

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การวัดสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล

2.1.1 การวัดความร้อนจำเพาะ

ความร้อนจำเพาะเป็นสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างหนึ่งของสาร คือเป็น ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารมวล 1 หน่วยไป 1 องศา ในเรื่อง ของอาหารความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (C_p) มีบทบาทสำคัญมากกว่าความร้อนจำเพาะที่ ปริมาตรคงที่ (C_v) โดยปกติค่าความร้อนจำเพาะของอาหารคำนวณได้จากค่าความร้อนจำเพาะ ขององค์ประกอบต่างๆ (C_{p_i}) ในอาหารกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักขององค์ประกอบ (x_i) นั้นๆ (Toledo, 1991) ดังสมการ (1)

$$C_p = \sum (C_{p_i} x_i) \dots \dots \dots (1)$$

ค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบต่างๆในอาหาร ยังขึ้นกับอุณหภูมิ

(Toledo, 1991) ดังแสดงในตาราง 2.1

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส) ของ องค์ประกอบต่างๆ ในอาหาร กับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

องค์ประกอบ	สมการ
ความชื้น	$C_p = 0.9975 - 2.17 \times 10^{-6} T + 1.31 \times 10^{-8} T^2$
โปรตีน	$C_p = 0.4797 + 2.89 \times 10^{-4} T - 3.14 \times 10^{-7} T^2$
ไขมัน	$C_p = 0.4739 + 3.52 \times 10^{-4} T - 1.15 \times 10^{-6} T^2$
เส้นใย	$C_p = 0.4409 + 4.61 \times 10^{-4} T - 1.11 \times 10^{-6} T^2$
เถ้า	$C_p = 0.2610 + 4.51 \times 10^{-4} T - 8.79 \times 10^{-7} T^2$
คาร์โบไฮเดรต	$C_p = 0.3699 + 4.69 \times 10^{-4} T - 1.42 \times 10^{-6} T^2$

ค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการคำนวณตามองค์ประกอบต่างๆ ในอาหารที่ อุณหภูมิใดๆ จะมีค่าแตกต่างจากค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทดลองประมาณ 0.7 ถึง 1.9 เท่า (Moline, 1961) ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะที่ถูกต้องของอาหารแต่ละชนิดต้องหาจาก การทดลอง ซึ่งการวัดค่าความร้อนจำเพาะสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

2.1.1.1 การใช้แคลอริมิเตอร์

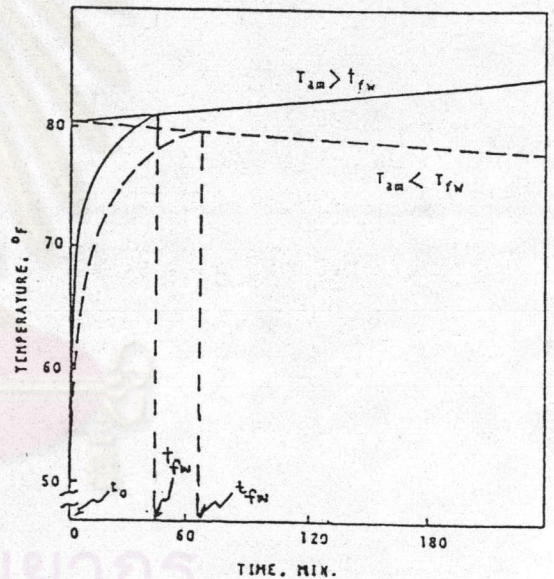
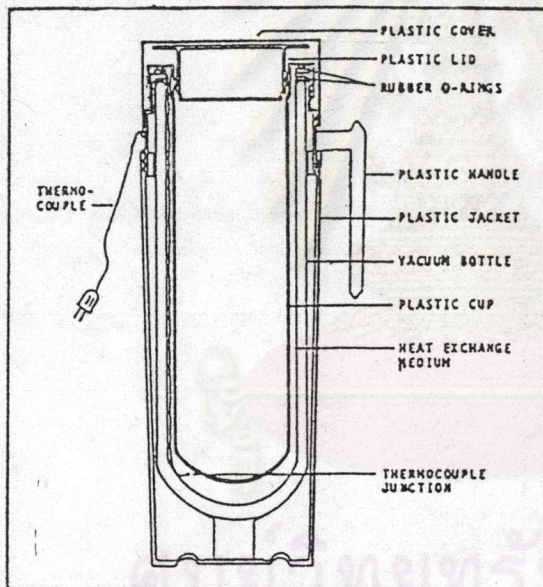
เครื่องมือที่ใช้มีอยู่หลายแบบ แต่ใช้หลักการทำงานเดียวกันคือใช้ แคลอริมิเตอร์ที่มีลักษณะเป็น vacuum-jacket ซึ่งมีช่องสำหรับใส่ตัวอย่างขนาดพอเหมาะ มี ฝาปิดอย่างมิดชิดและมี thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำซึ่งใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ในแคลอริมิเตอร์ (Mohsenin, 1980; Hwang และ Hayakawa, 1979) ดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ยังมีการป้องกันการสูญเสียความร้อนโดยมีฉนวนหุ้มอย่างเพียงพอเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียหรือ ได้รับความร้อน (adiabatic) ตามทฤษฎี ข้อดีของการใช้แคลอริมิเตอร์ในการหาค่าความร้อน จำเพาะ คือการเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนในการทดลองง่าย สามารถใช้ผู้ที่มีความชำนาญน้อยทำ

การทดลอง นำไปใช้ในขั้นตอนการผลิตได้ เนื่องจากแคลอริมิเตอร์มีน้ำหนักเบาปริมาณน้อย และ ใช้เวลาในการทดลองสั้น การคำนวณค่าความร้อนจำเพาะใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานดังสมการ

$$C_{pw} W_w (\Delta T_w) = C_{pw} W_w (\Delta T_w) + H_c (\Delta T_c) - E \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อ E = (C_{pw} W_w + H_c + C_{pw} W_w) (dT / dt) t_F

T_{am} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
 T_{fw} คือ อุณหภูมิที่จุดสมดุล



(ก) (ข)

รูปที่ 2.1 (ก) ภาพตัดขวางของ แคลอริมิเตอร์
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของน้ำในแคลอริมิเตอร์



การใช้แคลอริมิเตอร์ในการหาค่าความร้อนจำเพาะสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

ก. Method of mixture

ผสมตัวอย่างกับสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะลงในแคลอริมิเตอร์ ซึ่งโดยปกติจะใช้น้ำกลั่น จากนั้นวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปต่อเวลา นำไปคำนวณค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน

ข. Modified method of mixture หรือ indirect mixing method

วิธีนี้ดัดแปลงมาจากวิธี method of mixture

โดยใส่ตัวอย่างในภาชนะบรรจุแยกจากสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ตัวอย่างและสารตัวกลางไม่มีการสัมผัสกัน ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ วิธีนี้กำจัดปัญหาเกี่ยวกับค่าความร้อนของการละลายของตัวอย่างในสารดังกล่าวได้ ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าความร้อนจำเพาะได้แก่ กุ้ง (Suzuki และคณะ, 1979)

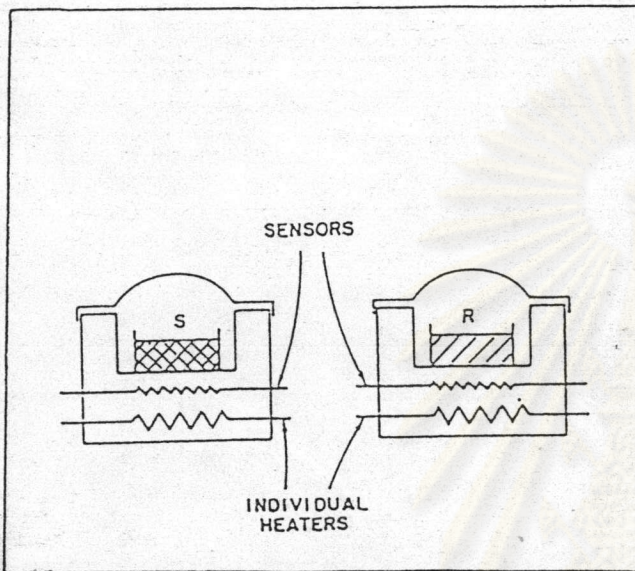
เมื่อเปรียบเทียบการหาค่าความร้อนจำเพาะทั้ง 2 วิธีพบว่า method of mixture เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำ และไม่ละลายในสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน ขณะที่วิธี modified method of mixture เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีความชื้นสูง

2.1.1.2 การใช้ Differential scanning calorimeter: (DSC)

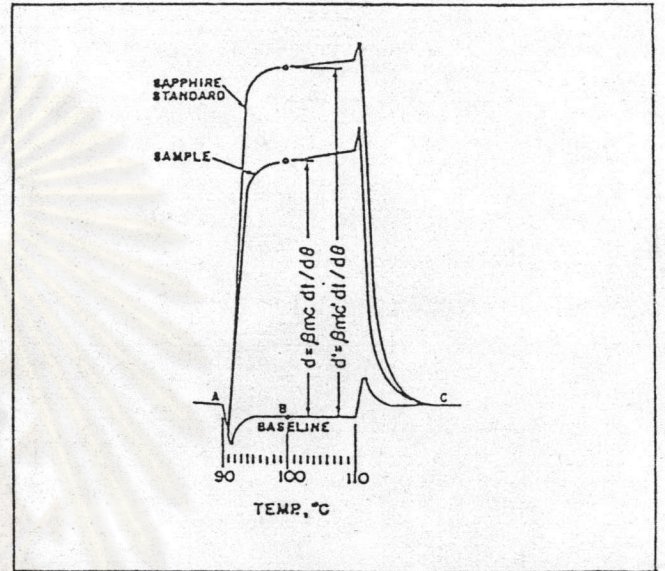
ใช้หลักการเปรียบเทียบผลของพลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน มีเครื่องบันทึก (รูปที่ 2.2 ก) ทำการบันทึกพลังงานที่ได้รับหรือสูญเสียในขณะที่มีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในรูปของ thermogram (รูปที่ 2.2 ข) พื้นที่ใต้ thermogram จะแสดงสัดส่วนพลังงานความร้อนที่ได้รับหรือคายของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการ ภายในเครื่องประกอบด้วย sample holder (S), reference holder (R), เครื่องบันทึกอุณหภูมิ และ temperature programmer ซึ่งเป็นส่วนควบคุมระบบการให้ความร้อน ความชื้น ส่วนใหญ่การทำงานและการคำนวณจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ สมการที่ใช้คำนวณค่าความร้อนจำเพาะด้วยวิธีนี้คือ

$$C_p = (dm_r / d'm_u) C_{pr} + (C_{pA} / m_u) [d \{ (M_r - M_B) + (M_B - M_A) \} / d'm_u]$$

.....(3)



(ก)



(ข)

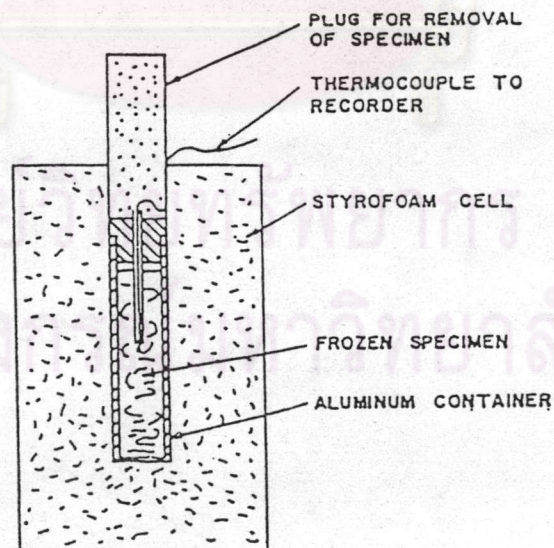
รูปที่ 2.2 (ก) รูปแบบของ DSC (ข) DSC Thermogram สำหรับการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ

ข้อดีของวิธี DSC คือ การให้ผลการวัดที่ถูกต้องและรวดเร็ว ใช้ตัวอย่างปริมาณน้อยเป็นเพียงจำนวนมิลลิกรัมเท่านั้น แต่วิธี DSC ต้องใช้เครื่องมือที่ใช้เทคโนโลยีทางไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ควบคุม การเตรียมตัวอย่างต้องระมัดระวัง ผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้และความชำนาญสูง ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าความร้อนจำเพาะได้แก่ surimi (Wang และ Kolbe, 1991) และปลาค็อด (Sanz และคณะ, 1987)

2.1.1.3 Moline's method

วิธีนี้ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะของอาหารแช่แข็ง (Moline และ คณษ, 1961) เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยกล่อง polystyrene ซึ่งเป็นฉนวนเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนเร็วจนเกินไป ภายในมี aluminium container อยู่บริเวณกลางกล่องเพื่อใช้บรรจุตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ด้านบนมีฝาทำจาก polystyrene ดังรูปที่ 2.3 ในขั้นต้นจะนำวัตถุที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะบรรจุใน container ไปทำให้มีอุณหภูมิเท่ากับจุดเยือกแข็งอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำไปใส่ในกล่องโพลีสไตรีนหุ้มห้อง วัดอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของวัตถุด้วย thermocouple เพื่อนำมาหาอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม (Q) โดยใช้สมการ(4) จากนั้นนำตัวอย่างที่ต้องการหาค่าความร้อนจำเพาะบรรจุลงใน container และทำการทดลองเช่นเดิม สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะโดยวิธีนี้คือ

$$C_{p_m} = \{ [Q / (\Delta T / \Delta t) - C_{p_A} W_A] / W_m \} \dots \dots \dots (4)$$



รูปที่ 2.3 เครื่องมือที่ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะโดยวิธีของ Moline

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้หาค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งได้แก่ ปลาค็อด, กุ้ง (Moline และคณะ, 1961)

2.1.2 การวัดสภาพนำความร้อน

สภาพนำความร้อน (conduction) เป็นการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากการชนกันโดยตรงของอนุภาค (โมเลกุล, อะตอม, อิเล็กตรอน) อันเนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เกิดขึ้นได้ดีในของแข็งเพราะโมเลกุลของของแข็งอยู่ใกล้กันมากกว่าโมเลกุลของของเหลว หรือ ก๊าซ ค่าสภาพนำความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร็วของการถ่ายโอนความร้อน ถ้าค่าสภาพนำความร้อนมีค่าสูงอัตราเร็วของการถ่ายโอนความร้อนก็จะมีค่าสูงเช่นกัน และค่าสภาพนำความร้อนเป็นสมบัติเฉพาะของวัตถุแต่ละชนิด (Mohsenin, 1980)

สภาพนำความร้อนที่ภาวะสมดุล สามารถคำนวณโดยใช้ Fourier's law ซึ่งอุณหภูมิของตัวอย่างในแต่ละจุดคงที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา และอัตราเร็วในการถ่ายโอนความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังสมการ

$$Q / A = -k \, dT / dX \dots\dots\dots(5)$$

สมการนี้เรียกว่า Fourier equation ซึ่งการวัดค่าสภาพนำความร้อนจะอาศัยพื้นฐานของสมการนี้

ค่าสภาพนำความร้อนสามารถคำนวณจากค่าสภาพนำความร้อนขององค์ประกอบทางเคมี (k_i) และสัดส่วนโดยปริมาตร (x_{v_i}) ของแต่ละองค์ประกอบ และมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$k = \Sigma (k_i \, x_{v_i}) \dots\dots\dots(6)$$

เมื่อ $x_{v_i} = x_i \rho_i / \rho_c$
 $\rho_c = 1 / (\Sigma x_i / \rho_i)$

โดยสภาพนำความร้อน (k_s) และความหนาแน่น (ρ_s) ขององค์ประกอบต่างๆ ในอาหารสามารถคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ (Toledo, 1991) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเซลวิน) และความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) ขององค์ประกอบต่างๆ ในอาหารกับอุณหภูมิ (องศาเซลวิน)

องค์ประกอบ	สมการ	
	k_s	ρ_s
ความชื้น	$0.57109 - 0.0017625T - 6.7306 \times 10^{-6} T^2$	$997.18 + 0.003T - 0.0037574T^2$
โปรตีน	$0.1788 + 0.0011958T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2$	$1329.9 - 0.518T$
ไขมัน	$0.1807 - 0.0027604T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2$	$925.59 - 0.417T$
เส้นใย	$0.18331 + 0.0012497T - 3.1683 \times 10^{-6} T^2$	$1311.5 - 0.365T$
เถ้า	$0.3296 + 0.001401T - 2.9069 \times 10^{-6} T^2$	$2423.8 - 0.280T$
คาร์โบไฮเดรต	$0.2014 + 0.0013874T - 4.3312 \times 10^{-6} T^2$	$1599.1 - 0.310T$

วิธีการวัดค่าสภาพนำความร้อนของอาหารทะเลแบ่งเป็น 3 แบบคือ

2.1.2.1 Steady State method วิธีนี้ตัวอย่างที่ต้องการวัด อยู่ในภาวะสมดุลคืออุณหภูมิ ณ จุดใดๆ คงที่ (ไม่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา) การหาค่าสภาพนำความร้อนทำได้โดยวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างและความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งหลักการนี้มี 3 วิธีดังนี้

ก. Modified parallel plate method หรือ

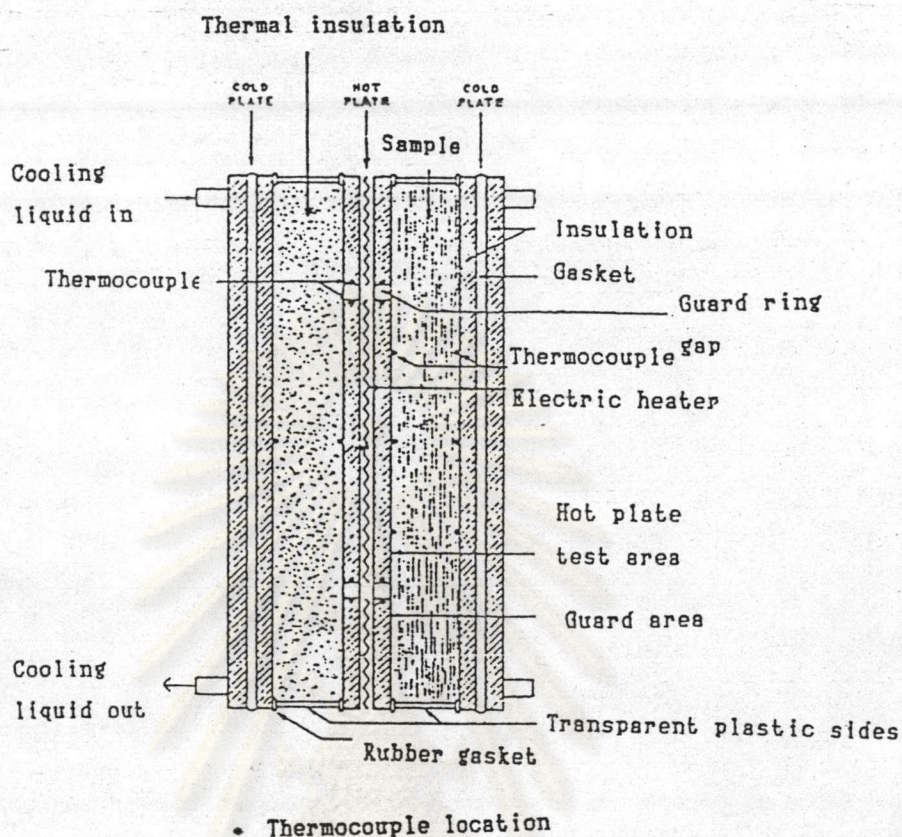
Modified guard hot plate method

วิธีนี้ให้ผลค่อนข้างถูกต้องเหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้งและอาหารที่เป็นแผ่น โดยการใส่ตัวอย่างในช่องว่างช่องหนึ่งภายในเครื่องมือ (Lentz, 1961) ให้ด้านหนึ่งสัมผัสกับแหล่งให้ความร้อน (heat source) และอีกด้านสัมผัสกับแหล่งรับความร้อน (heat sink) และมี guard plate สำหรับป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 2.4 ส่วนอีกช่องหนึ่งจะใส่วัตถุอ้างอิง ซึ่งนิยมใช้ฉนวนที่ทราบค่าสภาพนำความร้อนวิธีนี้ปรับปรุงจากวิธีการของ Guard hot plate ซึ่งมีช่องใส่ตัวอย่างเพียงช่องเดียว และวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างโดยตรงเพื่อคำนวณค่าสภาพนำความร้อนของตัวอย่าง โดยใช้สมมติฐานว่าปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างจะเท่ากับปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ไหลผ่านตัวอย่างและไม่มีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้น แต่ในทางปฏิบัตินั้นแหล่งให้ความร้อนหลักถ่ายโอนความร้อนสู่ hot plate ซึ่งเป็นส่วนให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง แต่ไม่ถ่ายโอนความร้อนให้แก่ guard ring gap ทำให้เกิดความไม่สมดุลทางความร้อนระหว่าง hot plate และ guard ring gap จึงมีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้ การใช้วัตถุอ้างอิงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างโดยตรง ค่าสภาพนำความร้อนคำนวณได้จาก

$$Q = k_r A (T_1 - T_2) / D_r = k_u A (T'_1 - T'_2) / D_u \dots\dots\dots (7)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิทั้งสองด้านของตัวอย่าง

T'_1 และ T'_2 คืออุณหภูมิทั้งสองด้านของวัตถุอ้างอิง



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของ Parallel plate apparatus

วิธีนี้ใช้เวลาในการทดลองนาน แต่สามารถใช้กับ

ตัวอย่างที่มีการนำความร้อนแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง (non isotropic materials) ได้ ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าสภาพนำความร้อนได้แก่ ปลาเค็ม และ salmon (Lentz, 1961)

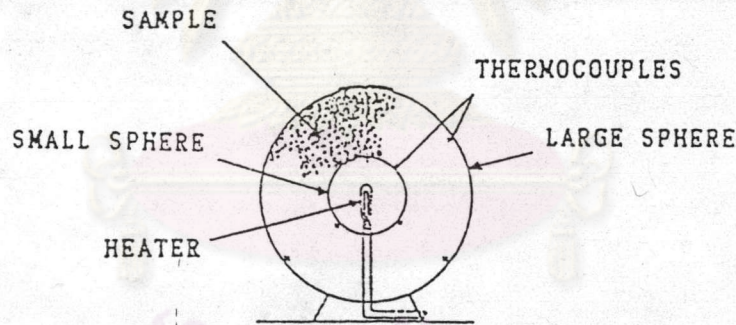
๗. Concentric sphere method

วิธีนี้หาค่าสภาพนำความร้อนโดยบรรจุตัวอย่างลงในช่องว่างของเครื่องมือรูปร่างทรงกลมที่มีรัศมีภายใน r_1 และมีรัศมีภายนอก r_2 (El-sahrigi และคณะ, 1981) ซึ่งมี heater ติดตั้งอยู่ภายในทรงกลมด้านใน (รูปที่ 2.5) นำเครื่องมือใส่ในกล่องหุ้มฉนวนที่มีพัดลมสำหรับหมุนเวียนอากาศบริเวณรอบเครื่องมือและให้ความร้อนจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ค่าสภาพนำความร้อนคำนวณจากสมการ (8)

$$k = Q (r_2 - r_1) / 4rk (T_1 - T_2) r_1 r_2 \dots\dots\dots (8)$$

เมื่อ $Q = VIt$

T_1 และ T_2 คือ อุณหภูมิของตัวอย่างที่รัศมีภายใน (r_1) และรัศมีภายนอก (r_2) ที่ภาวะสมดุลตามลำดับ



รูปที่ 2.5 Concentric sphere apparatus

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้หลัก steady state ที่ให้ค่าสภาพนำความร้อนที่ถูกต้องมากที่สุดเนื่องจากสามารถกำจัดความผิดพลาดอันเกิดจากการสูญเสียความร้อนได้ แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากต้องใช้ตัวอย่างที่มีรูปร่างทรงกลมโดยแท้จริง และต้องตัดแบ่งครึ่งตัวอย่างทรงกลมเพื่อสอด heater ตัวอย่างอาหารที่วัดค่าสภาพนำความร้อนด้วยวิธีนี้คือ ปลา ค็อดบด (Long, 1955)

ค. Concentric cylinder method

วิธีนี้ส่วนใหญ่ใช้กับตัวอย่างอาหารที่เป็นผงหรือเป็นเม็ดเล็กๆ โดยบรรจุตัวอย่างในช่องว่างรูปวงแหวนของเครื่องมือรูปทรงกระบอกที่มีรัศมีภายใน (r_1) และรัศมีภายนอก (r_2) ดังรูปที่ 2.6 ให้ความร้อนโดยใช้ heater ที่อยู่ด้านในของทรงกระบอกและมีอ่างน้ำมันที่มีอุณหภูมิคงที่เพื่อรักษาอุณหภูมิ ค่าสภาพนำความร้อน จะคำนวณได้จากสมการ

$$k = Q \ln (r_2 - r_1) / [2\pi l (T_1 - T_2)] \dots\dots\dots(9)$$

เมื่อ $Q = VIt$

T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิของตัวอย่างที่รัศมี r_1 และ r_2 ตามลำดับที่ภาวะ

สมดุล

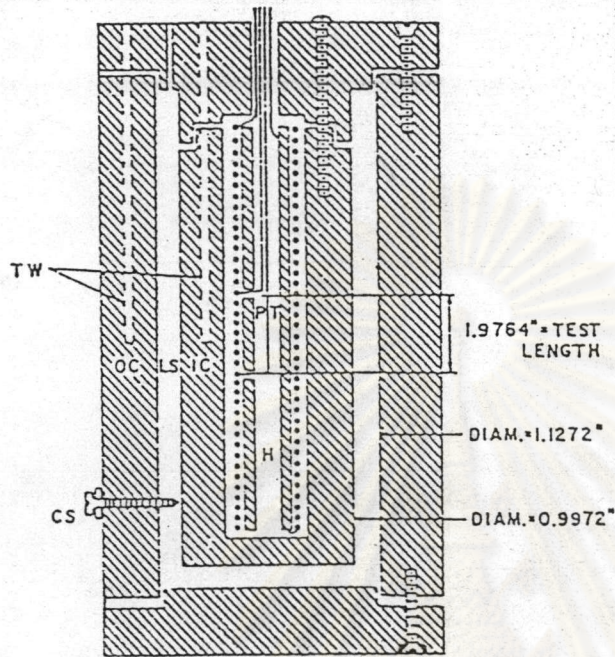
r_1 และ r_2 คือรัศมีภายในและรัศมีภายนอกของทรงกระบอกตามลำดับ

l คือ ความยาวทรงกระบอก

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าสภาพนำความร้อน

ได้แก่ ปลาค็อด, Herring, Whale meat (Baghe-khandan และคณะ, 1981 อ้างถึง Steel, 1958 และ Smith และคณะ, 1952) Hadcock (Baghe-khandan และคณะ, 1981, อ้างถึง Luck และคณะ, 1964)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



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

รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางของ concentric cylinder apparatus (Woodams และคณะ, 1968, อ้างถึง Wolf and Sibbitt, 1954)

การวัดค่าสภาพนำความร้อนแบบ steady state มีข้อดีคือการคำนวณง่าย และสามารถวัดค่าสภาพนำความร้อนของตัวอย่างที่เป็นของเหลว ผง หรือ เมล็ดได้ แต่มีข้อเสียคือ ไม่เหมาะกับตัวอย่างอาหารกึ่งแข็งที่มีความชื้นมากกว่าร้อยละ 10 เนื่องจากจะเกิด moisture migration เพราะใช้เวลาในการทดลองแต่ละครั้งนานหลาย ชั่วโมงนอกจากนี้ยังอาจเกิดการสูญเสียความร้อนจากเครื่องมืออีกด้วย (Reidy และ Rippen, 1971)

2.1.2.2 Semi - steady state method วิธีนี้ใช้หลักการของ quasi - steady state heat transfer ซึ่งเหมาะกับตัวอย่างที่มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำ โดยวัดปริมาณความร้อนที่ตัวอย่างได้รับด้วยการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวกลางที่รับความร้อน จากการสัมผัสกับตัวอย่าง (ตัวกลางที่นิยมใช้คือกลีเซอริน) โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อ

เวลาของตัวกลางมีน้อย ทำให้ตัวอย่างอยู่ในภาวะกึ่งสมดุล

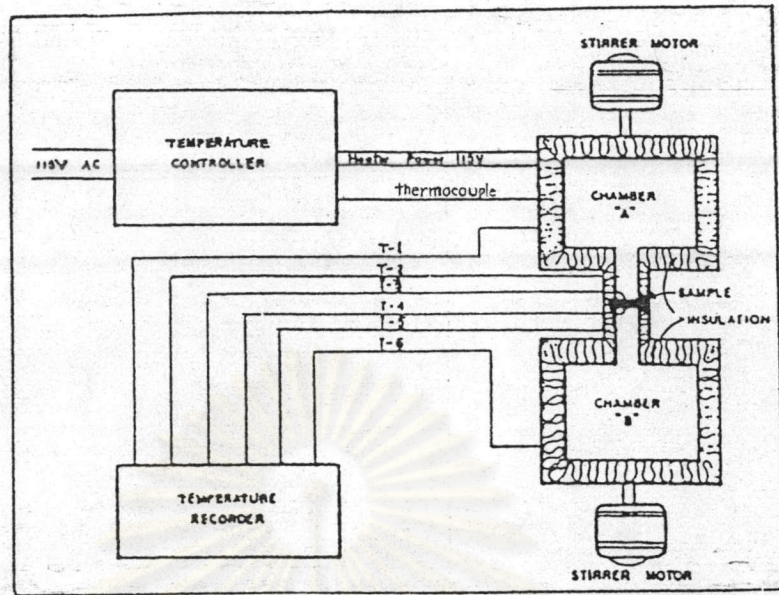
การหาค่าสภาพนำความร้อนด้วยวิธีนี้จะใส่ตัวอย่างให้อยู่ระหว่าง chamber A และ chamber B ซึ่งจะติดกับส่วนของของเหลวโดยตรงทั้งสองด้าน (รูปที่ 2.7) ใน chamber A จะมีของเหลวอุณหภูมิสูง เพื่อถ่ายโอนความร้อนไปสู่ตัวอย่าง ส่วน chamber B จะมีของเหลวอุณหภูมิต่ำเพื่อรับความร้อนจากตัวอย่าง ภายในเครื่องมือจะมี stirrer เพื่อช่วยทำให้ของเหลวภายใน chamber สม่ำเสมอ และเครื่องมือจะมีฉนวนหุ้ม เพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อม ใช้ thermocouple ในการวัดอุณหภูมิเพื่อนำมาหาค่าสภาพนำความร้อนคำนวณจากสมการ

$$k = (w_1 c_{p1} (T_{sf} - T_{so}) D) / A (T_3 - T_4) \Delta t \dots\dots\dots (10)$$

เนื่องจากในการทดลองจะมีความร้อนที่สูญเสียไปให้กับ stirrer และผนัง chamber และการทำงานของ stirrer ให้พลังงานออกมา สมการ(10) จึงดัดแปลงเป็น

$$k = \frac{(w_1 c_{p1} + w_b c_{pb} + w_t c_{pt}) (T_{sf} - T_{so} - T_t) D}{A (T_3 - T_4) \Delta t} \dots\dots\dots (11)$$

เมื่อ T_{sf} และ T_{so} เป็นอุณหภูมิของของเหลวใน chamber B ในเวลา t และเวลาเริ่มต้น ตามลำดับ
 T_3 เป็นอุณหภูมิของผิวตัวอย่างที่ติดกับ chamber A ในเวลา t
 T_4 เป็นอุณหภูมิของผิวตัวอย่างที่ติดกับ chamber B ในเวลา t



รูปที่ 2.7 การติดตั้งเครื่องมือในการวัดค่าสภาพนำความร้อนแบบ semi - steady state

วิธีนี้มีข้อจำกัดคือไม่เหมาะสำหรับการวัดค่าสภาพนำความร้อนของวัตถุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูงมาก และมีการสูญเสียความร้อนจากเครื่องมือ ซึ่งขัดแย้งกับสมมติฐานในการคำนวณ ทำให้ค่าที่คำนวณได้ผิดพลาด แต่วิธีนี้สามารถใช้กับวัตถุที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงเรขาคณิต เช่น เปลือกหอย (Tulshian และ Wheaton, 1986) และใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนในการคำนวณ ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้ คือ ปลาหมึก (Matuszek และคณะ, 1983)

2.1.2.3 Transient หรือ unsteady state method วิธีนี้ตัวอย่างอยู่ในภาวะไม่สมดุลและใช้เวลาในการทดลองเร็วมาก โดยวัตถุอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา วิธีที่ใช้หลักการนี้ในการวัดค่าสภาพนำความร้อนของอาหารทะเลมีเพียงวิธีเดียวคือ Probe method

Probe method เป็นวิธีที่พัฒนามาจาก line heat source method ที่นิยมใช้ในการวัดค่าสภาพนำความร้อน วิธีนี้ใช้ thermal conductivity probe ซึ่งมีลักษณะเป็นเข็มกลวงขนาดเล็ก โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อรัศมีมากกว่า 20 เพื่อลดปัญหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากขนาดของ probe ภายในมี heating wire เป็นแหล่งให้ความร้อน และ thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิ (รูปที่ 2.8) การวัดค่าสภาพนำความร้อนทำโดยเสียบ probe เข้าไปในตัวอย่างที่มีอุณหภูมิคงที่ จากนั้นให้ความร้อนแก่ heating wire

บันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างที่เปลี่ยนไปในเวลาสั้นๆ การใช้ thermal conductivity probe อาศัยหลักการที่ว่า ใช้แหล่งให้ความร้อนที่มีความยาวไม่จำกัด มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก (เข้าใกล้ศูนย์) และมีการให้ความร้อนที่มีปริมาณคงที่ในแนวรัศมีแก่ตัวอย่างขนาดใหญ่ซึ่งมีความสม่ำเสมอทั่วกันทั้งชิ้น ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปยังตัวอย่าง แสดงโดยสมการของฟูเรียร์ (Fourier equation) คือ

$$\partial T / \partial t = \alpha \left[\partial^2 T / \partial r^2 + (1/r)(\partial T / \partial r) \right] \dots\dots\dots(12)$$

จากสมการ (12) เมื่อมีแหล่งให้ความร้อนอยู่ภายในที่มีความยาวไม่จำกัด และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างคือ

$$T = (q' / 2rk) \int_{\beta}^{\infty} \left[\exp(-r^2) / r \right] dr \dots\dots\dots(13)$$

$$\beta = r / [2(\alpha t)]^{1/2} \dots\dots\dots(14)$$

$$\text{เมื่อ } q' = 3.414 I^2 R$$

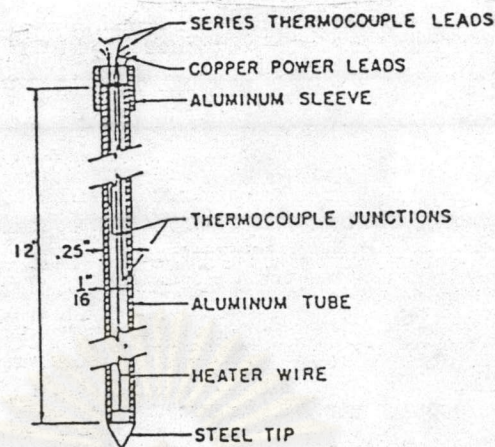
ถ้า T เป็นอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนที่มีปริมาณความร้อน q' และ β มีค่าน้อยกว่า 0.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากเวลา t₁ ไปยัง t₂ เป็น

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (q' / 4rk) \left[\ln(t_2 / t_1) \right]$$

ดังนั้น

$$k = [q' / 4r (T_2 - T_1)] \ln(t_2 / t_1) \dots\dots\dots(15)$$

เมื่อ T₁ และ T₂ คืออุณหภูมิที่เวลา t₁ และ t₂ ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของ thermal conductivity probe (Mohsenin, 1980)

ข้อจำกัดของ thermal conductivity probe คือไม่เหมาะสำหรับ non-viscous food เนื่องจากจะเกิดการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาขึ้นรอบๆ probe นอกจากนี้ยังไม่สามารถใช้กับตัวอย่างที่มีความบางมากเช่น หนั๋งสัตว์ ทั้งนี้เนื่องจากต้องมีตัวอย่างอยู่รอบ probe ในปริมาณที่มากพอ อย่างไรก็ตาม การใช้ probe ยังได้รับความนิยมเพราะใช้เวลาในการทดลองน้อย เหมาะกับอาหารที่มีความชื้นสูง หรืออาหารแช่แข็งและไม่มี การสูญเสียความร้อนขณะทำการทดลอง นอกจากนี้ยังเหมาะกับตัวอย่างที่อยู่ในสภาพธรรมชาติอีกด้วย กล่าวคือสามารถหาค่าสภาพนำความร้อนของผลไม้บนต้นได้ อีกทั้งยังใช้ได้กับตัวอย่างที่อยู่ในระหว่างการแปรรูป (Reidy และ Rippen, 1971)

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้ thermal conductivity probe ในการวัดค่าสภาพนำความร้อนได้แก่ salmon, sole, black bhitki, black pomphret, mackerel, red bhitki, singra, hilsa, surama, white pomphret, malli และ rohu (Kumbhar และคณะ, 1981) surimi (Wang และ Kolbe, 1991) ปลาหมึกกล้วย (Rahman และ Potluri, 1991) เป็นต้น

นอกจากนี้ค่าสภาพนำความร้อนยังสามารถหาได้จากสมการต่างๆ เช่น Thermal diffusion equation (Woodams และ Norvey, 1968; Kent และคณะ, 1984; Matuszek และคณะ, 1983; El-sahrigi และคณะ, 1981), Schwartzberg's equation (Succar และ Hayakawa, 1983), Maxwell-Eucken equation (Lentz, 1961) และ Levy's equation (Succar และ Hayakawa, 1983)

2.1.3 การวัดค่าสภาพแพร่ความร้อน

ค่าสภาพแพร่ความร้อน เป็นสมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวกับอัตราการแพร่ผ่านความร้อนเกิดจากการที่วัตถุดูดซับความร้อนเอาไว้ เป็นผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปซึ่งพบในสภาวะ unsteady state หรือ transient heat transfer (Mohsenin, 1980) โดยวัตถุที่มีค่าสภาพแพร่ความร้อนสูง จะมีอัตราการแพร่ผ่านของความร้อนได้เร็ว ในทางกลับกันถ้าวัตถุนั้นมีค่าสภาพแพร่ความร้อนต่ำ การแพร่ความร้อนก็จะต่ำหรือช้าไปด้วย เมื่อมีการให้ความร้อนหรือดึงความร้อนจากอาหาร การกระจายอุณหภูมิในวัตถุในสภาวะ unsteady state แสดงได้ด้วยสมการ

$$dT/dt = \alpha (d^2T / dx^2 + d^2T / dy^2 + d^2T / dz^2) \dots\dots(16)$$

เมื่อ T เป็น อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในแกน x, y, z

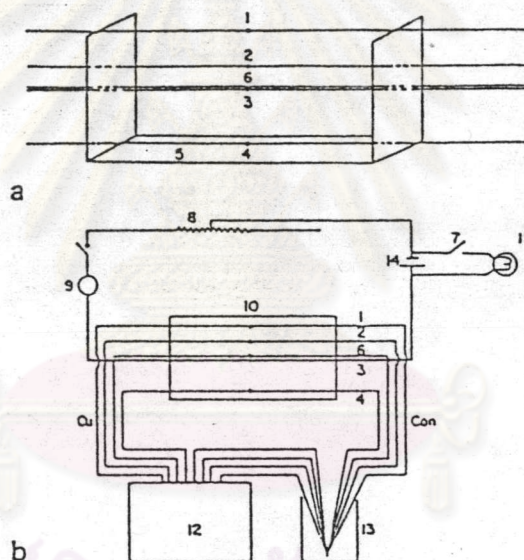
ค่าสภาพแพร่ความร้อนยังมีความสัมพันธ์ กับค่าสภาพนำความร้อน (k) ค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) และความหนาแน่น (ρ) ดังสมการ

$$\alpha = k / \rho C_p \dots\dots\dots(17)$$

นอกจากจะหาค่าสภาพแพร่ความร้อนจากสมการ (17) ยังสามารถวัดค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยตรงได้หลายวิธีดังนี้

2.1.3.1 Line heat source method

วิธีนี้ Kumbhar และคณะ (1981) ได้นำมาใช้วัดสมบัติทางความร้อนของปลา เครื่องมือที่ใช้วัดประกอบด้วย 36 gauge fine heater wire และ 30 gauge copper-constantan thermocouple จำนวน 4 เส้น ทั้งหมดนี้ถูกตรึงไว้ในกรอบของ aluminium plate ซึ่งเป็นที่ใส่ตัวอย่าง (รูปที่ 2.9) จากนั้นนำมาใส่ในกล่องพลาสติกที่ปิดมิดชิด และนำไปจุ่มในอ่างน้ำที่มีของเหลวอยู่ โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้จะควบคุมโดยใช้ rheostat



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งของ thermocouple และ heater ใน aluminium plate

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



thermocouple ตำแหน่งที่ 1 และ 4 วัดอุณหภูมิที่ผิวเพื่อทดสอบว่าความร้อนจาก heating wire ไม่ถึงผิว คือเป็นตัวตรวจสอบขนาดของตัวอย่างไม่ให้เล็กเกินไป ถ้าตัวอย่างมีขนาดเล็กไปมีผลทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่คำนวณได้ไม่ถูกต้อง ส่วนอุณหภูมิที่วัดจาก thermocouple ตำแหน่งที่ 2 จะใช้ในการคำนวณโดยใช้สมการ(18)

$$T = q/2rk \left[- Ce/2 - \ln p + \beta^2/2.1! - \beta^4/4.2! - \beta^6/6.3! \dots \right] \dots (18)$$

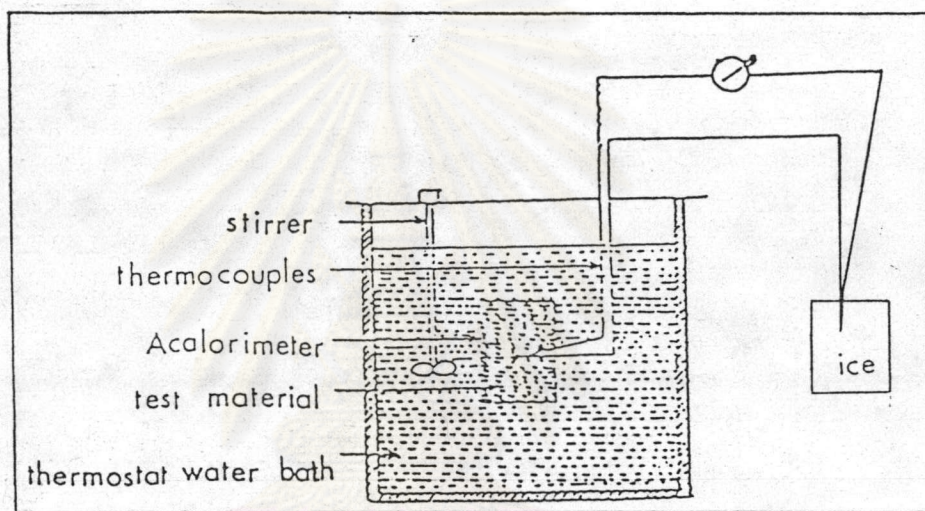
ค่า β ที่ได้นำมาคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนจากสมการ(14) ซึ่งระยะทางจาก probe ถึงขอบของตัวอย่าง(r) และ t สามารถหาได้จาก การทดลอง ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้ line heat source method วัดค่าสภาพแพร่ความร้อนคือปลา 12 พันธุ์ ได้แก่ salmon, sole, black pomphret, mackerel, red bhitki, singhara, hilsa, surama, white pomphret, malli, black bhitki และ rohu ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ การบรรจุตัวอย่างใน aluminium plate จะต้องแบ่งตัวอย่างอาหารออกแล้วประกบกัน โดยให้ thermocouple และ heating wires อยู่ระหว่างแผ่นเนื้อทั้งสอง ซึ่งจะต้องระวังไม่ให้มีอากาศเกิดขึ้น เพราะทำให้ผลการวัดคลาดเคลื่อน

2.1.3.2 Acalorimeter method

เครื่องมือประกอบด้วยกระป๋องทรงกระบอกซึ่งภายในมี thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิตรงไว้ที่กลางกระป๋อง การหาค่าสภาพแพร่ความร้อนทำโดยนำตัวอย่างใส่ในกระป๋อง นำไปทำให้ร้อนโดยใช้ในอ่างน้ำพร้อมเครื่องกวน (รูปที่ 2.10) บันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างที่เปลี่ยนไปกับเวลา และนำมาสร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (heat penetration curve) ดังรูปที่ 2.11 (Annamma และ Rao, 1974) และคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนจากสมการ(19) ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้หาค่าสภาพแพร่ความร้อน ได้แก่ปลา mackerel และปลา sardine (Annamma และ Rao, 1974)

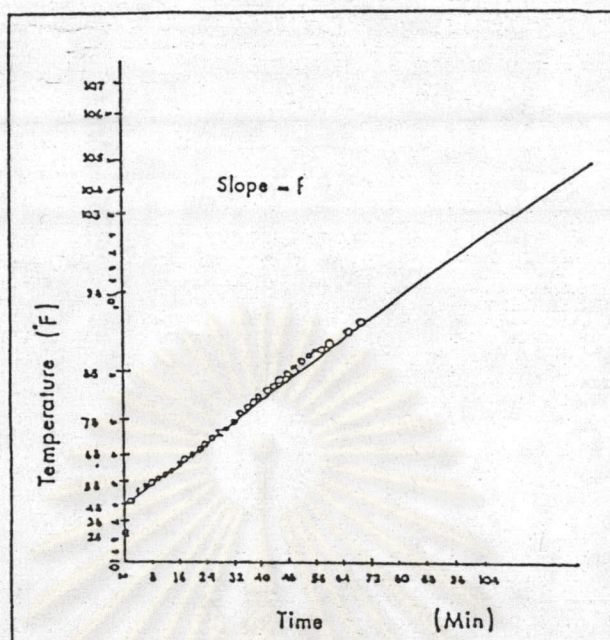
2.303

$$\alpha = \frac{2.303}{f[(2.405/r)^2 + (r/2l)^2]} \dots\dots\dots(19)$$



รูปที่ 2.10 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของตัวอย่าง โดยวิธี Acalorimeter

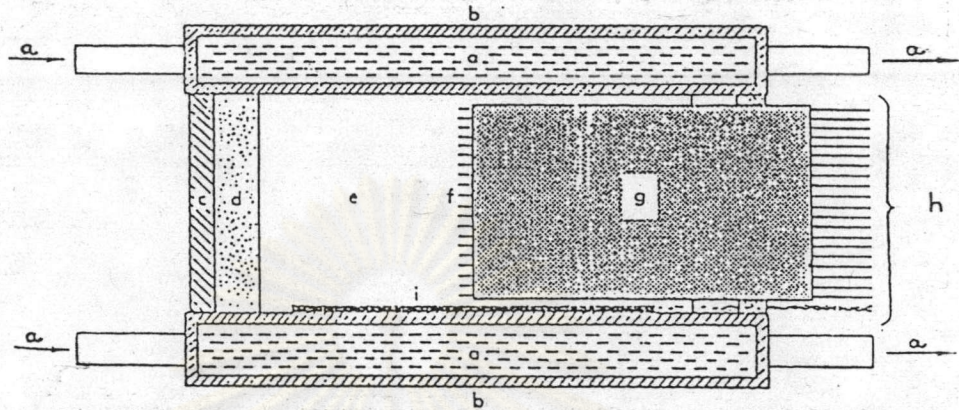
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของสภาพแพร่ความร้อน

2.1.3.3 การใช้ Temperature profiles

ตัวอย่างจะถูกบรรจุใน block ซึ่งด้านข้างทั้ง 4 ด้านจะฉาบด้วยโฟมยางที่ทำหน้าที่เป็นฉนวน ส่วนด้านบนและด้านล่างจะสัมผัสกับแผ่นโลหะแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งด้านหนึ่งจะเป็นส่วนให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง (thawing) และอีกด้านหนึ่งทำหน้าที่ดึงความร้อนออกจากตัวอย่าง (freezing) (รูปที่ 2.12) ดังนั้นการให้ความร้อนหรือความเย็นจะผ่านตัวอย่างในแนวแกน y เท่านั้น (one dimension heat flow) อุณหภูมิในตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ จะถูกวัดโดยใช้ probe ซึ่งประกอบด้วย thermocouple 20 เส้นที่เชื่อมติดอยู่กับแผ่นพลาสติกบางๆ ระยะระหว่างจุดที่วัดแต่ละจุดห่างกันประมาณ 2.54 mm และบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 60 วินาที (Kent และ คณะ, 1984)



รูปที่ 2.12 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อน โดยการวัด 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

หลักการของวิธีนี้คือ อนุกรมที่กระจายในตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลง
 ไม่คงที่ ค่าสภาพแพร่ความร้อนหาได้จากการวัดอนุกรมที่กระจายในตัวอย่างตำแหน่งต่าง ๆ ใน
 เวลาที่กำหนดและนำอนุกรมที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยใช้ analytical
 solution แบบ least square estimation (Singh, 1982) โดยใช้สมการ heat
 equation ดังนี้

$$\alpha_{(T_0)} = \frac{\partial T / \partial t}{\partial^2 T / \partial x^2} \quad \Bigg|_{x = x_0} \dots\dots\dots (20)$$

- เมื่อ
- x = ระยะทางที่ตั้งฉากกับ freezer - thawer plate
 - T_0 = อุณหภูมิต่ำสุดหรือสูงสุดของ Temperature profile
 - x_0 = ตำแหน่งที่อุณหภูมิ T_0

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ศึกษาค่าสภาพแพร่ความร้อนด้วยวิธีนี้ คือ

ปลาค็อด และ mackerel (Kent และคณะ, 1984) ซึ่งข้อจำกัดของการใช้ temperature profiles คือถ้าฉนวนป้องกันความร้อนรอบๆ ตัวอย่างไม่ดีจะมีการสูญเสียของความร้อนเกิดขึ้น ทำให้อัตราการ freezing ช้าลงและอัตราการ thawing เร็วขึ้น และ thermocouple จะต้องยึดแน่นกับแผ่นพลาสติกเพื่อให้เสียบ probe เข้าไปในตัวอย่างได้ตามตำแหน่งที่ต้องการ การสร้างเครื่องมือและการคำนวณด้วยวิธีนี้จะยุ่งยาก แต่มีข้อดีคือไม่ต้องควบคุมอัตราการให้ความร้อนและใช้ระยะเวลาในการทดลองสั้น การให้ความร้อนหรือดึงความร้อนออกจากตัวอย่างจะใกล้เคียงกับวิธีที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารมาก

2.1.3.4 Slab shape method

วิธีนี้เหมาะสำหรับอาหารที่มีเนื้อนุ่ม เช่น พวกลูกปลาและเนื้อต่างๆ (Kubota และคณะ, 1983) ซึ่งทำเป็นทรงกลมหรือรูปร่างอื่นได้ยาก เครื่องมือที่ใช้วัดประกอบด้วยกล่องที่ทำด้วยวัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูง เป็นส่วนที่ใช้ในการบรรจุตัวอย่าง ส่วนด้านที่ไม่ต้องการให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนจะหุ้มด้วยฉนวนหนา 50 มิลลิเมตร ทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่กำหนดไว้ด้วย thermocouple (รูปที่ 2.13) ใช้อ่างน้ำพร้อมเครื่องกวน 2 อ่างเป็นอุปกรณ์สำหรับรักษาอุณหภูมิตัวอย่างให้คงที่ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างตามลำดับ (รูปที่ 2.14) บันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปที่แต่ละจุดในตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆด้วยเครื่อง recorder แล้วนำค่าอุณหภูมิที่ได้ไปคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยมีเงื่อนไขที่ว่า การถ่ายโอนความร้อนเกิดเพียงทิศทางเดียว (one - dimensional heat flow) ไม่มีแหล่งกำเนิด

ความร้อนภายในวัตถุตามสมการ (21) และสภาพแพร่ความร้อนไม่ขึ้นกับตำแหน่งและอุณหภูมิ

$$\partial T / \partial t = \alpha [\partial^2 T / \partial x^2] \dots\dots\dots(21)$$

ในการคำนวณจะมีการกำหนด initial และ boundary condition

ดังนี้

initial condition

$$t = 0, \quad 0 < x < 2L \quad : \quad T = T_0$$

boundary condition

$$t \leq 0, \quad x = 0 \text{ และ } 2L \quad : \quad T = T_{\infty}$$

$$t \geq 0, \quad x = L \quad : \quad \partial T / \partial t = 0$$

$$t = \alpha, \quad 0 \leq x \leq 2L \quad : \quad T = T_{\infty}$$

เมื่อ L เป็น ครึ่งหนึ่งของความยาวของตัวอย่างด้านที่มีการถ่ายโอนความร้อน และ T_0 และ T_{∞} เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายตามลำดับ โดยตั้งสมมติฐานว่าการถ่ายโอนความร้อนบริเวณ film ที่ผิวน้อยมากจนถึงว่าไม่มีผลต่อการคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ การคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนใช้วิธี numerical calculation โดยใช้หลักการของ finite difference แบบ explicit method ที่ต้องใช้ $M \geq 2$ โดยการประมาณค่าสภาพแพร่ความร้อนเพื่อหาค่า dimensionless number, M จากสมการ (22) จากนั้นนำไปคำนวณค่า dimensionless temperature ratio, Y (Kubota และคณะ, 1983) จากสมการ(23)

$$M = (\Delta x^2 / (\alpha \Delta t)) \dots\dots\dots(22)$$

$$Y_{i,j+1} = Y_{i,j} + (Y_{i-1,j} - 2Y_{i,j} + Y_{i+1,j}) / M \dots\dots\dots(23)$$

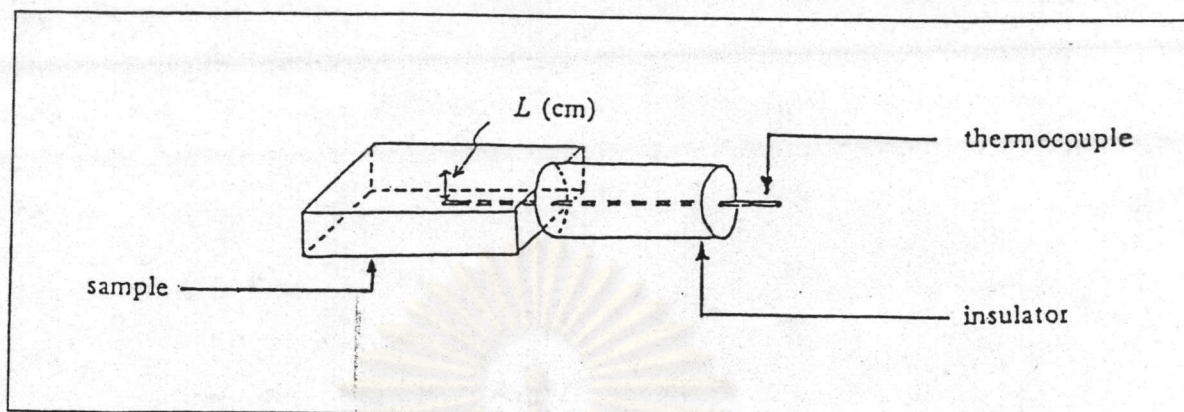
- เมื่อ
- i เป็นตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิ
 - j เป็นเวลาที่กำหนดในการวัดอุณหภูมิ
 - Δx เป็นระยะห่างระหว่างจุดที่ใช้วัดอุณหภูมิ
 - Δt เป็นระยะเวลาในการวัด

นำอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองมาคำนวณค่า dimensionless temperature ratio, Y จากสมการ

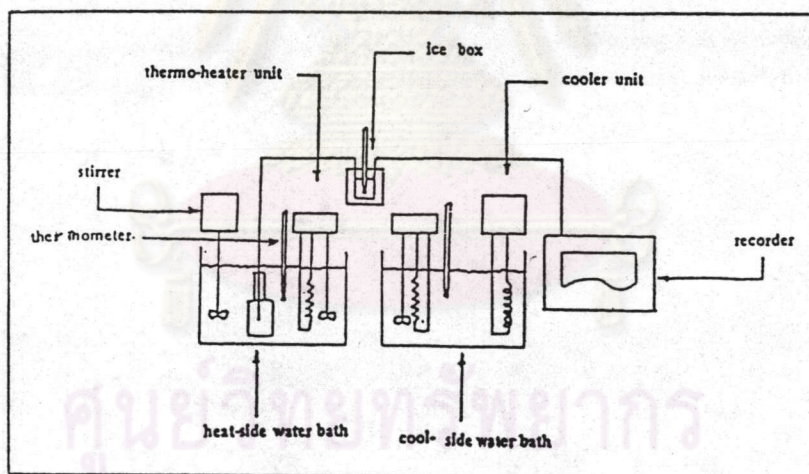
$$Y = (T - T_{\infty}) / (T_0 - T_{\infty}) \dots\dots\dots(24)$$

Kubota และคณะ(1983) และ Albin และคณะ(1979) พบว่าจำนวนจุดที่ใช้วัดอุณหภูมิในตัวอย่างที่ควรใช้คือ 5 จุดในตัวอย่างขนาด 6-22 เซนติเมตร และ Chang และคณะ(1990)สรุปไว้ว่า Δt ควรมีค่าประมาณ 6.5-8 วินาที เพื่อให้มีความผิดพลาดในการคำนวณน้อยที่สุด การคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนทำโดยคำนวณความแตกต่างระหว่าง dimensionless temperature ratio จากการทดลองและการคำนวณในรูปของ standard deviation(๑) หากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ประมาณไว้กับ standard deviation ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนของตัวอย่างคือ ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ทำให้เกิด standard deviation ต่ำสุดซึ่งหาโดยวิธี differential หรือทำการสร้างกราฟระหว่างค่า Y ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

ข้อจำกัดของวิธี slab shape คือ infinite slab plate ในทางทฤษฎีจะต้องมีความยาวไม่จำกัด ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปได้ ดังนั้น slab plate จะต้องมียัตราส่วนความยาวต่อความหนามากกว่า 3 ขึ้นไป และ infinite slab model ต้องมีความหนาตั้งแต่ 2 เซนติเมตรขึ้นไป เพราะถ้าบางกว่านี้จะเกิดปัญหาในการสอด thermocouple probe เข้าไปยังศูนย์กลางของตัวอย่างอาหาร (Kubota และคณะ 1983) ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าสภาพแพร่ความร้อนคือ กุ้ง (Albin และคณะ, 1979)



รูปที่ 2.13 ตัวอย่าง slab ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.14 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยวิธี slab shape

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเลได้แก่ ปัจจัยจากธรรมชาติของอาหาร คือ องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร, โครงสร้างของเนื้อเยื่อ, ความหนาแน่น และปัจจัยภายนอก คือ อุณหภูมิ ผลจากการละลาย (thawing) อัตราการแช่แข็งและอัตราส่วนที่น้ำเป็นน้ำแข็ง (Mohsenin, 1980) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ปัจจัยจากธรรมชาติของอาหาร

2.2.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของอาหารได้แก่ ความชื้น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เส้นใย และเถ้า

ก. ความชื้น

น้ำมีค่าสมบัติทางความร้อนสูง กล่าวคือ น้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสจะมีค่าความร้อนจำเพาะ 0.999 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส มีค่าสภาพนำความร้อน 0.579 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน และมีค่าสภาพแพร่ความร้อน 1.43×10^{-7} เมตร² ต่อวินาที ดังนั้นอาหารที่มีความชื้นสูงจึงมีสมบัติทางความร้อนสูงด้วย (Mohsenin, 1980; Bennet และ Myers, 1983; Nesvadba และ Eunson, 1984) การทำนายค่าสมบัติทางความร้อนจากปริมาณความชื้นในช่วงเหนือจุดเยือกแข็งพบว่ามีความผิดพลาดประมาณร้อยละ 10 โดยมีความชื้นในอาหารมากกว่าร้อยละ 50 และมีการผิดพลาดมากขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นน้อยกว่า 50% นอกจากนี้ยังพบว่าอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะมีความสัมพันธ์ของค่าสมบัติทางความร้อนกับปริมาณความชื้นน้อยกว่าช่วงอุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็ง (Lamb, 1976) โดยที่ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับสมบัติทางความร้อนของอาหารแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนของอาหารบางชนิด
กับความชื้น

ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (ร้อยละ)	สมการ	เอกสารอ้างอิง
อาหาร	above freezing		$c_p = 0.008W + 0.2$	Mohsenin, 1980
	below freezing		$c_p = 0.003W + 0.2$	
ปลาเค็ม	10	30-90	$\alpha = 0.70 + 0.00683W$	Nesvadba และ
(สด)	25	30-90	$\alpha = 1.01 + 0.00385W$	Eunson, 1984
	-40	30-90	$\alpha = -0.475 + 0.0173W$	
	-10	30-90	$\alpha = -1.341 + 0.0228W$	
ปลา			$k = 0.0324 + 0.3294W$	Lamb, 1976

ข. องค์ประกอบอื่นๆ

องค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล โดยผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดจะมีความสัมพันธ์ระหว่างโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต กับค่าสมบัติทางความร้อนแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.4



ตารางที่ 2.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเลบางชนิดกับไขมัน โปรตีน

ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ (°c)	ความชื้น	สมการ	เอกสารอ้างอิง
mackerel Sardine Bolti	-10 ถึง 10	60-90	$C_p = w+0.5F^*+0.36P^*$	El-Sahrigi และคณะ, 1981
Cod	0 ถึง 25	50-90	$k=0.83w+9.709 \times 10^{-3}P$	Hill และคณะ, 1967
Salmon	0 ถึง 25	50-90	$k=0.73w+4.926 \times 10^{-3}P$	

* F = สัดส่วนของไขมันในตัวอย่าง

P = สัดส่วนของโปรตีนในตัวอย่าง

2.2.1.2 โครงสร้างของเนื้อเยื่อ

โครงสร้างของเนื้อเยื่อ ทิศทางการเรียงตัวของเนื้อเยื่อ ความพรุน และลักษณะภายในเนื้อเยื่อ จะมีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล มีผู้ศึกษาพัฒนาสมการ โดยอาศัยข้อมูลของวัสดุที่ประกอบด้วยน้ำ โปรตีนและไขมัน กับค่าสภาพนำความร้อนในทิศทางขนานกับเนื้อเยื่อ ($k_{||}$) ดังต่อไปนี้ (Baghe-Khandan และคณะ, 1981, อ้างถึง Poppendick และคณะ, 1966)

$$k_{||} = \rho \sum_{n=1}^3 \frac{k_t W_t}{\rho_t} \dots \dots \dots (25)$$

ส่วนสมการที่ใช้กับอาหารที่ประกอบด้วยน้ำ โปรตีนและไขมันกับค่าสภาพนำความร้อนในทิศทางตั้งฉาก (k_{\perp}) คือ

$$k_{\perp} = \frac{1}{3 \dots \dots \dots (26)}$$

$$p = \sum_{n=1} \frac{W_n}{k_n p_n}$$

สำหรับความพรุนจะมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนเนื่องจากภายในรูพรุนจะมีอากาศและไอน้ำอยู่ภายในซึ่งจะมีผลต่อการถ่ายโอนของความร้อน (Nesvadba และ Eunson, 1984)

2.2.1.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของวัตถุมิผลต่อการถ่ายโอนความร้อนซึ่งมีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อน คือถ้าวัตถุมิความหนาแน่นสูงขึ้นทำให้ค่าสภาพนำความร้อนสูงขึ้น ค่าสภาพแพร่ความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะต่ำลง (Mohsenin, 1980)

2.2.2 ปัจจัยภายนอก

ปัจจัยภายนอกที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ ผลจากการละลาย (thawing) อัตราการแช่แข็งและอัตราส่วนที่น้ำเป็นน้ำแข็ง

2.2.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมิผลต่อสมบัติทางความร้อนอาหารทะเลดังนี้

ก. ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเยือกแข็งของอาหาร ค่าความร้อนจำเพาะลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ค่าความร้อนจำเพาะจะหาค่าไม่ได้ (Mohsenin, 1980) ส่วนค่าสภาพนำความร้อนก็มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าสภาพนำความร้อนของน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในอาหารและค่าสภาพแพร่ความร้อนจะเพิ่มขึ้นลักษณะคล้ายเส้นตรงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Kumbhar และ คณะ, 1981)

ข. ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง พบว่าค่าความร้อนจำเพาะจะเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Mohsenin, 1980) ส่วนค่าสภาพนำความร้อนก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง (Polley และคณะ, 1980) และค่าสภาพแพร่ความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอุณหภูมิซึ่งความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรงแต่มักพบเป็นแบบพาราโบลา (Kumbhar และคณะ, 1980)

ส่วนในช่วงอุณหภูมิเริ่มแรกของการแข็งตัว (initial freezing temperature) ที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ (phase change) จะมีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อนมาก พบว่าค่าความร้อนจำเพาะจะมีค่ามากจนหาค่าไม่ได้ และค่าสภาพนำความร้อนก็จะมีค่ามากเช่นกัน ส่วนค่าสภาพแพร่ความร้อนจะมีค่าต่ำสุด (Matuszek และคณะ, 1983)

2.2.2.2 ผลจากการละลาย (thawing)

เมื่อนำอาหารไปทำการแช่แข็งพบว่า ถ้าเป็นการแช่แข็งแบบช้า ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่จนทำลายผนังเซลล์ได้ ดังนั้นเมื่อนำมาทำการละลายจึงทำให้น้ำบางส่วนออกมาจากโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่ถูกทำลาย ทำให้มีน้ำในอาหารน้อยลง (Fennema, 1973) มีผลให้ค่าสภาพนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะต่ำลง (Mohsenin, 1980)

2.2.2.3 อัตราการแช่แข็ง (freezing rate)

อัตราการแช่แข็ง จะมีผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งและผลึกของตัวถูกละลายในอาหารซึ่งทำให้ค่าสภาพนำความร้อนและค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าต่างกัน (Mohsenin, 1980)

2.2.2.4 อัตราส่วนที่น้ำเป็นน้ำแข็ง

อัตราส่วนที่น้ำเป็นน้ำแข็งจะวัดในรูปของร้อยละของน้ำที่ยังไม่เป็นน้ำแข็ง (% unfrozen water) ซึ่งค่าสมบัติทางความร้อนของน้ำและน้ำแข็งมีค่าแตกต่างกัน จึงมีผลให้ค่าสมบัติทางความร้อนของอาหารแตกต่างกัน (Mohsenin, 1980) นอกจากนี้ในระหว่างการแช่แข็งนั้นตัวถูกละลายในอาหารได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เกลือแร่ มีการตกผลึกออกมาเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงซึ่งน้ำและตัวถูกละลายมีการตกผลึกมากที่สุดในช่วงอุณหภูมิยูเทคติก (eutectic point) ดังนั้นเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงจนถึงอุณหภูมิยูเทคติกจึงทำให้มีผลึกของน้ำและตัวถูกละลายเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งส่งผลต่อค่าสมบัติทางความร้อนของอาหารด้วย

2.3 ปลาทูหมึก

ปลาทูหมึกเป็นสิ่งมีชีวิตที่จัดอยู่ในพวกเดียวกับหอย คือ phylum Mollusca อยู่ใน class Cephalopoda มีชื่อสามัญว่า cuttle fish, squid, octopus และชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Sepia sp.*, *Loligo sp.*, *Octopus sp.* (พาณิชย์, 2534)

2.3.1 ลักษณะโครงสร้างของปลาทูหมึก

ลักษณะโครงสร้างของเนื้อปลาทูหมึก (รูปที่ 2.15) ประกอบด้วยเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ (muscle tissue) และเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue)

2.3.1.1 เนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ (muscle tissue) มีประมาณร้อยละ 90 ของเนื้อเยื่อทั้งหมด ซึ่งเป็นชั้นของกล้ามเนื้อที่เรียงตัวอยู่ระหว่างเปลือก (tunic) ของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) ซึ่งเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อประกอบด้วย เส้นใยกล้ามเนื้อ (muscle fiber) 2 กลุ่มเรียงตัวไขว้กัน คือ

ก. เส้นใยกล้ามเนื้อตามแนวเส้นรอบวง (circumferential muscle fiber) มีลักษณะเป็นกล้ามเนื้อรูปวงแหวนซ้อนกัน

ข. เส้นใยตามแนวรัศมี (radial fiber) มีทิศทางตั้งฉากกับเปลือกทั้งสองของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน

เส้นใยกล้ามเนื้อทั้งสองกลุ่มมีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.5 ± 2.5 ไมโครเมตร จากการเรียงตัวของเส้นใยกล้ามเนื้อในลักษณะดังกล่าวจึงเป็นการง่ายที่จะฉีกเนื้อปลาทูหมึกออกเป็นแผ่นๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกล้ามเนื้อปลาทูหมึกที่แตกต่างไปจากลักษณะกล้ามเนื้อของสัตว์โดยทั่วไป

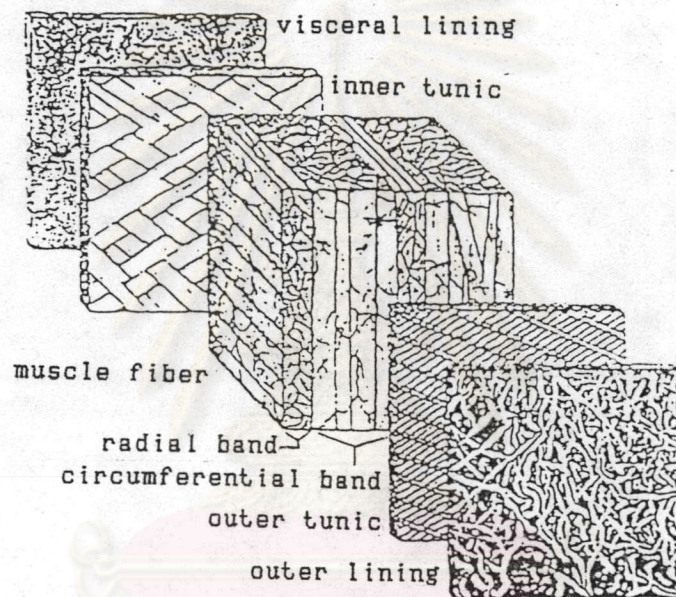
2.3.1.2 เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

ก. เปลือกชั้นนอก (outer tunic) ประกอบด้วย เส้นใยซึ่งมีแบบของการเรียงตัวที่เฉพาะ

ข. เปลือกชั้นใน (inner tunic) ประกอบด้วย เส้นใยที่เรียงตัวกันอย่างไม่มีระเบียบ

ขนาดเส้นใยของเนื้อเยื่อเกี่ยวพันจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.10 ไมโครเมตร และขนาดรูปร่างจะแตกต่างกันไปบ้างในแต่ละกลุ่มของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน ที่

ผิวของเปลือกชั้นนอกและชั้นใน จะมีเนื้อเยื่อบางๆอยู่ คือ ผนังชั้นนอก(outer lining) ปกคลุมเปลือกชั้นนอกมีลักษณะเป็นเส้นใยที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และผนังชั้นใน(inner lining) ปกคลุมเปลือกชั้นใน มีลักษณะเป็นหนังบางๆซึ่งไม่มีลักษณะเป็นเส้นใย ซึ่งโครงสร้างของปลาหมึกแต่ละพันธุ์นั้นจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยจะต่างกันที่สัดส่วนของเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน ขนาดของเส้นใยและขนาดรูปร่างของเนื้อเยื่อ



รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของปลาหมึก

2.3.2 ลักษณะของปลาหมึก

ปลาหมึกที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการแช่แข็งคือ ปลาหมึกกล้วยและปลาหมึก

กระดอง

2.3.2.1 ปลาหมึกกล้วย

ปลาหมึกกล้วยหรือที่เรียกชื่ออื่นๆว่า หมึกหอม หมึกกะตอย หมึกตะเภา หมึกจีนและหมึกเข็ม (ทศพร, 2528) จัดอยู่ใน family Loligonidae ปลาหมึกกล้วยที่ใช้ในการทดลองมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Loligo formosana* ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมนำมาแช่แข็ง ลักษณะทั่วไปคือ ตัวเรียวยาว มีหนวดสีเส้น มีครีบอยู่สองข้างท้ายสุดของลำตัว ลำตัวยาว 20-35 เซนติเมตร และมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกล้วยในส่วนที่กินได้ 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	82.00
คาร์โบไฮเดรต	0.70
เส้นใย	0.00
โปรตีน	15.30
เถ้า	1.20
ไขมัน	0.80

ที่มา: ตารางคุณค่าอาหารในส่วนที่กินได้ 100 กรัม กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (สาธารณสุข, 2527)

2.3.2.2 ปลาหมึกกระดอง

ปลาหมึกกระดองหรือที่อาจเรียกว่า ปลาหมึกสน, หมึกญี่ปุ่น

(ทศพร, 2528) จัดอยู่ใน family Sepiidae ปลาหมึกกระดองที่ใช้ในการทดลองเป็นปลาหมึกกระดองที่มีชื่อสามัญว่า shortclub cuttle fish และชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Sepia pharaonis* เป็นพันธุ์ที่นิยมนำมาแช่แข็ง ลักษณะทั่วไปคือ ลำตัวแบน รูปไข่ มีหนวด 10 เส้น ครีบอกอยู่ข้างๆ ทางด้านล่างของลำตัว หัวแบนกว้าง หนังกาบรูปโค้ง กุ้งหมึกมีขนาดใหญ่ กระดองภายในเป็นแผ่นแบนหนากว้างและเป็นสารประกอบของแคลเซียมมีลักษณะคล้ายชอล์ค ลำตัวยาว 10-35 เซนติเมตร และมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.6


ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกระดองในส่วนที่กินได้ 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	81.00
คาร์โบไฮเดรต	1.00
เส้นใย	0.00
โปรตีน	16.00
เถ้า	1.00
ไขมัน	0.90

ที่มา: ตารางคุณค่าอาหารในส่วนที่กินได้ 100 กรัม กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (สาธารณสุข, 2527)

2.4 สมบัติทางความร้อนของปลาหมึก

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึก (ตารางที่ 2.7) พบว่ามีการศึกษาถึงค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกน้อยมาก โดยศึกษาเพียงค่าความร้อนจำเพาะในช่วงแช่แข็งและค่าสภาพนำความร้อนในช่วงเหนือจุดเยือกแข็ง แต่ยังไม่มีการศึกษาค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึก ดังนั้น ข้อมูลของค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกยังไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังไม่มีการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ พันธุ์ ภาวะการละลาย ทิศทางการเรียงตัวของเนื้อเยื่อ อัตราการแช่แข็ง และปัจจัยอื่นๆ ต่อค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิกับค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกในช่วงแช่แข็ง เพื่อให้มีข้อมูลเพื่อใช้ประโยชน์ได้ต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 สมการหรือค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึก

อาหาร	อุณหภูมิ °C	ความร้อนจำเพาะ cal/g °C	สภาพนำความร้อน W/m°C	สภาพแพร่ความร้อน m ² /h	เอกสารอ้างอิง
squid mince	30ถึง57		$k=3.29 \times 10^{-6}$ $-4.29 \times 10^{-9} T$ $-2.86 \times 10^{-11} T^2$		Matuszek และ คณะ, 1983
squid fillet	-10 -18	1.43 0.60			Reverzev , 1987
80.3%mc squid fillet	-30	0.50			Rahman , 1991
82.6%mc dry	30		0.49		
80.9%mc	30		0.52		
79.6%mc			0.49		
79.4%mc			0.48		
79.1%mc			0.50		
78.2%mc			0.49		
75.5%mc			0.51		
58.1%mc			0.32		
14.4%mc			0.13		