

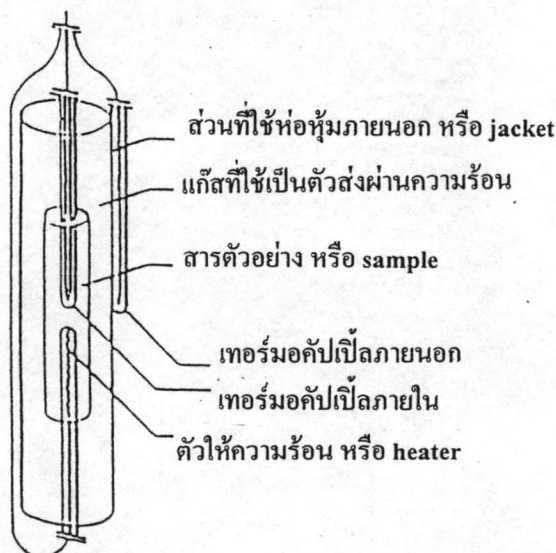
บทที่ 3

แคลอรีมิเตอร์

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้แคลอรีมิเตอร์ชนิดที่ใช้หลักการถ่ายโอนความร้อน (heat flow) มาทำการวัดเพื่อหาค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในเครื่องปว-1/1 และก่อนที่จะกล่าวถึงแคลอรีมิเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จะขอกล่าวถึงลักษณะโดยทั่วไปของแคลอรีมิเตอร์ชนิดนี้และวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของแคลอรีมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.1

3.1 ส่วนประกอบต่างๆของแคลอรีมิเตอร์

1. ส่วนห่อหุ้มภายนอกหรือ jacket ทำจากเหล็กไร้สนิม (Stainless steel)
2. แก๊สบรรจุภายในที่ใช้เป็นตัวส่งผ่านความร้อน สามารถใช้ฮีเลียม นีออน อาร์กอน หรือ คริปตอน อย่างใดอย่างหนึ่ง
3. สารตัวอย่างหรือ sample ที่ใช้เป็นตัวดูดกลืนรังสี อาจทำจาก กราไฟต์ แมกนีเซียม อลูมิเนียม เหล็ก เซอร์โคเนียม ตะกั่ว บิสมัท อย่างใดอย่างหนึ่ง
4. เทอร์มอคัปเปิ้ลที่อยู่ภายในและภายนอก ใช้วัด อุณหภูมิ ทำจาก โครเมิล-อลูเมล
5. ตัวให้ความร้อน หรือ heater ทำด้วยขดลวดความร้อน

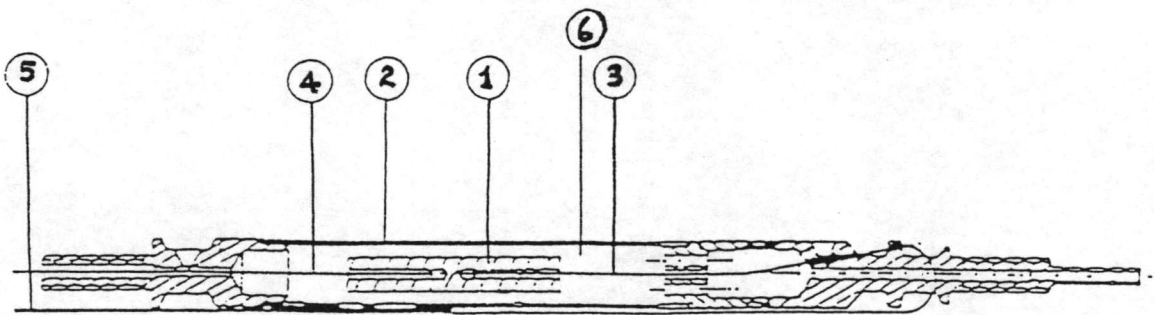


รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบต่างๆของแคลอรีมิเตอร์

3.2 ส่วนประกอบต่างๆของแคลอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ได้เลือกใช้แคลอริมิเตอร์ที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 ซึ่งมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1. สารตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวดูดกลืนรังสี คือ กราไฟต์
2. ส่วนที่ใช้ห่อหุ้มภายนอก คือ เหล็กไร้สนิมหรือสแตนเลส สตีล
3. เทอร์มอคัปเปิลที่อยู่ภายใน คือ โครเมิล-อลูเมล
4. ตัวให้ความร้อน คือ ขดลวดความร้อน
5. เทอร์มอคัปเปิลที่อยู่ภายนอก คือ โครเมิล-อลูเมล
6. แก๊สที่ใช้เป็นตัวส่งผ่านความร้อน คือ อาร์กอน



รูปที่ 3.2 แคลอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

3.2.1 สารตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวดูดกลืนรังสี (sample)

วัสดุที่สามารถใช้เป็น sample มีหลายชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานว่าเป็นงานประเภทใด การเลือกวัสดุมาใช้เป็น sample สำหรับแคลอริมิเตอร์ที่จะใช้วัดปริมาณความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้น สามารถทำได้โดยพิจารณาเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- (ก) วัสดุนั้นต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิสูง
- (ข) ปราศจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตัวอย่างกับแก๊ส
- (ค) ปัญหาทางด้านเทคนิค
- (ง) การแปรสภาพเมื่อได้รับรังสี

สำหรับสารตัวอย่าง ที่เลือกใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ คือ กราไฟต์ เนื่องจากได้รับการสนับสนุนจากงานวิจัย เอกสารอ้างอิง[IAEA,1971] ยืนยันให้เห็นว่า ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับจากการดูดกลืนใน CO_2 จะหาค่าที่แน่นอนได้ โดยการแก้ไขค่าที่วัดได้เพียงเล็กน้อยในกราไฟต์

นอกจากนี้สารตัวอย่างที่นำมาบรรจุในแคลอริมิเตอร์ ควรได้รับการทดสอบว่าประกอบด้วยสารชนิดใดบ้าง ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนกับตัวอย่าง เช่นการเกิดปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)^7Li$ เป็นต้น

นอกจากสารตัวอย่าง แล้ว โครงสร้างส่วนอื่นของแคลอริมิเตอร์ควรได้รับการตรวจสอบเป็นพิเศษ สาเหตุเนื่องมาจากความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างรังสีกับโครงสร้างนั้นๆมีผลต่อการวัดความร้อนในตัวอย่ง การคัดเลือกสามารถทำได้โดยการเลือกใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนต่ำ นอกจากนี้ควรพิจารณาถึงโครงสร้างของวัสดุที่ได้รับการกระตุ้นจากรังสีชนิดต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงเป็นสารกัมมันตรังสี โดยมีการสลายตัวที่ครึ่งชีวิตสั้นๆ วัสดุที่ใช้ไม่ควรมีการแปรสภาพ เมื่อนำไปใช้งานในบริเวณที่มีรังสีสูงหรือในกรณีที่ต้องใช้เวลาในการทำการทดลองเป็นระยะเวลาานาน

3.2.2 ส่วนห่อหุ้ม (jacket)

วัสดุที่นำมาใช้ควรเป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ดี โดยทั่วไปควรจะเป็นทองแดง หรือเงิน แต่เนื่องจากโลหะทั้งสองชนิดมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืน (absorption cross-section) สูง ส่วนใหญ่จึงนิยมใช้ อลูมิเนียม สำหรับในบริเวณแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย เหล็กไร้สนิม

หรือ สแตนเลส สตีล (Stainless steel) เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมมากที่สุด นอกจากนี้สามารถใช้ Jacket เป็นทางเดินของลวดเทอร์โมคัปเปิ้ล

3.2.3 เทอร์โมคัปเปิ้ล (thermocouple)

ปัญหาเรื่องการวัดอุณหภูมิเป็นปัญหาที่ยุ่งยากอีกปัญหาหนึ่ง ที่ได้รับการเอาใจใส่ในงานทดลองนอกเหนือไปจากงานทางด้านนิวเคลียร์ อย่างไรก็ตาม ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นสามารถนำมาทำให้เกิดประโยชน์ ในการสร้างเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่มีคุณสมบัติตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยทั่วไปการเลือกใช้ชนิดของเทอร์โมคัปเปิ้ลขึ้นอยู่กับชนิดของการตอบสนองที่ต้องการในการวัดอุณหภูมิที่คงที่ และค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนเมื่อวางอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว ส่วนใหญ่การทดลองที่ทำในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูนั้น นิยมใช้โครเมล-อลูเมล (Chromel-Alumel) เพราะให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่มีสภาวะที่คงที่

การวัดความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่าง sample กับ jacket ใน แคลอริมิเตอร์ชนิดที่มีการถ่ายโอนความร้อนนี้ สามารถแสดงคุณสมบัติของแคลอริมิเตอร์ให้เห็นอย่างเด่นชัด ถ้าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผิวภายนอกของ sample และ ผิวภายในของ jacket มีลักษณะของการกระจายของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ จนถึงเสมือนว่าอยู่ในตำแหน่งของการวัดตำแหน่งเดียวกัน ค่าที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

3.2.4 ตัวให้ความร้อน (heater)

ลักษณะของแคลอริมิเตอร์ที่ใช้งานในเครื่องปฏิกรณ์ปัจจุบัน มักได้รับการติดตั้งตัวให้ความร้อนไว้ที่ sample เสมอ สาเหตุก็เพราะว่า เมื่อนำแคลอริมิเตอร์เข้าไปวัดในบริเวณที่มีรังสีสูงเป็นระยะเวลานาน ตัวแคลอริมิเตอร์จะได้รับการกระตุ้นจนมีสภาพเป็นสารกัมมันตรังสี ดังนั้นในขณะที่ทำการทดลองสามารถทำการปรับเทียบแคลอริมิเตอร์ โดยวิธีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังตัวให้ความร้อน เพื่อทดสอบสภาพการทำงานของแคลอริมิเตอร์

3.2.5 แก๊สที่ใช้เป็นตัวถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer gas)

ในการเลือกใช้แก๊สที่จะนำมาบรรจุในแคลอริมิเตอร์ ขึ้นอยู่กับลักษณะการตอบสนองของแก๊สที่ต้องการ และไม่ควรเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับ โครงสร้างส่วนอื่นๆของแคลอริมิเตอร์

3.3 หลักการทำงานของแคลอรีมิเตอร์แบบใช้หลักการถ่ายโอนความร้อน

แคลอรีมิเตอร์ชนิดที่ใช้หลักการถ่ายโอนความร้อนเป็นชนิดที่ทำงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขของสภาวะที่สมดุล เมื่อแคลอรีมิเตอร์อยู่ในสภาวะสมดุล นั่นก็คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีค่าเท่ากับศูนย์ และสมการที่ใช้ในการอธิบายสภาวะที่สมดุลก็คือ [IAEA,1971]

$$p = hs(t_1 - t_2) \quad \text{หรือ} \quad (t_1 - t_2) = \frac{p}{hs} \quad (3.1)$$

โดยที่

P	คือ	พลังงานที่อินทิเกรตทั่วทั้งปริมาตรของ sample (W/g)
h	คือ	สัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านความร้อนของตัวกลางที่ใช้ส่งผ่านความร้อน (W/°K)
s	คือ	พื้นที่ผิวด้านนอกของ sample (m ²)
t ₁	คือ	อุณหภูมิของผิว sample (°C)
t ₂	คือ	อุณหภูมิของ jacket (°C)

แคลอรีมิเตอร์ชนิดนี้ไม่สามารถจัดเข้าอยู่ในจำพวกที่มีระบบของอุณหภูมิกงที่ (Isothermal) ควรจัดเข้าอยู่ในจำพวกที่เกี่ยวกับความร้อน 2 ระบบ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า bithermal system ตัวกลางที่สามารถนำมาใช้ในแคลอรีมิเตอร์ชนิด heat flow นี้สามารถเป็นได้ทั้งแก๊สหรือของแข็ง

สำหรับการทำงานของ heat flow calorimeter ถ้าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผิวของ sample มีลักษณะการกระจายที่สม่ำเสมอและแน่นอน การทราบค่าความต้านทานความร้อนของ sample จะสามารถทำให้หาค่าความร้อนสะสมได้จากสมการข้างล่างต่อไปนี้

$$P = hs (t_s - t_c) \quad (3.2)$$

ในกรณีที่อุณหภูมิของผิวด้านนอกของตัวอย่างและอุณหภูมิด้านในของ jacket มีค่าไม่เท่ากัน จะสามารถนำสมการ $P = \sum P_i = \sum h_i s_i (t_s - t_c)$ เข้ามาอธิบายได้โดยการนำพื้นที่ที่อยู่ระหว่างผิวด้านนอกของตัวอย่างและผิวด้านในของ jacket มาแบ่งออกเป็นพื้นที่เล็กๆเท่าๆกัน โดยแบ่งพิจารณาเป็นคู่ๆ ไป

เนื่องจาก heat flow calorimeter มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้ เพราะฉะนั้นเมื่อทราบค่า **time constant** ของแคลอริมิเตอร์แล้ว สามารถที่จะแก้ไขค่าที่วัดได้โดยทำภายใต้เงื่อนไขที่ได้รับจากสมการ

$$-hs(t - t_e) + p = MC \frac{dT}{dt} \quad (3.3)$$

โดยที่

MC = Thermal conductivity ของแก๊ส ซึ่งแสดงค่าในตารางที่แนบมาในภาคผนวก ค

dT/dt = อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแคลอริมิเตอร์

p = กำลังไฟฟ้า (W/g)

สมการที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสมการอิสระ หรือเป็นสมการที่ไม่ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของความร้อนชนิดต่างๆ ที่อยู่ภายในตัวอย่าง แต่ขึ้นอยู่กับกำลังของความร้อนสูงสุดที่ปลดปล่อยภายในตัวอย่างเท่านั้น

นอกจากนี้ความชันของอุณหภูมิในตัวอย่างยัง ขึ้นกับ ค่าการกระจายของแหล่งกำเนิดของความร้อนชนิดต่างๆ

การส่งผ่านความร้อนข้ามช่องว่างที่เป็นฉนวนกันความร้อนมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและโครงสร้างของวัสดุที่นำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในแคลอริมิเตอร์

3.4 ลักษณะของการถ่ายโอนความร้อนเมื่อตัวกลางที่ใช้เป็นฉนวน

3.4.1. การถ่ายโอนความร้อนโดยวิธีการนำความร้อน

ในกรณีที่ตัวกลางที่ถ่ายเทความร้อนเป็นแก๊ส พิจารณากรณีที่รูปทรงของแคลอริมิเตอร์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกความสูง L และมีรัศมีเท่ากับ R โดยที่ค่าของ $L \gg R$ โดยไม่พิจารณาถึงความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนของแก๊ส สามารถที่จะนำสมการการนำความร้อนของแก๊สมาใช้ในการอธิบายได้ดังต่อไปนี้

$$\lambda \nabla^2 t(\vec{r}) = 0 \quad (3.4)$$

โดยที่

λ_r = thermal conductivity ของแก๊สที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่รัศมีใดๆ
($\text{cal.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

$$\nabla^2 t = \text{Laplace equation} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \right)$$

จากค่าที่ได้สามารถนำไปหาค่า thermal resistivity

$$hs = \frac{2\pi\lambda_r(t)L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3.5)$$

โดยที่

h = สัมประสิทธิ์ของการถ่ายโอนความร้อน (W/g)

s = พื้นที่ผิวที่มีการถ่ายโอนความร้อน (m^2)

L = ความยาวของทรงกระบอก (m)

r_2 = รัศมีภายนอกของทรงกระบอก (m)

r_1 = รัศมีภายในของทรงกระบอก (m)

สมการที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถนำมาอธิบายถึง การกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอในแคลอริมิเตอร์ โดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ($t_1 - t_2$) ที่เกิดขึ้นมีค่าเพียงเล็กน้อย ในกรณีที่ค่าของความแตกต่างของอุณหภูมิมีก่อนข้างสูง สิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อประกอบการอธิบายก็คือค่าเทอร์มัลคอนดักติวิตี (thermal conductivity, λ_r) ในแต่ละพื้นที่ผิวของแก๊ส

สำหรับแก๊สที่นำมาใช้แต่ละชนิดนั้น ค่าเทอร์มัลคอนดักติวิตี (thermal conductivity, λ_r) จะมีค่าแปรผันตามกฎของ Sutherland

$$\lambda_r = \lambda_0 \times \frac{273 + C}{T + C} \times \left[\frac{T}{273} \right]^{3/2} \quad (3.6)$$

โดยที่

T = อุณหภูมิของแก๊ส ($^{\circ}\text{K}$)

λ_0 = เทอร์มัลคอนดักติวิตีของแก๊สที่จุดกึ่งกลาง ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

C = ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊ส (kJ/kg-K)

เมื่อนำค่า λ แทนลงในสมการที่ (3.5)

$$hs = \frac{4\pi\lambda_0 L}{4 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \times \frac{273+C}{(273)^{3/2}} \times [f(T_1) - f(T_2)] \quad (3.7)$$

ด้วยค่า $f(T) = \frac{T^{3/2}}{3} - CT^{1/2} + C^{3/2}t_g^{-1} \sqrt{\frac{T}{C}}$

โดยที่

r_1 = รัศมีของ Sample (cm)

r_2 = รัศมีของ Jacket (cm)

t_g = อุณหภูมิของแก๊ส ณ จุดใดๆ ($^{\circ}\text{K}$)

3.4.2. การถ่ายโอนความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อน

ในการถ่ายโอนความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อนจะไม่พิจารณาถึงความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในแก๊ส แต่เป็นการพิจารณาความร้อนที่เกิดจากรังสีเข้าทำปฏิกิริยากับ sample ถ่ายโอน ไปยัง jacket โดยสามารถเขียนเป็นรูปสมการของอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากรังสีได้ดังนี้

$$q = \sigma FA(T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W}) \quad (3.8)$$

โดยที่

F = เศษส่วนของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากรังสีที่แผ่จาก sample ไปยัง jacket หรือในทางกลับกันจาก jacket ไปยัง sample

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ (Stefan Boltzman constant)

A = พื้นที่ที่มีการแผ่รังสีความร้อนจากผิวหนึ่ง ไปยังอีกผิวหนึ่ง (m^2)

สำหรับแคลอริมิเตอร์ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก และมีลักษณะเป็นวงกลมซ้อนกัน 2 วงที่มีจุดศูนย์กลางของวงกลมร่วมกัน สามารถหาค่าของแฟคเตอร์ (F) ได้จากสมการ

$$F = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{A}{\varepsilon_2} \left[\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right]} \quad (3.9)$$

โดยที่

σ	=	$5.67 \times 10^8 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^4$
T_1	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของ sample
T_2	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของ jacket
A	=	พื้นที่ผิวของตัวอย่างหรือของ jacket
ε_1	=	ความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของ sample
ε_2	=	ความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของ jacket

สำหรับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่มีค่าเล็กน้อย สามารถเขียนรูปสมการ (3.8) ใหม่ได้ ดังนี้

$$q = \sigma FA (T_1^4 - T_2^4) \approx \sigma FA (T_1 - T_2) [4T_2^3 + 6T_2^2 (t_1 - t_2)] \quad (3.10)$$

4.3.3. การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนตามธรรมชาติ

จากการศึกษาวิจัย[Fischender and Saunder, 1971, IAEA] ที่ผ่านมามีพบว่า การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนตามธรรมชาตินั้นมีโอกาสเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาถึงขนาดและความดันของแก๊สจากเงื่อนไขที่กล่าวมาทั้งหมดในแคลอริมิเตอร์ ดังนั้นการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนตามธรรมชาติจึงเป็นวิธีแรก ที่มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิจาก sample กับ jacket และค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายโอนความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างนี้มากนัก ในการทดลองทั่วไปมักใช้แก๊สเป็นตัวกลางเพื่อลดผลกระทบน้อยเหล่านี้