บทที่ 4

การทดลอง

4.1 การเตรียมตัวอย่าง

วัตถุดิบที่ใช้ คือ ปลาหมึกกระดอง *(Sepia sp.)* ซึ่งซื้อจากตลาดสะพานปลา กรุงเทพมหานคร หลักเกณฑ์ในการคัดเลือกวัตถุดิบ คือ โดยเลือกปลาหมึกที่มีขนาดสม่ำเสมอกัน มีความหนา 1.0 -1.6 cm นำปลาหมึกมาแกะกระดอง ลอกหนัง เอาครีบ หัว เครื่องในและถุงหมึกออก ล้างให้สะอาดด้วยน้ำ ตัดแต่ง เพื่อนำส่วนลำตัวมาใช้ศึกษาต่อไป

4.2 การวัดค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกกระดอง

สมบัติทางกายภาพของปลาหมึกกระดองที่ศึกษา ได้แก่ ความชื้น จุดเยือกแข็ง และความหนาแน่น และสมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ ซึ่งการวัดค่าความหนาแน่น ค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ ทดลองในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งปลาหมึกกระดอง (อุณหภูมิ 1±1°C, 10±1°C, 20±1°C และ 30±1°C) และช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งปลาหมึกกระดอง (อุณหภูมิ -5±1°C, -10±1°C, -20±1°C และ -30±1°C) โดยวางแผนการทดลองแต่ละช่วงอุณหภูมิ แบบ Completely Randomized Design ทดลอง 4 ซ้ำ สำหรับการหาความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ และทดลอง 9 ซ้ำ สำหรับการวัดหาค่าสภาพนำความร้อน

4.2.1 ความชื้น

วิเคราะห์ความชื้นของปลาหมึกกระดองตามวิธี AOAC14.004 (1984)

4.2.2 จุดเยือกแข็ง

จุดเยือกแข็งของปลาหมึกกระดองหาโดยวิธี freezing curve (Rahman และ Driscoll, 1994b) โดยนำตัวอย่างปลาหมึกกระดองขนาด 10X10X(1.2-1.6) cm ไปแช่เยือกแข็งใน airblast freezer โดยใช้ความเร็วลมเย็น 1-2 m/s วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางโดยใช้ thermocouple type T ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.076 mm ต่อเข้าเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (CHINO DR015) บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทุก 30 s ค่าจุดเยือกแข็งพิจารณา

ตามนิยามของ equilibrium freezing point โดยพิจารณาตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช้าที่สุด

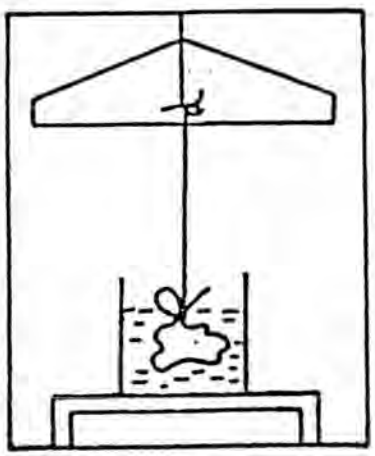
4.2.3 ความหนาแน่น

วัดความหนาแน่น ตามนิยามความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) โดยความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง ใช้วิธี buoyant force (Rahman และ Driscoll, 1994a) ซึ่งทำโดยตัดชิ้นปลาหมึกกระดองให้ได้น้ำหนัก 50±5 g ใส่ในถุงพลาสติก นำไปแช่เย็นและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างในอากาศ และแรงลอยตัวในน้ำซึ่งวัดน้ำหนักของตัวอย่างที่จุ่มอยู่ในน้ำ แต่ไม่จมน้ำ (รูปที่ 4.1) คำนวณหาความหนาแน่น (สมการ 4.1)

$$\rho_{ap} = \rho_L \, W/G \qquad (4.1)$$

เมื่อ ρ_{ap} , ρ_L คือ ความหนาแน่นของตัวอย่างและน้ำ (kg/m^3)

W, G คือ น้ำหนักของตัวอย่างและแรงลอยตัวในน้ำ (kg)



รูปที่ 4.1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดแรงลอยตัวในน้ำของตัวอย่าง

สำหรับในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ใช้วิธีชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ทราบปริมาตร (Keppeler และ Boose, 1970) โดยสับตัวอย่างให้ละเอียดอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ นำไปใส่ใน aluminium cylinder ที่ทราบปริมาตร แล้วแช่เยือกแข็งใน airblast freezer อุณหภูมิลมเย็น -30±2°C ให้ได้อุณหภูมิของตัวอย่างที่ตำแหน่งกึ่งกลางตามต้องการ ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ตัดส่วนของตัวอย่างที่เกินขอบ aluminium cylinder ชั่งน้ำหนักตัวอย่างและคำนวณความหนาแน่นดังสมการ 4.2

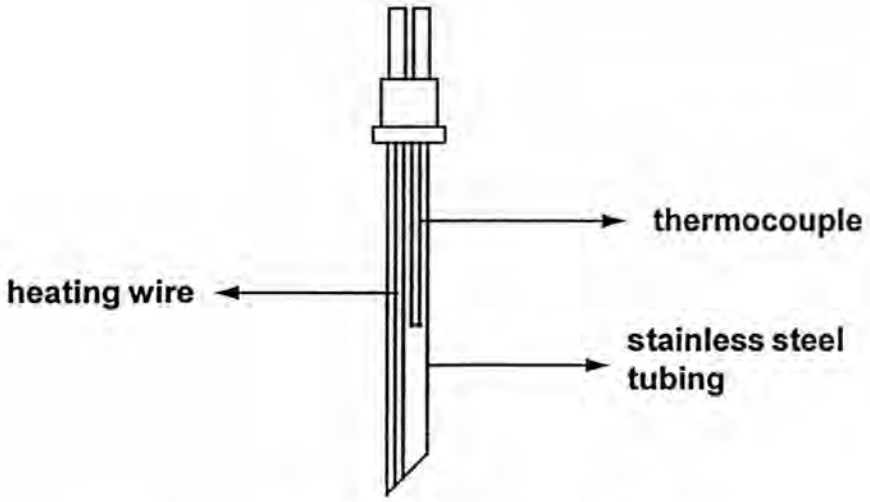
$$\rho_{ap} = W/V \qquad (4.2)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (kg)

V คือ ปริมาตรของตัวอย่าง (m^3)

4.2.4 ค่าสภาพนำความร้อน

เลือกใช้วิธี unsteady state โดยใช้ heated probe เนื่องจากมีความสะดวก ใช้เวลาในการทดลองสั้น สามารถใช้กับอาหารที่มีขนาดเล็กและมีความชื้นสูง โดย heated probe ที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 4.2 ประกอบด้วย stainless steel tube ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.8 mm. ความยาว 52 mm ภายใน tube จะมี heating wire ที่มี resin เคลือบ มีความยาว 104 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.076 mm และเทอร์โมคัปเปิล type T (copper และ constantan) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.076 mm สำหรับ heating wire จะใช้ constantan เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของ heated probe ที่ประกอบขึ้น

การวัดค่าสภาพนำความร้อน ใช้ตัวอย่างปลาหมึกกระดองที่มีขนาดชิ้น 50X80X10 mm จำนวณ 3 ชิ้น ใส่ใน sample holder ขนาด 50X80X30 mm เสียบ probe เข้าตรงตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างต่อสาย thermocouple เข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (YOGOKAWA, LR4210) นำไปแช่เย็น หรือแช่เยือกแข็งให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างในอ่างควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ต่อสาย heating wire เข้ากับ DC-power supply (ขนาด 0-30 volt) ที่ปรับระดับความต่างศักย์และกระแสแล้ว (รูปที่ 4.3) ทำการ

ทดลองตามขั้นตอนดังนี้

ก. เปิดสวิสต์ DC-power supply เพื่อจ่ายไฟเข้าสู่ probe

ข. วัดอุณหภูมิของตัวอย่างที่เปลี่ยนไปทุก 3 วินาที เป็นเวลา 2 นาที

ค. วัดความต่างศักย์และกระแสที่จ่ายให้กับ probe ด้วย multimeter และคำนวณหาค่า k ตามสมการ 4.3

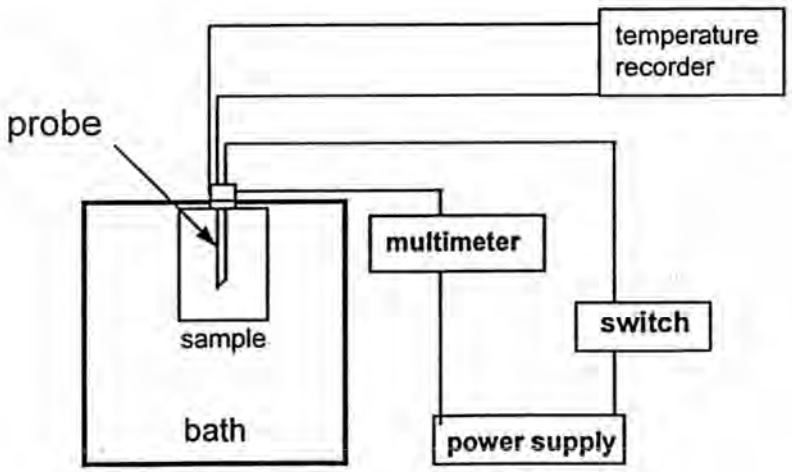
$$k = q \ln (t_2/t_1)/ (4 \pi \Delta T) \qquad (4.3)$$

เมื่อ k คือ ค่าสภาพนำความร้อน (W/m.K)

q คือ ความร้อนที่ probe ได้รับ (W/m)

t คือ เวลา (s)

ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิสุดท้ายกับอุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}$C)



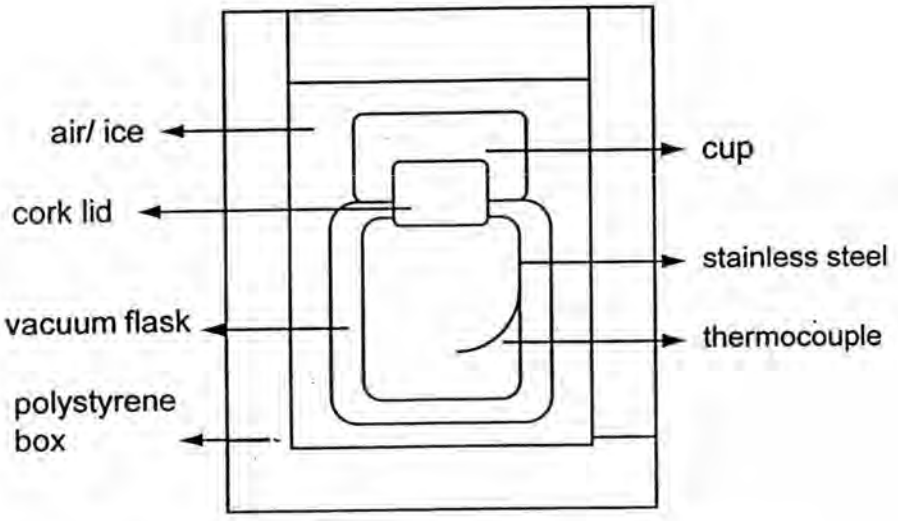
รูปที่ 4.3 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดค่าสภาพนำความร้อน

ก่อนทำการทดลองหาค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองทุกครั้งจะต้อง calibrate probe ด้วย 0.4% agar ที่อุณหภูมิ 30±2°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.633 W/m.K ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนของ 0.4%agar ที่ได้จากการวัดจะมีความแตกต่างจากค่าที่รายงานไว้ได้ไม่เกิน ±4% (Sweat, Haugh และ Stadelman, 1973; Sweat และ Haugh, 1974) เพื่อมั่นใจได้ว่า probe ที่ประกอบขึ้นมีความแม่นยำในการวัดค่าสภาพนำความร้อน

4.2.5 ค่าความร้อนจำเพาะ

ในการทดลองนี้ใช้วิธี modified method of mixture ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เครื่องมือที่ใช้คือ แคลอริมิเตอร์ (รูปที่ 3.3) ซึ่งประกอบด้วย vacuum flask ที่มีปริมาตรบรรจุ 600 cc ผิวด้านในและด้านนอกทำด้วย stainless steel ระหว่างผิวทั้งสองจะมีฉนวนภายในป้องกันการสูญเสียหรือได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อม ส่วนของปาก flask จะปิดด้วย cork หนา 4 cm และฝาพลาสติกเกลียว โดยในการวัดความร้อนจำเพาะของตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (0° ถึง 30°C) จะนำ vacuum flask บรรจุในกล่องโฟมที่มีความหนา 5 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจากระบบให้กับสิ่งแวดล้อม และใช้น้ำเป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อน แต่สำหรับการวัดความร้อนจำเพาะของตัวอย่างที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-10° ถึง -30°C) จะนำ vacuum flask บรรจุในกระติกปริมาตรบรรจุ 10 L มีน้ำแข็งบรรจุขณะทดลองเพื่อป้องกันการได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อม และใช้ trichloroethylene (TCE) ที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะเป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิของสารแลกเปลี่ยนความร้อนและตัวอย่างจะวัดโดยใช้ thermocouple type T ต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (YOGOKAWA, LR4210)

การคำนวณหาความร้อนจำเพาะของตัวอย่างใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน โดยปริมาณความร้อนของระบบที่ภาวะเริ่มต้นเท่ากับปริมาณความร้อนของระบบที่ภาวะสุดท้าย บวกความร้อนที่ระบบสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม(heat loss) หรือลบความร้อนที่ระบบได้รับจากสิ่งแวดล้อม (heat gain)



รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางแคลอริมิเตอร์สำหรับวัดค่าความร้อนจำเพาะ

การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ชิ้นปลาหมึกกระดองที่มีน้ำหนัก 100±10 g ใส่ในถุง HDPE แช่เย็นหรือแช่เยือกแข็งใน airblast freezer ให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างให้คงที่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

การหาความจุความร้อน(H_k) ของแคลอริมิเตอร์

ในการวัดค่าความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดความร้อนจำเพาะของตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง จะใช้น้ำเป็นสารอ้างอิง (ความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 1 cal/g.°C) ซึ่งทดลองดังนี้

ก. ใส่น้ำ 300±10 กรัม ในแคลอริมิเตอร์ ทิ้งให้อุณหภูมิของน้ำและแคลอริมิเตอร์คงที่ที่อุณหภูมิห้อง

ข. ใส่น้ำ 100±10 กรัม ในถุง HDPE ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ประมาณ 65°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

ค. บันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำในแคลอริมิเตอร์ และอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำในถุง

ง. นำถุงที่บรรจุน้ำใส่ลงในแคลอริมิเตอร์อย่างรวดเร็วและปิดฝาทันที เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำในแคลอริมิเตอร์

จ. บันทึกอุณหภูมิของน้ำในแคลอริมิเตอร์ และน้ำในถุงทุก 1 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เขย่าแคลอริมิเตอร์อย่าสม่ำเสมอโดยใช้เครื่องเขย่า

ฉ. คำนวณหาความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ โดยใช้สมการหลักการอนุรักษ์พลังงาน

$$C_{pL}W_L(T_{iL}-T_{eL})+H_k(T_{ik}-Te_k) = C_{ps}W_s(T_{es}-T_{is}) - R^* \quad (4.4)$$

เมื่อ R^* คือ heat loss หรือ heat gain คำนวณได้จาก $(C_{pL}W_L+H_k+C_{ps}W_s) \times (dT/dt) \times te$

C_{ps} , C_{pL} คือ ความร้อนจำเพาะของตัวอย่างและสารตัวกลาง (cal/g.°C)

W_s, W_L คือ น้ำหนักของของตัวอย่างและสารตัวกลาง (g)

H_k คือ ความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ (cal/°C)

T_{is}, T_{iL}, T_{ik} คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่าง สารตัวกลาง และแคลอริมิเตอร์ (°C)

T_{es}, T_{eL}, T_{ek} คือ อุณหภูมิ equilibrium ของตัวอย่าง สารตัวกลางและแคลอริมิเตอร์ (°C)

T_a คือ (dT/dt) x te (°C) (พิจารณาเครื่องหมาย)

t คือ เวลา (min)

ดังนั้น

$$H_k = \frac{C_{ps}W_s(T_{es}-T_{is}-T_a) - C_{pL}W_L(T_{iL}-T_{eL}+T_a)}{(T_{ik}-T_{ek}+T_a)} \qquad (4.5)$$

ส่วนแคลอริมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดความร้อนจำเพาะของตัวอย่างอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง นำไปหาความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์โดยทดลองเช่นเดียวกับการหาความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ที่ใช้ในการหาความร้อนจำเพาะของตัวอย่างอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง แต่ใช้ TCE ที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะ (ภาคผนวก ก.3) ปริมาณ 200±10 g และมีอุณหภูมิเริ่มต้นคงที่ -20°C ซึ่งบรรจุอยู่ในถุง HDPE ไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับ TCE 400±10 g ในแคลอริมิเตอร์ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ -10°C

<u>การหาความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดอง</u>

สำหรับตัวอย่างอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (0° ถึง 30°C) ทดลองเช่นเดียวกับการหาความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ แต่ใช้น้ำ 300±10 g อุณหภูมิ 60±2°C เป็นสารตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับตัวอย่างปลาหมึกกระดองที่เตรียมไว้

ส่วนตัวอย่างอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-10° ถึง -30°C) ทดลองเช่นเดียวกับการหาความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ โดยใช้ TCE 600±10 g อุณหภูมิ -4±0.5°C เป็นสารตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับตัวอย่างปลาหมึกกระดองที่มีอุณหภูมิ -10±1.0°C และใช้ TCE อุณหภูมิ -10±1.0°C เป็นสารตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับตัวอย่างปลาหมึกกระดองที่มีอุณหภูมิ -20±1.0°C และ -30±2.0°C คำนวณค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง (Cp_s) จากสมการ 4.6

$$C_{ps} = \frac{C_{pL}W_L(T_{iL}-T_{eL}+T_a) + H_k(T_{ik}-T_{ek}+T_a)}{W_s(T_{es}-T_{is}-T_a)} \qquad (4.6)$$

I15074157

4.3 การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว

การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวไม่สามารถหาจากอาหารได้โดยตรง เนื่องจากอาหารมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพความร้อนตลอดช่วงอุณหภูมิ ทำให้การคำนวณมีความยุ่งยาก การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวอาหารในงานวิจัยนี้ใช้ metal transducer โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 10x10x1.1 cm (ขนาดและรูปร่างเหมือนอาหาร) เจาะรูใต้ผิวแผ่นอลูมิเนียม เพื่อสอด thermocouple type T ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.076 cm และต่อ thermocouple เข้าเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (CHINO, DR015) นำแผ่นอลูมิเนียมไปใส่ในบล็อกที่มีขนาดพอดีกับแผ่นอลูมิเนียม โดยใช้แผ่น polystyrene foam ความหนา 8 cm มีค่าสภาพนำความร้อน 0.035 W/m.K (Cleland และ Earle, 1977b) เป็นฉนวนล้อมรอบด้านข้างและด้านล่างของแผ่นอลูมิเนียม ควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นของอลูมิเนียมให้คงที่ นำไปแช่เยือกแข็งโดยใช้ airblast freezer อุณหภูมิลมเย็น -27± 3°C บันทึกอุณหภูมิลมเย็น และอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวอลูมิเนียม ทุกๆ 30 s จนอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวอลูมิเนียมเท่ากับ -20 °C เขียนกราฟระหว่าง $ln\,[(T_{al}-T_a)/(T_{ial}-T_a)]$ กับ เวลา (s) และหาความชันของกราฟ (slope) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวดังสมการ

$$h = (\rho_{al} V_{al} C_{pal} \; slope)/ A_{al} \qquad (4.7)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว ($W/m^2.K$)

ρ_{al} คือ ความหนาแน่นของอลูมิเนียม (kg/m^3)

V_{al} คือ ปริมาตรของอลูมิเนียม (m^3)

C_{pal} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอลูมิเนียม ($J/kg.^{\circ}C$)

A_{al} คือ พื้นที่ของผิวอลูมิเนียมที่สัมผัสลมเย็น (m^2)

T_{ial} คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของแผ่นอลูมิเนียม

T_{al} คือ อุณหภูมิของผิวอลูมิเนียมที่เปลี่ยนไปตามเวลา ($^{\circ}C$)

T_a คือ อุณหภูมิลมเย็น ($^{\circ}C$)

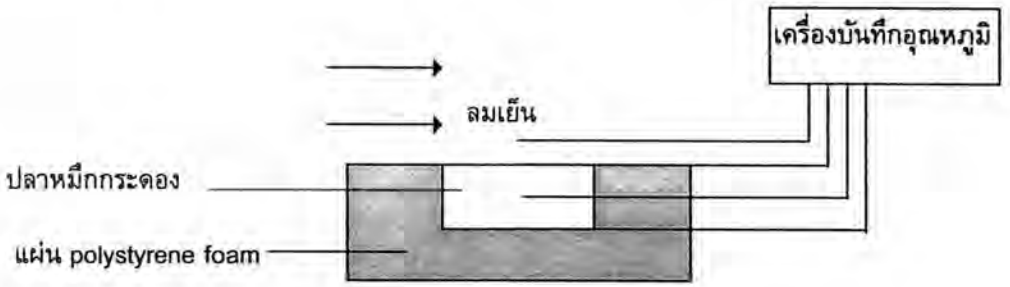
4.4 การเขียนโปรแกรมแบบจำลองสำหรับทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็ง

โปรแกรมแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีเชิงเลข แบบจำลองอย่างง่ายของ Plank (1941), IIR (1972), Cleland และ Earle (1984b) และ Pham (1986b) ถูกเขียนขึ้นด้วยภาษา FORTRAN บนโปรแกรม FORTRAN Power Station version 1.0 สำหรับ Windows (ภาคผนวก ง และ จ) ซึ่งผลการประมวลเวลาในการแช่เยือกแข็งจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาด้วยวิธีเชิงเลข จะแสดงผล (output) บนโปรแกรม Excel สำหรับ Windows เพื่อสร้างกราฟแสดงผลการทำนายการกระจายอุณหภูมิของปลาหมึกกระดองที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆ ขณะแช่เยือกแข็ง การประมวลผลใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Acermate

4.5 การทวนสอบผลการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดองจากแบบจำลองต่าง ๆกับเวลาจากการทดลอง

การทวนสอบทำโดยนำผลเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดองจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองเชิงเลขที่สร้างขึ้นในงานวิจัย และแบบจำลองอย่างง่ายของ Plank (1941), IIR (1972), Cleland และ Earle (1984b) และแบบจำลองของ Pham (1986b) ที่ดัดแปลงโดย Cleland (1991) และ Hossain และคณะ (1992) เปรียบเทียบกับเวลาในการแช่เยือกแข็งการทดลอง ซึ่งการหาเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดองจากการทดลองทำโดยการจำลองแบบให้ปลาหมึกกระดองมีการถ่ายโอนความร้อนในทิศทางเดียว (รูปที่ 4.5) โดยใช้ชิ้นปลาหมึกกระดองที่ตัดให้ได้ความกว้างxยาวเท่ากับ 10x10 cm และตัดความหนาเท่ากัน วัดขนาดและความหนาของปลาหมึกกระดองโดยใช้เวอร์เนียที่มีความละเอียดในการวัด 0.05 cm เมื่อต้องการความหนามากกว่า 2 cm ต้องนำชิ้นปลาหมึกกระดองมาซ้อนกัน เสียบ thermocouple type T ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.076 cm ที่ผิวด้านล่าง ตำแหน่งกึ่งกลาง และผิวบนของชิ้นปลาหมึกกระดอง นำปลาหมึกกระดองไปใส่ในบล็อกที่มีขนาดพอดีกับชิ้นปลาหมึก โดยใช้แผ่น polystyrene foam ความหนา 8 cm มีค่าสภาพนำความร้อน 0.035 W/m.K (Cleland และ Earle, 1977b) เป็นฉนวนล้อมรอบด้านข้างและด้านล่างของชิ้นปลาหมึก ควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นของปลาหมึกให้คงที่ และนำไปแช่เยือกแข็งใน airblast freezer โดยวางตัวอย่างขนานกับทิศทางของลมเย็น จนอุณหภูมิที่ตำแหน่งศูนย์กลางความร้อนเท่ากับ -18°C บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปลาหมึกกระดอง อุณหภูมิลมเย็นเหนือผิวหน้าปลาหมึกกระดองทุกๆ 2 นาที โดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (CHINO, DR015) วัดความเร็วลมที่ด้านบนของผิวหน้าปลาหมึกกระดองโดยใช้เครื่องวัดความเร็วลม (DIGICON DA-42)

ขอบเขตการศึกษาเวลาในการแช่เยือกแข็ง ตัวแปรที่ศึกษา คือ ความหนาของปลาหมึกกระดอง 0.5 - 4.0 cm อุณหภูมิเริ่มต้นของปลาหมึกกระดอง 0° - 30°C อุณหภูมิของลมเย็น ใน airblast freezer -24° - (-31) °C ความเร็วลม 1 - 10 m/s



รูปที่ 4.5 การวางตัวอย่างสำหรับหาเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดอง

4.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำผลการทดลองค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกกระดอง ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ ที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวที่ความเร็วลมระดับต่างๆ มาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (ดังภาคผนวก ค) หาสมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด โดยการวิเคราะห์สมการถดถอย (regression analysis) ระหว่างค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนกับอุณหภูมิ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวกับความเร็วลม หาความสัมพันธ์ในเทอมของ Nusselt number (Nu) กับ Reynolds number (Re)

สำหรับผลการทำนายค่าเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดองจากแบบจำลองต่างๆ จะนำไปทวนสอบเปรียบเทียบกับเวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทดลอง คำนวณความผิดพลาดในการทำนายจากสมการ 4.8 และนำค่าความผิดพลาดจากการทำนายในแต่ละแบบจำลองมาวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบน ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของความผิดพลาด

ความผิดพลาด(%) =

[(เวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทำนาย-เวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทดลอง) X100] / เวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทดลอง (4.8)