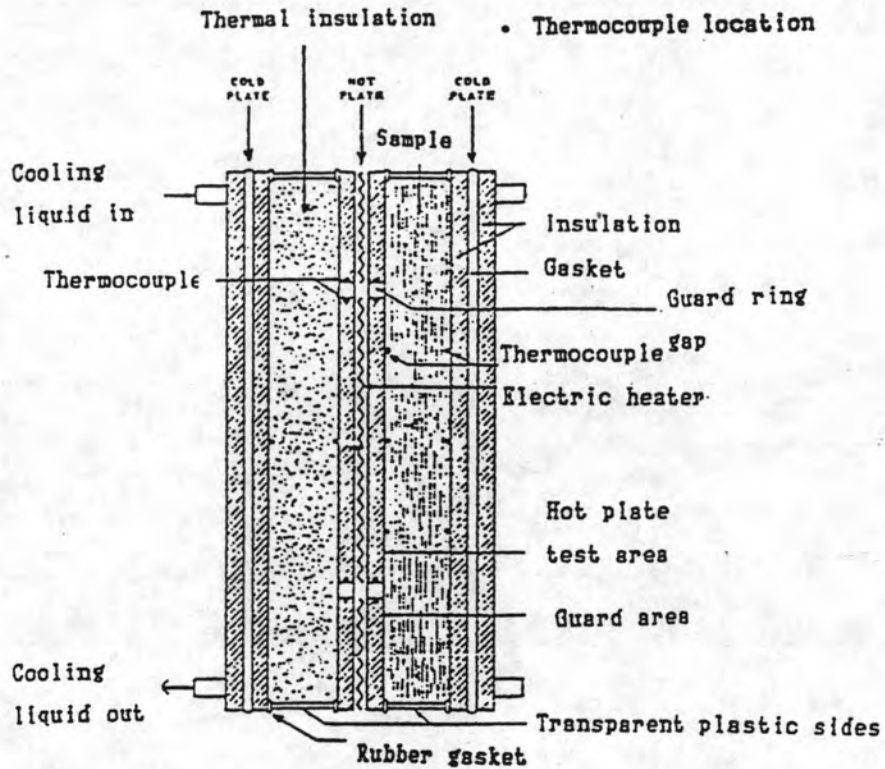
2.1.1.1.1 Modified parallel plate method หรือ Modified guard hot plate method

วิธีนี้ให้ผลค่อนข้างถูกต้องเหมาะสมสำหรับตัวอย่างอาหารแห้ง และอาหารที่เป็นแผ่น โดยการใส่ตัวอย่างในช่องว่างช่องหนึ่งภายในเครื่องมือ (Lentz, 1961) ให้ด้านหนึ่งสัมผัสกับด้านที่ให้ความร้อน (heat source) และอีกด้านสัมผัสกับแหล่งรับความร้อน (heat sink) และมี guard plate สำหรับป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (รูปที่ 2.1) ส่วนอีกช่องหนึ่งจะใส่วัตถุอ้างอิง ซึ่งนิยมใช้ฉนวนที่ทราบค่าสภาพนำความร้อนวิธีนี้ปรับปรุงมาจากวิธีของ guard hot plate ซึ่งมีช่องใส่ตัวอย่างเพียงช่องเดียว และวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างโดยตรงเพื่อคำนวณค่าสภาพนำความร้อนของตัวอย่าง โดยใช้สมมุติฐานว่าปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างจะเท่ากับปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ไหลผ่านตัวอย่างและไม่มีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้น แต่ในทางปฏิบัติแหล่งให้ความร้อนหลัก จะถ่ายโอนความร้อนสู่ hot plate ซึ่งเป็นส่วนให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง แต่จะไม่ถ่ายโอนความร้อนให้แก่ guard ring gap ทำให้เกิดความไม่สมดุลทางความร้อนระหว่าง hot plate และ guard ring gap จึงมีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้น ทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้ การใช้วัตถุอ้างอิงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างโดยตรง ค่าสภาพนำความร้อนคำนวณได้จาก

$$Q = \frac{k_r A (T_1 - T_2)}{D_r} = \frac{k_s A (T'_1 - T'_2)}{D_s} \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิทั้งสองด้านของตัวอย่าง

T'_1 และ T'_2 คืออุณหภูมิทั้งสองด้านของวัตถุอ้างอิง



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของ Parallel plate apparatus

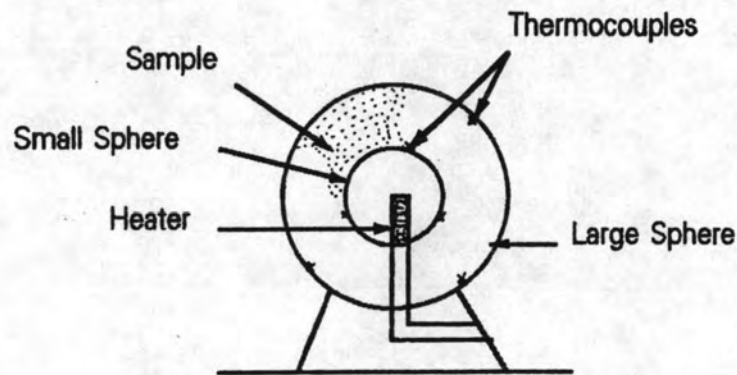
วิธีนี้ใช้เวลาในการทดลองนาน แต่สามารถใช้ได้กับตัวอย่างที่มีการนำความร้อนแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง (non isotropic materials) ได้ ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าสภาพนำความร้อนได้แก่ ปลา cod และ salmon (Lentz, 1961)

2.1.1.1.2 Concentric sphere method

วิธีนี้หาค่าสภาพนำความร้อนโดยบรรจุตัวอย่างลงในช่องว่างของเครื่องมือรูปร่างทรงกลมที่มีรัศมีภายใน r_1 และมีรัศมีภายนอก r_2 (El-Sahrigi et al., 1981) ซึ่งมี heater ติดตั้งอยู่ภายในทรงกลมด้านใน (รูปที่ 2.2) นำเครื่องมือใส่ในกล่องหุ้มฉนวน ที่มีพัดลมสำหรับหมุนเวียนอากาศบริเวณรอบเครื่องมือ และให้ความร้อนจนเข้าสู่ภาวะสมดุลทางความร้อน ค่าสภาพนำความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$k = \frac{Q(r_2 - r_1)}{4\pi(r_2 r_1)(T_1 - T_2)} \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ Q คือปริมาณความร้อนที่ให้
 T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิของตัวอย่างที่มีรัศมีภายใน (r_1) และรัศมีภายนอก (r_2)



รูปที่ 2.2 Concentric sphere apparatus

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้หาค่าสภาพนำความร้อนได้ถูกต้องมากที่สุด เนื่องจากสามารถกำจัดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนได้ แต่ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากหาตัวอย่างที่มีรูปร่างทรงกลมโดยแท้จริงได้ยาก

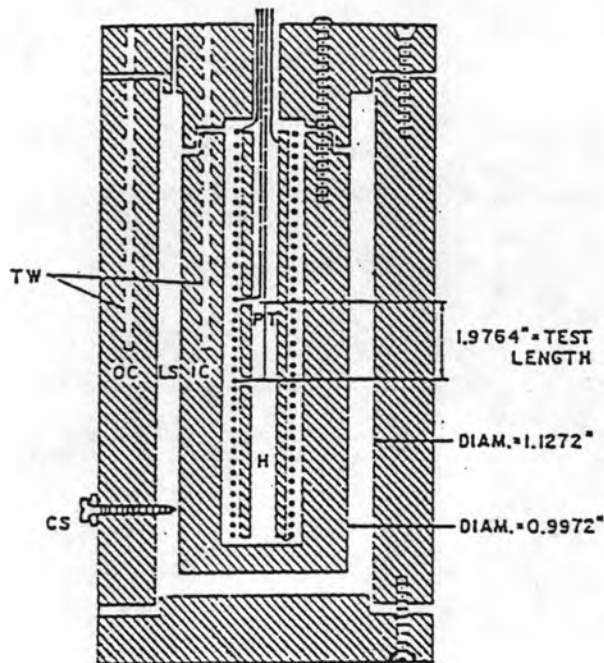
2.1.1.1.3 Concentric cylinder method

วิธีนี้ส่วนมากแล้วจะใช้กับตัวอย่างอาหารที่เป็นผงหรือเป็นเม็ดเล็กๆ โดยบรรจุตัวอย่างในช่องว่างรูปวงแหวนของเครื่องมือรูปทรงกระบอกที่มีรัศมีภายใน (r_1) และรัศมีภายนอก (r_2) มีการให้ความร้อนโดยใช้ heater ที่อยู่ด้านในของทรงกระบอก (รูปที่ 2.3) และมีอ่างน้ำมันเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ค่าสภาพนำความร้อนจะคำนวณจากสมการที่ 5

$$k = \frac{Q \ln(r_2 / r_1)}{2\pi d(T_1 - T_2)} \dots\dots\dots(5)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิที่ภาวะสมดุลของตัวอย่างที่รัศมี r_1 และรัศมี r_2 ตามลำดับ

r_1 และ r_2 คือรัศมีภายในและรัศมีภายนอกของทรงกระบอกตามลำดับ
 1 คือ ความยาวของทรงกระบอก



- LS = Liquid space หรือ ช่องใส่ตัวอย่าง
 CS = Centering screw
 H = Heater
 IC = Inner cylinder-brass
 OC = Outer cylinder
 TW = Thermister well
 PT = Potential taps

รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของ concentric cylinder apparatus

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าสภาพนำความร้อนได้แก่ ปลา cod, herring, whale meat (Baghe-Khandan, Choi, and Okos, 1981)

การหาค่าสภาพนำความร้อนแบบ steady state เป็นวิธีที่มีการคำนวณง่าย เหมาะสำหรับอาหารที่มีความชื้นต่ำ และสามารถใช้วัดค่าสภาพนำความร้อนของอาหารที่เป็นของเหลว ผง หรือเมล็ดได้ แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือ ใช้เวลาในการทดลองนานหลายชั่วโมงและไม่เหมาะสำหรับอาหารที่มีความชื้นสูงเพราะอาจเกิดการสูญเสียความชื้นในระหว่างการทดลอง (Reidy and Rippen, 1971)

2.1.1.2 Semi - steady state method

ใช้หลักการของ quasi - steady state heat transfer ซึ่งเหมาะกับตัวอย่างอาหารที่มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำ โดยวัดปริมาณความร้อนที่ตัวอย่างได้รับด้วยการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวกลางที่รับความร้อนจากการสัมผัสกับตัวอย่าง โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาของตัวกลางมีน้อย ทำให้ตัวอย่างอยู่ในภาวะกึ่งสมดุล

ในการหาค่าสภาพนำความร้อนจะใส่ตัวอย่างให้อยู่ในระหว่าง chamber A และ chamber B ซึ่งจะติดอยู่กับส่วนที่เป็นของเหลวโดยตรงทั้งสองด้าน (รูปที่ 2.4) ใน chamber A จะมีของเหลวอุณหภูมิสูง เพื่อถ่ายโอนความร้อนไปสู่ตัวอย่าง ส่วน chamber B จะมีของเหลวอุณหภูมิต่ำ เพื่อรับความร้อนจากตัวอย่าง ภายในเครื่องมือจะมี stirrer เพื่อช่วยให้อุณหภูมิภายใน chamber สม่าเสมอ และเครื่องมือจะมีฉนวนหุ้มเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อม ค่าสภาพนำความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 6

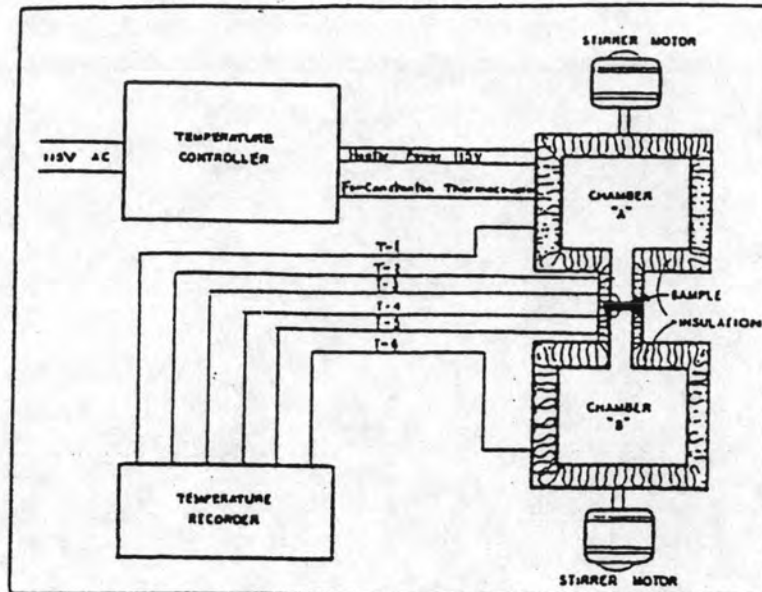
$$k = \frac{W_s C_{ps} (T_{sf} - T_{so}) D_s}{A (T_3 - T_4) \Delta t} \dots\dots\dots(6)$$

เนื่องจากในขณะที่ทำการทดลองจะมีการสูญเสียความร้อนให้กับ stirrer และผนังของ chamber และการทำงานของ stirrer ทำให้เกิดความร้อนขึ้นดังนั้นจึงต้องแปลงสมการเป็น

$$k = \frac{(W_s C_{ps} + W_b C_{pB} + W_t C_{pt}) (T_{sf} - T_{so} - T_t) D_s}{A (T_3 - T_4) \Delta t} \dots\dots\dots(7)$$

ข้อจำกัดของวิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูงมาก และเกิดการสูญเสียความร้อนจากเครื่องมือ ซึ่งขัดแย้งกับสมมุติฐานในการคำนวณทำให้ค่าที่คำนวณได้ผิดพลาด ตัวอย่างอาหารที่วัดค่าสภาพนำความร้อนโดยวิธีนี้คือ ปลาหมึก

(Matuszek, Niesteruk, and Ojahuga, 1983)



รูปที่ 2.4 การติดตั้งเครื่องมือในการวัดค่าสภาพนำความร้อนแบบ semi - steady state

2.1.1.3 Unsteady - state method หรือ Transient method

เป็นวิธีการหาค่าสภาพนำความร้อนในขณะที่ตัวอย่างอยู่ในภาวะที่ไม่สมดุล การหาค่าสภาพนำความร้อนโดยวิธีนี้ใช้เวลาในการทดลองสั้นมาก และมีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธี steady - state method นอกจากนี้ใช้ได้กับตัวอย่างที่มีความชื้นสูง (Reidy and Rippen, 1971)

วิธีการหาค่าสภาพนำความร้อนของอาหารทะเลที่ใช้หลักการนี้มีเพียงวิธีเดียวคือ probe method ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจาก line heat source method เครื่องมือที่ใช้คือ thermal conductivity probe ที่มีลักษณะเป็นท่อกลวงขนาดเล็ก ภายในมี heater wire เป็นแหล่งให้ความร้อน และ thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิ (รูปที่ 2.5) ในการวัดค่าสภาพนำความร้อนทำโดยการเสียบ thermal conductivity probe เข้าไปในตัวอย่างอาหารที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นคงที่ จากนั้นให้ความร้อนแก่ heater wire อย่างสม่ำเสมอ วัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างอาหารกับเวลา การหาค่าสภาพนำความร้อนโดยใช้ thermal conductivity

probe หลักการคือ แหล่งให้ความร้อนมีรูปร่างทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อเทียบกับขนาดความยาว มีการให้ความร้อนในปริมาณคงที่ในแนวรัศมีแก่ตัวอย่างอาหารขนาดใหญ่ที่มีความสม่ำเสมอทั่วกันตลอดทั้งชิ้นโดยไม่มีแหล่งให้ความร้อนอยู่ภายในสมการแสดงความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนคือ

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \dots\dots\dots(8)$$

จากสมการที่ 8 เมื่อมีแหล่งให้ความร้อนที่มีความยาวไม่จำกัดและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างอาหารคือ

$$T = \frac{q'}{2\pi k \beta} \int_0^\alpha \frac{\exp(-r^2)}{r} dx \dots\dots\dots(9)$$

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}$$

เมื่อ $q' = 3.414 I^2 R$

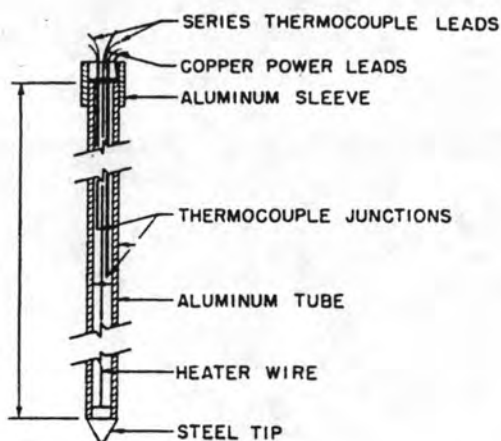
ถ้า T เป็นอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนที่มีปริมาณความร้อน q' และ β มีค่าน้อยกว่า 0.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากเวลา t₁ ไปยัง t₂ เป็น

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{q'}{4\pi k} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \dots\dots\dots(10)$$

ดังนั้น

$$k = \frac{q'}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \dots\dots\dots(11)$$

เมื่อ T₁ และ T₂ คืออุณหภูมิที่เวลา t₁ และ t₂ ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของ thermal conductivity probe (Mohsenin, 1980)

ข้อเสียของ thermal conductivity probe คือไม่เหมาะสำหรับ ตัวอย่างที่เป็นอาหารเหลวที่มีค่าความหนืดต่ำ เนื่องจากจะเกิดการถ่ายโอนความร้อนโดยการพา ซึ่งรอบๆ probe นอกจากนี้ยังไม่สามารถใช้ได้กับตัวอย่างที่มีความบางมาก เช่น ผนังสัตว์ ทั้งนี้เนื่องจากต้องมีตัวอย่างอยู่รอบๆ probe ในปริมาณที่มากพอ อย่างไรก็ตาม การใช้ probe ยังได้รับความนิยมเนื่องจากใช้เวลาในการทดลองน้อย ใช้ได้ดีกับอาหารที่มีความชื้นสูงหรืออาหาร แห้งแข็งและไม่มีการสูญเสียความร้อนในขณะที่ทำการทดลอง นอกจากนี้ยังเหมาะกับตัวอย่างอาหาร ที่อยู่ในสภาพธรรมชาติอีกด้วย กล่าวคือสามารถหาค่าสภาพนำความร้อนของผลไม้บนต้นได้ อีกทั้งยังใช้ได้ดีกับตัวอย่างที่อยู่ในระหว่างการแปรรูป (Reidy and Rippen, 1971)

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้ thermal conductivity probe ในการวัดค่า สภาพนำความร้อนได้แก่ surimi (Wang and Kolbe, 1990) ปลาหมึกกล้วย (Rahman and Potluri, 1991) ปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดอง (พิชญ์อร วนาอินทราษุร, 2536)

2.1.2 ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat), C_p

ความร้อนจำเพาะ เป็นปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ สารมวล 1 หน่วยไป 1 องศา ค่าความร้อนจำเพาะของอาหารแต่ละชนิดแสดงถึงปริมาณความร้อน ที่สะสมอยู่ภายในอาหารชนิดนั้น ๆ (Mohsenin, 1980) และค่าความร้อนจำเพาะยังถือว่าเป็น สมบัติเฉพาะอาหารแต่ละชนิดด้วย (Chen, 1985) ค่าความร้อนจำเพาะมักจะขึ้นอยู่กับส่วน

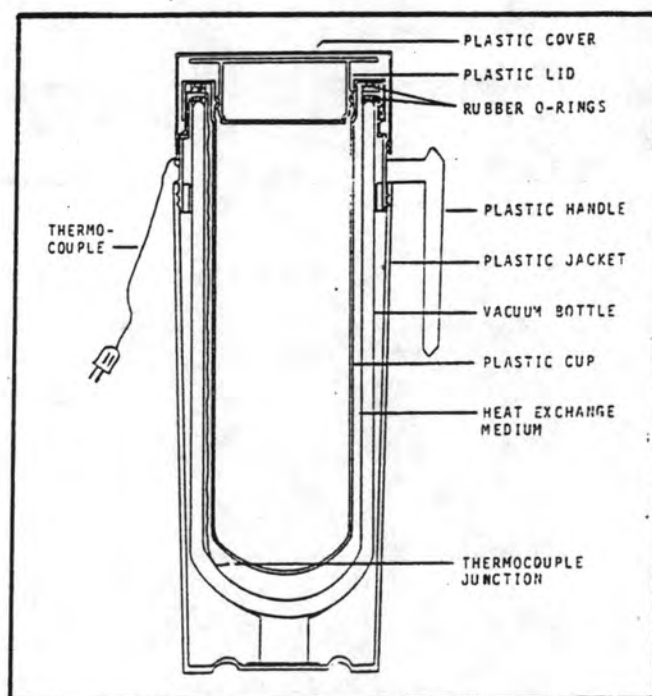
ประกอบของอาหารเป็นสิ่งสำคัญ โดยสามารถคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะได้จากค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหารกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักขององค์ประกอบนั้น (Toledo, 1991)

$$C_p = \sum (C_{pi} X_i) \quad \dots\dots\dots(12)$$

เมื่อ C_{pi} (12) เป็นความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบในอาหารและ X_i เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักขององค์ประกอบ นอกจากนี้ค่าความร้อนจำเพาะยังสามารถหาได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีที่ได้ค่าความร้อนจำเพาะที่ถูกต้อง วิธีการวัดมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีดังนี้

2.1.2.1 Specific heat calorimeter

มีลักษณะเป็น vacuum-jacket ประกอบด้วยช่องสำหรับใส่ตัวอย่าง มีฝาปิดมิดชิด มี thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนในแคลอริมิเตอร์ (Hwang and Hayakawa, 1979) เครื่องมือทั้งหมดต้องสามารถป้องกันการสูญเสียความร้อน เป็นฉนวนที่ดีพอ (รูปที่ 2.6) เพื่อให้เป็นสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียหรือได้รับความร้อน (adiabatic) ตามทฤษฎี



รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางของ Specific heat calorimeter

ข้อดีของการใช้แคลอริมิเตอร์ในการหาค่าความร้อนจำเพาะ คือ สามารถใช้ผู้ที่มีความชำนาญน้อยทำการทดลอง เครื่องมือและขั้นตอนการทดลองไม่ยุ่งยาก และเนื่องจากแคลอริมิเตอร์มีน้ำหนักเบาปริมาณน้อย จึงนำไปใช้ได้ในห้องปฏิบัติการ การคำนวณค่าความร้อนจำเพาะใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน ดังสมการ

$$(C_{pw}W_w + H_c)T_c + C_{ps}W_sT_s = C_{ps}W_sT_f + C_{pw}W_wT_f + H_cT_f - E \quad \dots(13)$$

$$\text{เมื่อ } E = (C_{pw}W_w + H_c + C_{ps}W_s) (dT/dt) t_f$$

การใช้แคลอริมิเตอร์ในการหาค่าความร้อนจำเพาะอาจแบ่งเป็น 2 วิธี คือ

2.1.2.1.1 Method of mixture

ทำโดยการผสมตัวอย่างและสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะ (ปกติใช้น้ำซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะ 1 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส) ในแคลอริมิเตอร์แล้ววัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปต่อเวลา นำไปคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน วิธีนี้ไม่เหมาะกับอาหารที่สามารถละลายได้ในสารตัวกลาง เพราะจะมีค่าความร้อนของการละลายเข้ามาเกี่ยวข้อง และตัวอย่างยังถูกทำลายด้วย (Murakami, 1980)

2.1.2.1.2 Modified method of mixture หรือ Indirect mixing method

วิธีนี้ตัวอย่างและสารตัวกลางจะไม่สัมผัสกัน โดยใส่ตัวอย่างภายในภาชนะบรรจุแยกสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน วัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ โดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน วิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องการละลายของตัวอย่างในสารตัวกลาง จึงไม่มีปัญหาเกี่ยวกับค่าความร้อนของการละลาย (Kulack and Kennedy, 1978; Hwang and Hayakawa, 1979)

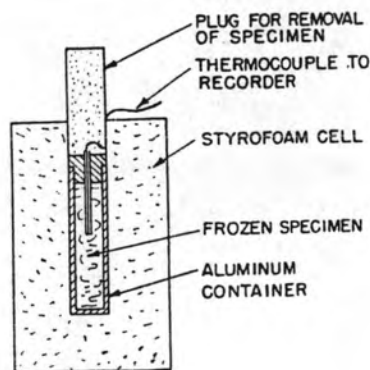
2.1.2.2 Moline's method

Moline และคณะ (1961) ได้หาค่าความร้อนจำเพาะของอาหารแข็ง โดยใช้เครื่องมือที่ประกอบขึ้นด้วยกล่องโฟม (polystyrene) ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อน

ภายในกล่องตรงกลางจะเจาะเป็นช่องมีภาชนะอะลูมิเนียม (aluminium container) สำหรับใส่ ตัวอย่างอาหารแช่แข็งที่ต้องการทราบค่าความร้อนจำเพาะ (รูปที่ 2.7) ในการทดลองภาชนะ พร้อมตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักจะถูกนำไปแช่แข็งจนได้อุณหภูมิที่ต้องการด้วยไนโตรเจนเหลว จากนั้นนำไปใส่ในกล่องโฟมที่อุณหภูมิห้อง วัดอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางด้วย thermocouple เพื่อนำ มาหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ค่าความร้อนจำเพาะสามารถคำนวณโดยใช้สมการ (13)

$$C_{ps} = [Q/(\Delta T/\Delta t) - C_{pa}W_a]/W_s \quad \dots\dots\dots(13)$$

ส่วนปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม (Q) สามารถหาได้โดย นำวัตถุมাত্রฐานที่ทราบน้ำหนักและค่าความร้อนจำเพาะ แทนตัวอย่างอาหารทำการทดลองเช่นเดียวกับในตอนแรก ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะด้วยวิธีนี้ คือ ปลา cod และกุ้ง (Moline et al, 1961)

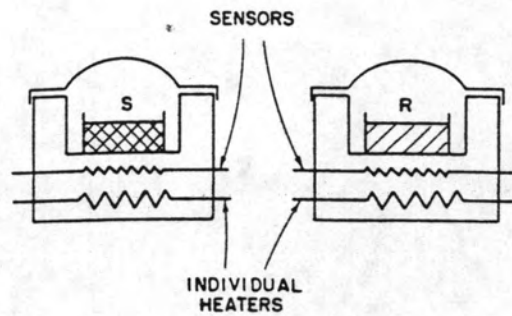


รูปที่ 2.7 เครื่องมือที่ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะโดยวิธีของ Moline และคณะ

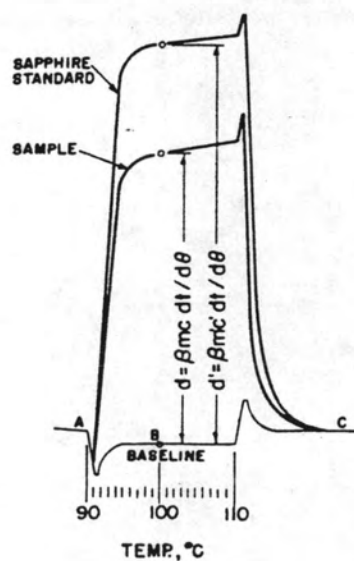
2.1.2.3 การใช้ Differential scanning calorimeter: DSC

วิธีนี้ใช้หลักการเปรียบเทียบผลของพลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการแปร รูปด้วยความร้อน (รูปที่ 2.8) โดยบันทึกพลังงานที่ได้รับหรือสูญเสียในขณะที่ให้ความร้อนแก่ ตัวอย่างในรูปของ thermogram (รูปที่ 2.9) พื้นที่ใต้ thermogram จะแสดงสัดส่วนพลังงาน

ความร้อนที่ได้รับหรือคายของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการภายในเครื่องประกอบด้วย sample holder (S), reference holder (R), เครื่องบันทึกอุณหภูมิ และ temperature programmer ซึ่งเป็นส่วนควบคุมระบบการให้ความร้อนและความเย็น การทำงานและการคำนวณผลส่วนใหญ่จะควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.8 รูปแบบของ Differential Scanning Calorimeter



รูปที่ 2.9 DSC Thermogram สำหรับการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ

ในการวัดค่าความร้อนจำเพาะโดยวิธีนี้จะมี volatile-sample pan ใส่ตัวอย่างอาหารเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นในขณะทำการทดลอง ส่วนมากมักจะทำด้วย อะลูมิเนียม สมการที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$C_{ps} = \frac{dm'}{d'm} C_{p'} + \frac{C_{pa}}{m} \frac{d(M_{st}-M_b)+(M_b-M_s)}{d'} \quad \dots\dots(15)$$

ข้อดีของวิธี DSC คือ ผลการทดลองที่ถูกต้องและรวดเร็ว ใช้ปริมาณ ตัวอย่างน้อยเป็นเพียงจำนวนมิลลิกรัมเท่านั้น อย่างไรก็ตามเครื่องมือ DSC เป็นอุปกรณ์ที่ซับซ้อน และมีราคาค่อนข้างแพง ผู้ทำการทดลองจึงต้องมีความรู้และความชำนาญสูงในการใช้เครื่องมือ ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธี DSC ในการวัดค่าความร้อนจำเพาะ ได้แก่ ซูริมิ (Wang and Kolbe, 1991)

2.1.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity), α

ค่าสภาพแพร่ความร้อน เป็นสมบัติทางความร้อนซึ่ง แสดงอัตราการแพร่ผ่านของ ปริมาณความร้อนในเนื้อวัตถุ เป็นผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งพบในสภาวะ unsteady state หรือ transient โดยวัตถุที่มีค่าสภาพแพร่ความร้อนสูง แสดงว่ามีอัตราการแพร่ผ่านของ ความร้อนในตัวมันเองได้เร็ว ในทางกลับกันถ้าวัตถุนั้นมีค่าสภาพแพร่ความร้อนต่ำ การแพร่ผ่าน ความร้อนก็จะต่ำหรือช้าไปด้วย การกระจายของอุณหภูมิในวัตถุในสภาวะ unsteady state แสดงได้ด้วยสมการ partial differential ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots(16)$$

เมื่อ T เป็นอุณหภูมิตำแหน่งที่ต่าง ๆ ในแกน x y และ z

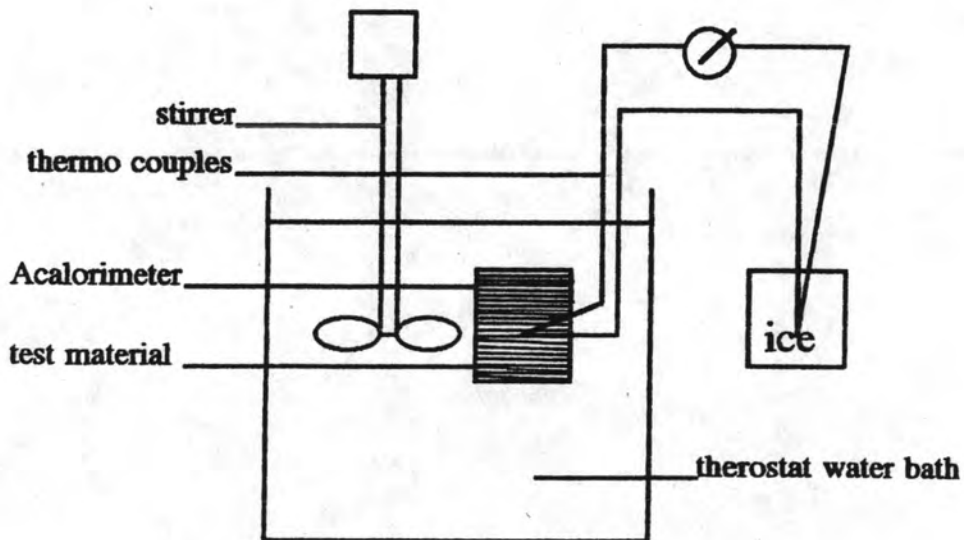
นอกจากนี้ค่าสภาพแพร่ความร้อนยังมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) ค่าสภาพนำความร้อน (k) และความหนาแน่น (ρ) ดังสมการ (17) จึงสามารถประมาณ ค่าสภาพแพร่ความร้อนเมื่อทราบค่า k C_p และ ρ

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \dots\dots\dots(17)$$

ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ถูกต้องของอาหารควรจะหาจากการทดลองโดยตรง (Nesvadba, 1982) ในปัจจุบันมีวิธีที่ใช้วัดค่าดังกล่าวหลายวิธีดังนี้

2.1.3.1 Acalorimeter method

เครื่องมือประกอบด้วยกระป๋องทรงกระบอกซึ่งใช้บรรจุตัวอย่างที่ต้องการหาค่าสภาพแพร่ความร้อน ภายในกระป๋องมี thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิตรงไว้ที่จุดกึ่งกลาง ตัวอย่างที่ใช้จะทำให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะบรรจุลงในกระป๋อง แล้วนำไปทำให้อุณหภูมิคงที่ที่ระดับหนึ่ง จากนั้นนำไปทำให้ร้อนโดยใช้อ่างน้ำพร้อมเครื่องกวน (รูปที่ 2.10) บันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างที่เปลี่ยนไปพร้อมกับเวลา สร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา นำค่า slope (f) ที่ได้จากกราฟ ไปคำนวณหาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยใช้สมการ (18) ตัวอย่างที่ใช้วิธีนี้หาค่าสภาพแพร่ความร้อน ได้แก่ ปลา mackerel และปลา sardine (Annamma and Rao,1974)



รูปที่ 2.10 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของตัวอย่างโดยวิธี Acalorimeter

$$\alpha = \frac{2.3026}{f [(2.4048/r)^2 + (\pi / 2L)^2]} \dots\dots\dots(18)$$

2.1.3.2 Line heat source method

วิธีนี้เคยใช้ในการวัดสมบัติทางความร้อนของอาหารที่เป็นของเหลวมาก่อน ต่อมา Kumbhar, Agrawal และ Das (1981) ได้นำมาใช้วัดค่าสภาพแพร่ความร้อนและค่าสภาพนำความร้อนของปลาชนิดต่าง ๆ เครื่องมือที่ใช้วัดประกอบด้วย 36 gauge fine heater wire และ 30 gauge copper-constantan thermocouple จำนวน 4 เส้น ทั้งหมดนี้ถูกตรึงไว้ในกล่องอะลูมิเนียมซึ่งใช้บรรจุตัวอย่างที่ต้องการวัดค่าสภาพแพร่ความร้อน (รูปที่ 2.11) จากนั้นนำไปจุ่มในอ่างที่มีของเหลว ซึ่งเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้จะถูกควบคุมโดย rheostat

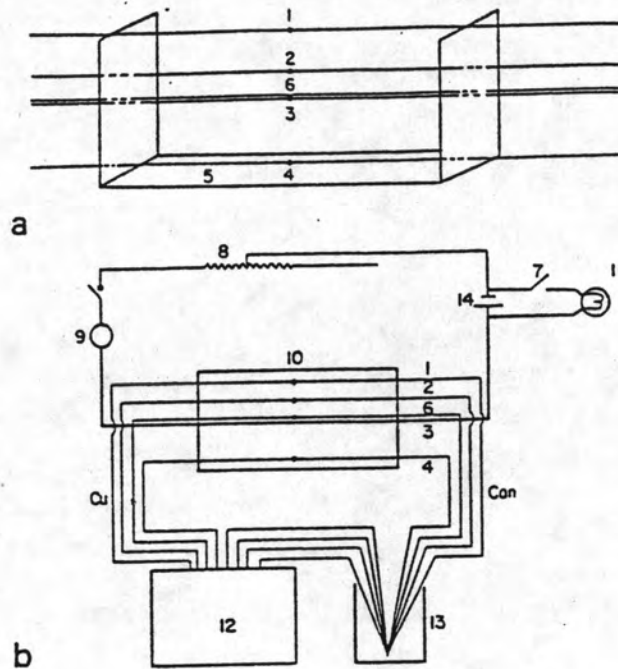
อุณหภูมิที่วัดจาก thermocouple เส้นที่ 2 จะนำไปใช้ในการคำนวณตามสมการที่ 19 และ 20 ส่วนอุณหภูมิที่วัดจาก thermocouple เส้นที่ 1 และเส้นที่ 4 เป็นการตรวจสอบเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจาก heating wire รั่วออกไปที่ผิวของตัวอย่าง ซึ่งจะมีผลทำให้การคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนไม่ถูกต้อง

$$\beta = \frac{x}{2(\alpha t)^{1/2}} \dots\dots\dots (19)$$

ค่า x และ t สามารถหาได้จากการทดลอง ส่วนค่า β ได้จากการแก้สมการ

$$T = \frac{Q}{2\pi k} - \frac{c_e}{2} - \ln \beta - \frac{\beta^2}{2.1!} - \frac{\beta^4}{4.2!} - \frac{\beta^6}{6.3!} - \dots\dots\dots (20)$$

ตัวอย่างอาหารที่นำมาวัดค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยใช้ line heat source method คือ ปลา 12 พันธุ์ ได้แก่ salmon, sol, black pomphret, white pomphret, mackerel, red bhitki, black bhitki, singra, hilsa, surama, malli, และ rohu (Kumbhar et al., 1981)



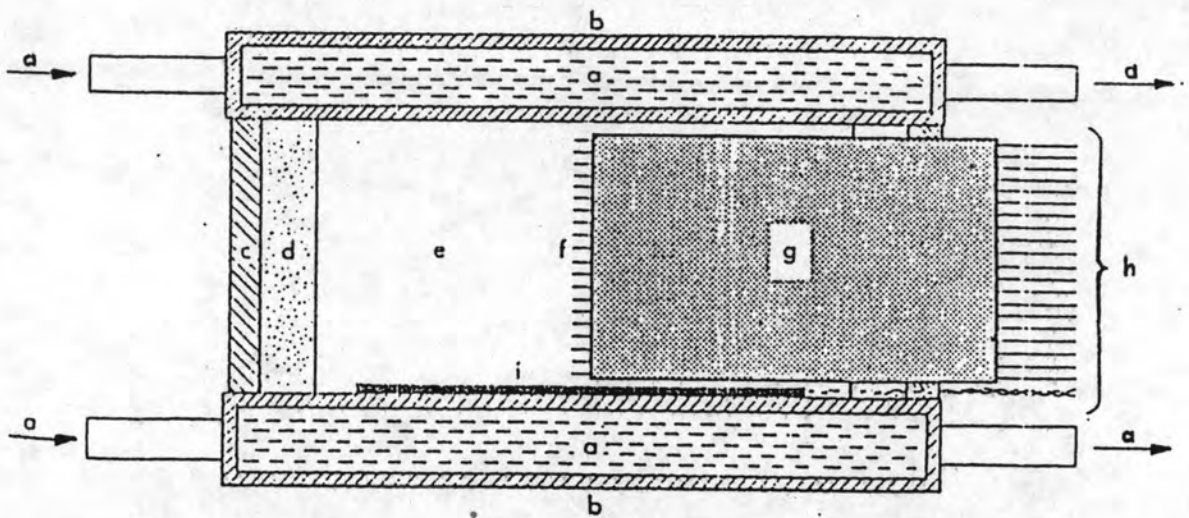
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งของ thermocouple และ heater ในกล่องอะลูมิเนียม

a-perspective view; b-side view of schematic diagram of experimental set-up;

1 to 4-thermocouple; 5-aluminium frame; 6-heater; 7-switch; 8-rheostat; 9-ammeter;
10-sample; 11-bleeder lamp; 12-recorder; 13-thermos flask; 14-storage battery 12 V

2.1.3.3 การใช้ Temperature profiles

เครื่องมือประกอบด้วยกล่องที่มียางเป็นฉนวนหุ้มรอบด้านข้างทั้ง 4 ด้าน ส่วนด้านบนและด้านล่างจะสัมผัสกับแผ่นโลหะแลกเปลี่ยนความร้อน การให้ความร้อนหรือความเย็นจะผ่านตัวอย่างในแนวเดียวเท่านั้น (one dimension heat flow) อุณหภูมิในตัวอย่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ ถูกวัดโดย probe ซึ่งประกอบด้วย thermocouple 20 เส้นที่เชื่อมติดอยู่กับแผ่นพลาสติกบาง ๆ ระยะระหว่างจุดที่วัดแต่ละจุดจะห่างเท่า ๆ กัน (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยการวัด Temperature profiles
 (a) flow of hot or cold ethanol; (b) aluminium heat exchanger; (c) rectangular tufnol frame; (d) thermal insulation around sample; (e) sample; (f) thermocouple junctions; (g) plastic strip supporting thermocouples; (h) cable to data logger; (i) heat flux sensor

ค่าสภาพแพร่ความร้อนหาได้จากการวัดอุณหภูมิที่กระจายในตัวอย่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเวลาที่กำหนด นำไปคำนวณโดยใช้สมการ heat equation ดังนี้

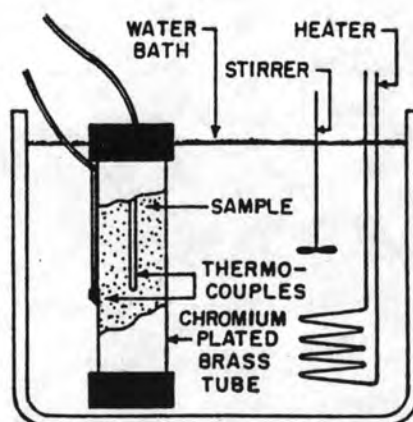
$$\alpha(T_e) = \frac{\partial T / \partial x}{\partial^2 T / \partial x^2} \Big|_{x = x_e} \dots\dots\dots(21)$$

- เมื่อ x = ระยะทางที่ตั้งฉากกับแผ่นโลหะแลกเปลี่ยนความร้อน
- T_e = อุณหภูมิต่ำสุดหรือสูงสุดของ Temperature profile
- x_e = ตำแหน่งที่อุณหภูมิ T_e

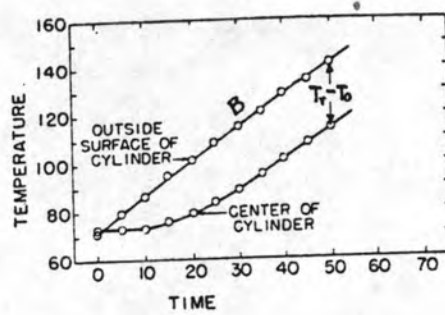
ตัวอย่างอาหารที่ศึกษาค่าสภาพแพร่ความร้อนด้วยวิธีนี้ ได้แก่ ปลา cod และ mackerel (Nesvadba, 1982) ซึ่งข้อจำกัดในการใช้วิธีนี้คือ ฉนวนต้องป้องกันความร้อนที่พอมิฉะนั้นจะทำให้อัตราการให้ความร้อนหรือดึงความร้อนออกจากตัวอย่างคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง นอกจากนี้ การสร้างเครื่องมือและการคำนวณจะยุ่งยากมาก แต่ข้อดีของวิธีนี้คือ การให้ความร้อนหรือดึงความร้อนออกจากตัวอย่างในขณะที่ทำการทดลองถือว่าใกล้เคียงกับวิธีที่ใช้กระบวนการแปรรูปอาหารมากที่สุด

2.1.3.4 การใช้ thermal diffusivity tube

เครื่องมือประกอบด้วย thermal diffusivity tube ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกยาวทำด้วยวัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูง ได้แก่ chromium - plate brass มีฝา teflon ปิดที่ปลายทั้งสองด้านหรืออาจทำด้วย chromium - plate copper ปิดด้วย rubber stoper ใช้บรรจุตัวอย่างอาหารที่ต้องการหาค่าสภาพแพร่ความร้อน ท่อทรงกระบอกที่ใช้ต้องมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าห้า เพื่อให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีความยาวไม่จำกัดมากที่สุด (Dickerson, 1965; Bhowmik and Hayakawa, 1979) มี thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างในท่อและที่ผนังด้านนอกของท่อ ใช้อ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิพร้อมเครื่องกวนเป็นอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในท่อด้วยอัตราคงที่ (รูปที่ 2.13) บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างในท่อและที่ผนังด้านนอกของท่อกับเวลา นำค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ไปสร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (รูปที่ 2.14) และคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนดังสมการที่ 7



รูปที่ 2.13 Thermal diffusivity tube สำหรับหาค่าสภาพแพร่ความร้อน (Dickerson, 1965)



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการแพร่ความร้อน (Dickerson, 1965)

$$\alpha = \frac{Br^2}{4(T_r - T_0)} \dots\dots\dots(22)$$

ตัวอย่างอาหารที่หาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยวิธีนี้ ได้แก่ เซอร์มิเชอเทศ แอปเปิล (Bhowmik and Hayakawa, 1979) ผลัดภักธน์เนื้อเทียม (Rizvi et al., 1980) สับปะรด (สิรินาถ เมฆมณี, 2533) มะละกอและมะม่วง (วิโรจน์ ฤดีศานต์, 2535) กุ้งแช่และกุ้งนึ่งน้ำว่า (แสงสวัสดิ์ อุดมเดชวัฒนา, 2537) เป็นต้น

2.1.3.5 Slab shape method

วิธีนี้จะทำตัวอย่างให้เป็นลักษณะแบนราบ จึงเหมาะสำหรับอาหารที่มีเนื้อนิ่ม เช่น พวกลูกปลาและเนื้อต่าง ๆ (Kubota et al, 1983) ซึ่งทำเป็นทรงกลมหรือรูปร่างอื่นได้ยาก เครื่องมือที่ใช้วัดประกอบด้วยกล่องที่ทำด้วยวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง เป็นส่วนที่ใช้บรรจุตัวอย่าง ใช้ thermocouple วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามที่กำหนดไว้ (รูปที่ 2.15) อ่างน้ำพร้อมเครื่องกวน 2 อ่างเป็นอุปกรณ์สำหรับรักษาอุณหภูมิตัวอย่างให้คงที่ และให้ความร้อนแก่ตัวอย่างตามลำดับ (รูปที่ 2.16) บันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละจุดในตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ ด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ แล้วนำอุณหภูมิที่วัดได้ไปคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนใช้หลักการของ finite difference ด้วยสมการ (23-25) โดยสมมติเงื่อนไขว่า การถ่ายโอนความร้อนเกิดเพียงทิศทางเดียว (one dimension heat flow) ไม่มีแหล่งความร้อนภายในวัตถุ และสภาพแพร่ความร้อนไม่ขึ้นกับตำแหน่งและอุณหภูมิ

$$Y = (T - T_e) / (T_o - T_e) \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$Y_{i,j+1} = Y_{i,j} + (Y_{i-1,j} - 2Y_{i,j} + Y_{i+1,j}) / M \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$M = \Delta x^2 / (\alpha \Delta t) \quad \dots\dots\dots (25)$$

เมื่อ Y คือ dimensionless temperature

M คือ dimensionless number

Δx คือ ระยะห่างระหว่างจุด

Δt คือ ช่วงเวลา

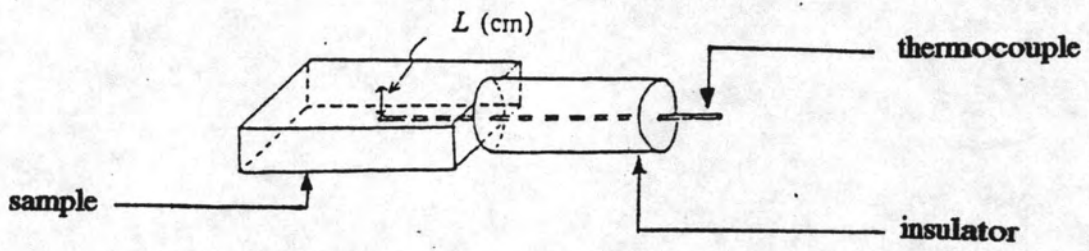
เครื่องหมาย subscript

i คือ ตำแหน่ง

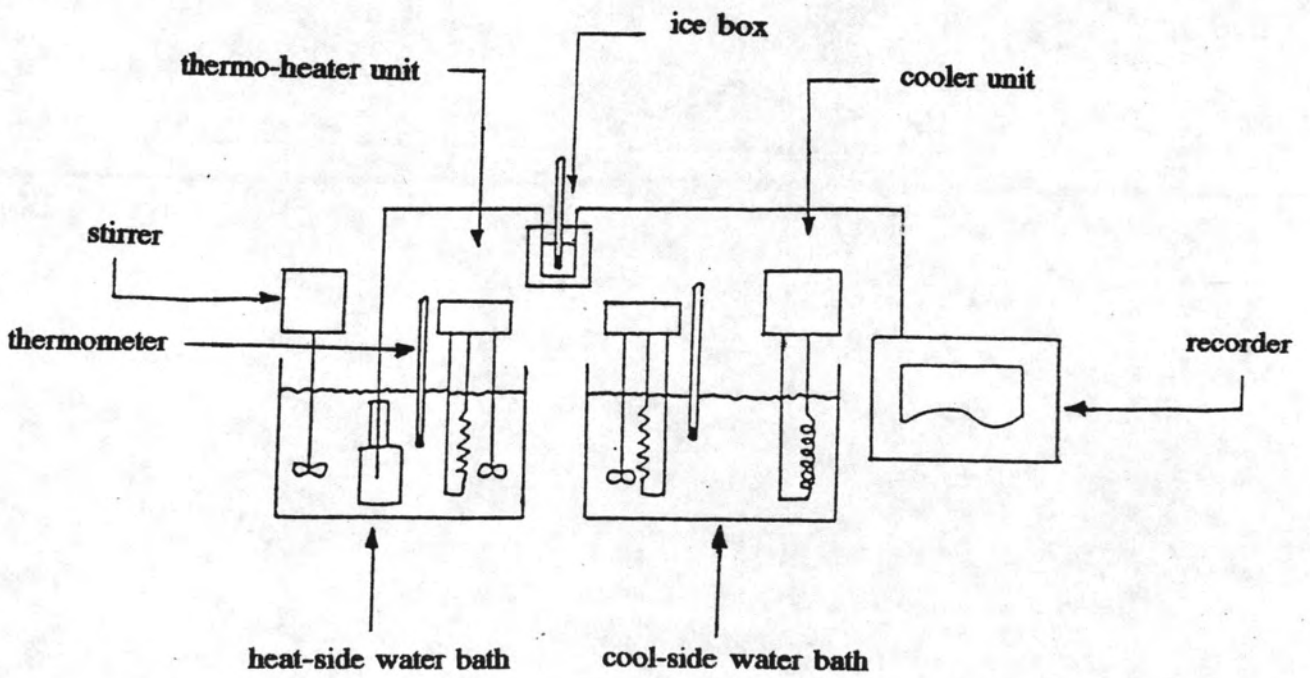
j คือ เวลา

การคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อน ทำโดยการประมาณค่าเริ่มต้น สภาพแพร่ความร้อน เพื่อแทนลงในสมการที่ 25 ค่า M ที่ได้จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 (ตามทฤษฎี) ค่าความแตกต่างระหว่าง dimensionless temperature ratio จากการทดลอง และการคำนวณ ในรูปของ standard deviation (σ) หากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ประมาณไว้กับ standard deviation ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนของตัวอย่าง คือ ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ทำให้เกิด standard deviation ต่ำสุดซึ่งหาได้โดยวิธี differential หรือ การสร้างกราฟระหว่างค่า Y ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ

ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ infinite slab plate ในทางทฤษฎีจะต้องมีความยาวไม่จำกัด ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปได้ ดังนั้น slab plate จะต้องมียึดตราส่วนความยาวต่อความหนามากกว่า 3 ขึ้นไป และ finite slab model จะต้องมีขนาดตั้งแต่ 2 เซนติเมตร ขึ้นไป เพื่อความสะดวกและถูกต้องในการสอด thermocouple probe เข้าไปยังศูนย์กลางของตัวอย่าง (Kubota et al., 1983) ตัวอย่างอาหารที่ใช้วิธีนี้วัดค่าสภาพแพร่ความร้อน คือ กุ้ง (Albin et al., 1979) ปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดอง (พิชญ์อร วนาอินทรายุธ, 2536)



รูปที่ 2.15 ตัวอย่าง slab ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.16 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยวิธี slab shape

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล

ปัจจัยสำคัญที่ผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเลได้แก่ ปัจจัยทางธรรมชาติของอาหารเองคือ องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร, โครงสร้างของเนื้อเยื่อ, ความหนาแน่น และปัจจัยภายนอกคือ อุณหภูมิ, ผลจากการละลาย และอัตราการแช่แข็ง (Mohsenin, 1980) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ปัจจัยทางธรรมชาติของอาหาร

2.2.1.1 ความชื้น

น้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในอาหาร น้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนจำเพาะ 0.999 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส มีค่าสภาพนำความร้อน 0.579 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน และมีค่าสภาพแพร่ความร้อน 1.43×10^{-7} เมตร²/วินาที ดังนั้นอาหารที่มีความชื้นสูงจึงมีสมบัติทางความร้อนสูงไปด้วย Annamma และ Rao (1974) พบว่าเมื่อความชื้นของปลา mackerel และปลา sardine ลดลง ค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาทั้งสองชนิดจะลดลง Nesvadba และ Eunson (1984) พบว่าในช่วงอุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็งค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลา cod บด จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น พิษญอร์วนาอินทรายุทธ (2536) พบว่าปลานมึกที่มีปริมาณความชื้นมากกว่า จะมีค่าสมบัติทางความร้อนมากกว่า

2.2.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีในกรณีนี้คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เป็นส่วนใหญ่ซึ่งสมบัติทางความร้อนก็จะแตกต่างกันไปตามปริมาณสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีภายในผลิตภัณฑ์อาหาร ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเลบางชนิดกับองค์ประกอบทางเคมีของอาหาร

ผลิตภัณฑ์	ความชื้น (ร้อยละ)	สมการ	เอกสารอ้างอิง
Cod	50 - 90	$k = 0.83W + 9.709 \times 10^{-3}P$	Hill et al., 1967
Salmon	50 - 90	$k = 0.73W + 4.926 \times 10^{-3}P$	El-Sahrigi et al., 1981
Mackerel	58.09	$C_p = W + 0.5F + 0.36P$	
Sardine	73.05		
Bolti	80.10		

* F = สัดส่วนของไขมันในตัวอย่าง

P = สัดส่วนของโปรตีนในตัวอย่าง

2.2.1.3 โครงสร้างของเนื้อเยื่อ

อิทธิพลของโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหาร คือทิศทางการเรียงตัวของเนื้อเยื่อ และความพรุน สำหรับค่าสภาพนำความร้อนในทิศทางขนานกับเนื้อเยื่อ และในทิศทางตั้งฉากกับเนื้อเยื่อ ค่าที่ได้จะแตกต่างกันออกไป (Bahge-Khandan et al., 1981) ส่วนความพรุนจะมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน เนื่องจากอาหารที่เต็มไปด้วยรูพรุนมากมาย จะมีอากาศและไอน้ำอยู่ภายในการถ่ายโอนความร้อนจึงต้องผ่านสิ่งเหล่านี้ไปด้วย ทำให้ค่าที่ได้แตกต่างกันออกไประหว่างอาหารที่บดกับไม่บด (Nesvadba and Eunson, 1984)

2.2.2 ปัจจัยภายนอก

2.2.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อสมบัติทางความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจะทำให้สมบัติทางความร้อนของอาหารเปลี่ยนไปด้วย เช่น Nesvadba และ Eunson (1984) พบว่าช่วงเหนือจุดเยือกแข็งของอาหาร ค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลา cod จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จนถึงได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ส่วนช่วงต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ค่าสภาพแพร่ความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง โดยทั่วไปพบว่าอาหารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จะมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (Polley, Snyder and Kotnour, 1980) เนื่องจากน้ำแข็งมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าน้ำที่อุณหภูมิห้อง แต่

อาหารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งปกติ จะมีค่าความร้อนจำเพาะต่ำกว่าที่อุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็ง เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะของน้ำแข็งมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำที่อุณหภูมิห้อง (Fleming, 1969)

2.2.2.2 ผลจากการละลาย (thawing)

อาหารที่ถูกแช่แข็งแบบช้า ผลึกที่ได้จะมีจำนวนน้อยและเป็นผลึกขนาดใหญ่ที่สามารถทำลายผนังเซลล์ได้ และเมื่อนำมาทำการละลายจะทำให้มีน้ำบางส่วนออกมาจากโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่ถูกทำลาย ทำให้มีน้ำในอาหารน้อยลง (Fennema, Powrie, and Marth, 1973) มีผลทำให้ค่าสมบัติทางความร้อนลดลง (พิชญ์อร วนาอินทราญร, 2536)

2.2.2.3 อัตราการแช่แข็ง (freezing rate)

อัตราการแช่แข็งจะมีผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ได้ ถ้าอัตราการแช่แข็งช้า ผลึกน้ำแข็งจะมีจำนวนน้อย แต่มีขนาดใหญ่ ส่วนอัตราการแช่แข็งเร็ว ผลึกของน้ำแข็งจะมีจำนวนมากและมีขนาดเล็ก ซึ่งขนาดของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์เนื้อแช่แข็งจะมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อน (Mohsenin, 1980, quoting Luyet, 1964)

2.2.2.4 อัตราส่วนที่น้ำเป็นน้ำแข็ง

อัตราส่วนที่น้ำเป็นน้ำแข็งจะวัดในรูปของร้อยละของน้ำที่ยังไม่เป็นน้ำแข็ง (% unfrozen) ซึ่งค่าสมบัติทางความร้อนของน้ำและน้ำแข็งมีค่าแตกต่างกัน จึงมีผลให้ค่าสมบัติทางความร้อนแตกต่างกัน พิชญ์อร วนาอินทราญร (2536) พบว่าปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองในช่วงต้นของการแช่แข็ง น้ำบางส่วนยังไม่เป็นน้ำแข็งจึงมีค่าสภาพนำความร้อนและค่าสภาพแพร่ความร้อนต่ำกว่าช่วงหลังจากที่น้ำเป็นน้ำแข็งเกือบหมดแล้ว เนื่องจากค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งสูงกว่าน้ำถึง 4 เท่า ส่วนค่าความร้อนจำเพาะจะให้ผลตรงกันข้ามเนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะของน้ำสูงกว่าน้ำแข็งประมาณ 2 เท่า

2.3 กุ้ง

กุ้งเป็นสัตว์น้ำที่ไม่มีกระดูกสันหลังประเภทหนึ่ง ลำตัวยาว มีเปลือกหุ้มตัวและแบ่งเป็นปล้อง ๆ อยู่ใน Phylum Arthropoda และจัดอยู่ใน Class Crustacea (ประจวบ หล้าอุบล, 2527)

2.3.1 ลักษณะโครงสร้างของกุ้ง

ลักษณะโครงสร้างของกุ้งประกอบด้วย โครงสร้างภายนอก (exoskeleton) หรือเปลือก และเนื้อกุ้งหรือกล้ามเนื้อ (muscle)

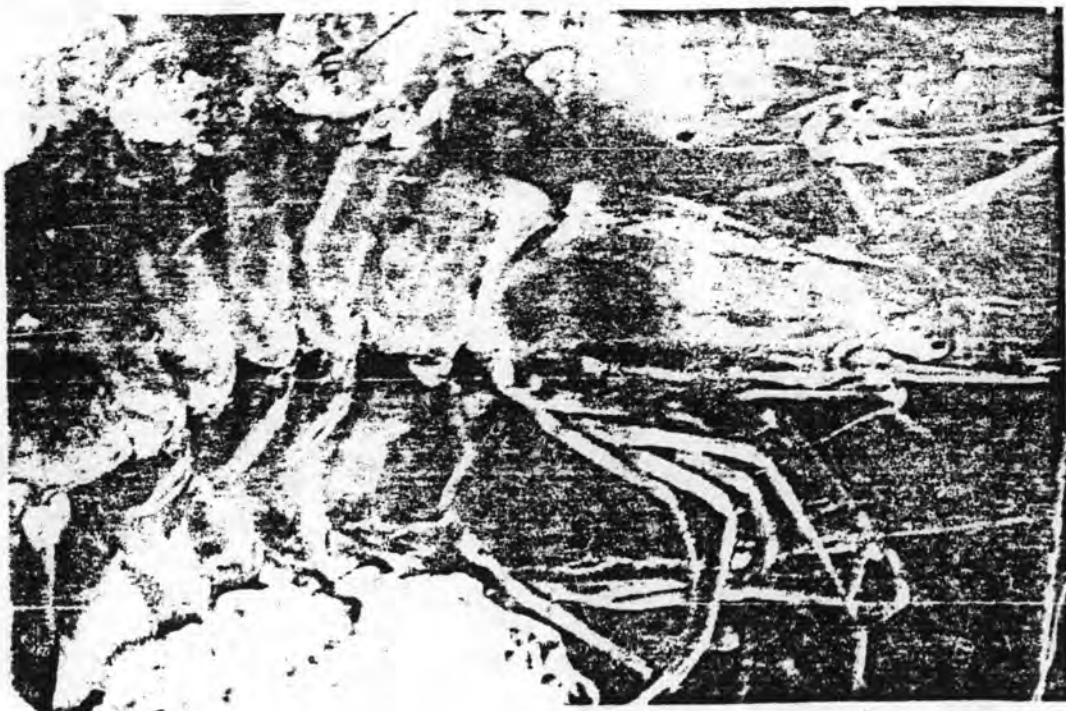
กล้ามเนื้อของกุ้งมีเพียงชนิดเดียว คือ กล้ามเนื้อลาย (striated muscle) ซึ่งพบได้ทั่วไปตามลำตัวรอบอวัยวะต่าง ๆ กล้ามเนื้อลายประกอบด้วย myofibril จำนวนมากรวมกันเป็น muscle fiber ที่มี sarcolemma เป็นเยื่อบาง ๆ หุ้มอยู่

2.3.2 ลักษณะของกุ้ง

กุ้งที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการแช่แข็ง คือ กุ้งกุลาดำและกุ้งแช่บ๊วย

2.3.2.1 กุ้งกุลาดำ

กุ้งกุลาดำหรือกุ้งทะเล หรือกุ้งม้าลาย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Penaeus monodon* Fabricius และมีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า Tiger prawn หรือ Giant tiger prawn กุ้งชนิดนี้จัดอยู่ในวงศ์ Penacida ในขณะที่ยังมีชีวิตอยู่ลำตัวเป็นสีม่วงแดง มีแถบสีน้ำตาลพาดขวางลำตัวเป็นปล้อง ๆ เปลือกหัวเกลี้ยงไม่มีขน หนวดมีสีดำ ไม่มีลาย ฟันกรีด้านบนมี 7-8 ซี่ ด้านล่างมี 3 ซี่ ร่องข้างกรีดทั้งสองด้านมีลักษณะแคบและยาวไม่ถึงฟันกรีดอันสุดท้าย ที่ขาเกินคู่ที่ 5 ไม่มีระยางอันนอก ถิ่นอาศัยของกุ้งกุลาดำ ได้แก่ น่านน้ำแถบใต้หวัน ไทย มาเลเซีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ ออสเตรเลีย และอินเดีย เป็นกุ้งที่อยู่ในเขตร้อน ชอบอาศัยอยู่บริเวณน้ำลึกห่างออกจากฝั่ง และชอบพื้นทะเลที่เป็นดินทราย สามารถทนอยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง และความเค็มต่ำ เช่น บริเวณป่าชายเลน (วัลลภ คงเพิ่มพูน, 2532)



รูปที่ 2.17 ลักษณะของกุ้งกุลาดำ

2.3.2.2 กุ้งแชบ๊วย

กุ้งแชบ๊วย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Penaeus merguensis* de Man และมีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า Banana prawn กุ้งแชบ๊วยจะมีลักษณะลำตัวค่อนข้างโต มีสีอ่อนหรือสีครีม มีกรืออยู่ในแนวระดับยาวเกือบเท่าความยาวของเปลือกตัว ส่วนกรือสูง ปลายกรือแคบ ด้านบนของกรือมีฟัน 5 - 8 ซี่ ด้านล่างมี 4 - 5 ซี่ ร่องข้าง และร่องบนกรือตื้นและจะหายไปในบริเวณตรงกลางของเปลือก กรือและสันบนปล้องท้องมีสีน้ำตาลปนแดง ส่วนปลายมีสีแดง กุ้งแชบ๊วยพบอยู่ทั่วไปในน่านน้ำธรรมชาติ และจะพบชุกชุมในบริเวณที่มีความลึกของน้ำทะเลประมาณ 10 เมตร ชอบอาศัยอยู่ในที่ที่พื้นดินเป็นดินโคลนหรือเลน (สุวิทย์ ชีนสินธุ์, 2531)



รูปที่ 2.18 ลักษณะของกุ้งแชบ๊วย

2.4 สมบัติทางความร้อนของกุ้ง

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับค่าสมบัติทางความร้อนของกุ้ง (ตารางที่ 2.2) พบว่ามีการศึกษาสมบัติทางความร้อนของกุ้งน้อยมาก เป็นเพียงการศึกษาแต่ช่วงอุณหภูมิเท่านั้น ไม่มีการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ พันธุ์ ภาวะการละลาย ทิศทางการเรียงตัวของเนื้อเยื่อ อัตราการ

แช่แข็ง และปัจจัยอื่น ดังนั้นข้อมูลของค่าสมบัติทางความร้อนของกุ้งยังไม่เพียงพอ ในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิกับค่าสมบัติทางความร้อนของกุ้งในช่วงแช่แข็ง เพื่อให้มีข้อมูลเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

ตารางที่ 2.2 สมการหรือค่าสมบัติทางความร้อนของกุ้ง

อาหาร	อุณหภูมิ (°C)	ความร้อน จำเพาะ (cal/g °C)	สภาพนำความร้อน	สภาพแพร่ ความร้อน (m ² /h x10 ⁻³)	เอกสารอ้างอิง
shrimp	below freezing	0.449			Polley, Snyder, and Kotnour, 1980
	above freezing	0.831			
shrimps,peeled and deveined of grade =200/300	10			0.50	Albin et al., 1979
	10			0.44	
	-10			3.19	Matuszek et al., 1983
	-10			2.16	
shrimp	-30 ถึง 57		$k = 9.37 \times 10^{-6}$ $- 3.89 \times 10^{-8}T$ $+ 1.62 \times 10^{-11}T^2$		