การทดลองที่ 8
กฎการเย็นตัวของนิวตัน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนหรือการเย็นตัวของวัตถุ

อุปกรณ์

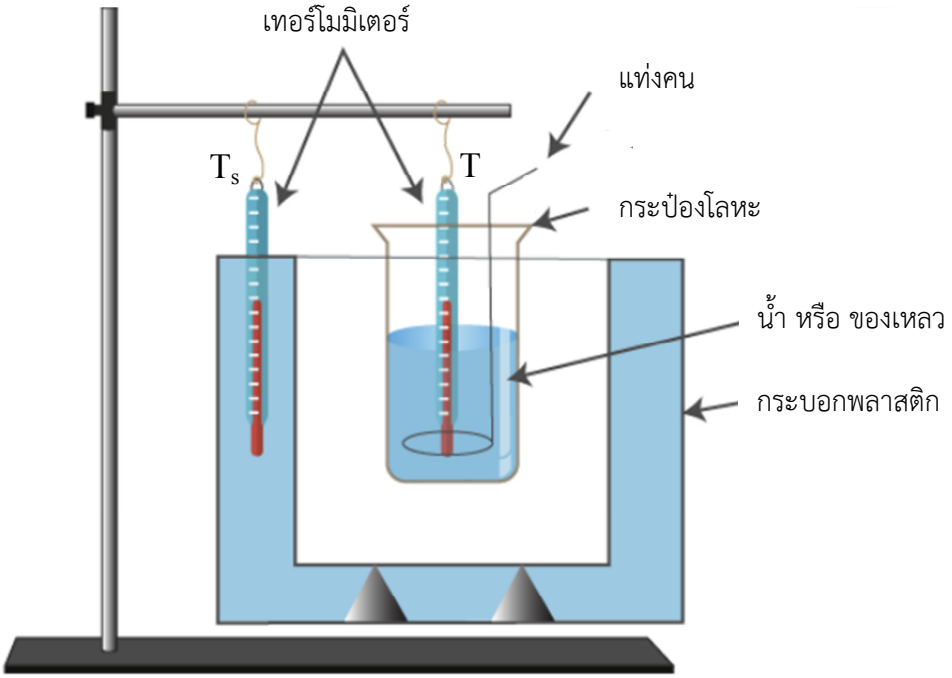
1. กระป๋องโลหะสำหรับบรรจุของเหลวและกระบอกพลาสติกบรรจุน้ำหล่อเย็นพร้อมแท่งแก้วสำหรับคน
2. เทอร์โมมิเตอร์ พร้อมตัวจับที่มีขาตั้ง
3. นาฬิกาจับเวลา
4. เครื่องชั่ง
5. บีกเกอร์
6. ของเหลวที่มีอุณหภูมิประมาณ 40 $^{\circ}$C

ทฤษฎี

ในการทดลองนี้ เราจะทำการศึกษาพฤติกรรมการเย็นตัวลงของวัตถุร้อน (Hot object) โดยการถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นรูปหนึ่งของพลังงาน ให้แก่สิ่งแวดล้อม (Surrounding) ตามหลักของ**เทอร์โมไดนามิกส์** การถ่ายเทความร้อนดำเนินจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และหยุดถ่ายเทเมื่อเกิด**สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์** หรือก็คือ **เมื่ออุณหภูมิทั้งสองจุดมีค่าเท่ากัน**

การถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งมี 3 วิธี ด้วยกัน ได้แก่

1) **การนำความร้อน (Conduction)** เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในภายในก้อนของแข็งก้อนเดียวกันหรือผ่านทางการสัมผัสกันระหว่างวัตถุสองชนิด ตัวอย่างเช่น ความร้อนจากเตารีดถ่ายเทไปยังผ้าขณะที่รีดผ้า เป็นต้น
2) **การพาความร้อน (Convection)** เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยตัวกลางที่เป็นของไหล เช่น อากาศ หรือ น้ำ เป็นตัวนำพาความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ตัวอย่างเช่น ความร้อนจากขดลวดต้านทานไฟฟ้าในเครื่องเป่าผมถ่ายเทโดยอาศัยการพาความร้อนของอากาศไปยังเส้นผม เป็นต้น
3) **การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)** เป็นการถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งผ่านตัวกลางหรือสุญญากาศไปยังอีกจุดหนึ่งโดยอาศัยการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ความร้อนที่เราได้รับจากแสงแดดจากดวงอาทิตย์ เป็นต้น



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการเย็นตัวของนิวตัน

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยกระบอกพลาสติกที่มีผนังกั้นความร้อนสองชั้น (Double walled container) โดยช่องว่างระหว่างผนังจะเติมน้ำลงไปเพื่อช่วยควบคุมรักษาระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (Surrounding temperature, T_S) รอบกระป๋องโลหะให้มีค่าคงที่ กระป๋องโลหะทำหน้าที่เป็น**แคลอริมิเตอร์ (Calorimeter)** บรรจุด้วยน้ำหรือของเหลวที่เราสนใจศึกษาการเย็นตัวลงตามทฤษฎีของนิวตัน โดยในการศึกษา เราจะให้ของเหลวที่บรรจุในกระป๋องโลหะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม แล้วทำการศึกษาพฤติกรรมการเย็นตัวลงโดยการวัดอุณหภูมิของของเหลวและสิ่งแวดล้อมด้วยเทอร์โมมิเตอร์ T และ T_S ตามลำดับ

กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) กล่าวว่า อัตราการสูญเสียความร้อนของวัตถุร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมนั้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุร้อนกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถเขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$\frac{dQ}{dt} \propto (T - T_s)$$

หรือ

$$\frac{dQ}{dt} = -k(T - T_s) \qquad \text{.....(1)}$$

เมื่อ $\frac{dQ}{dt}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัตถุร้อนสู่สิ่งแวดล้อม [J/s]

T = อุณหภูมิของวัตถุ [K]

T_S = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม [K]

k = ค่าคงที่ [J/(s•K)]

โดยเครื่องหมายลบในสมการ (1) แสดงให้เห็นว่าวัตถุมีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม

เรายังทราบอีกว่า พลังงานความร้อนนั้นจะมีความสัมพันธ์กับ มวลของวัตถุ (m) ความร้อนจำเพาะของวัตถุ (c_p) และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (dT) ตามสมการ

$$dQ = mc_p dT$$

ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการอัตราการถ่ายเทความร้อนของวัตถุใหม่ ได้เป็น

$$\frac{dQ}{dt} = mc_p(\frac{dT}{dt}) \quad \text{.....(2)}$$

จากสมการที่ (1) และ (2) เราสามารถเขียนกฎการเย็นตัวลงของนิวตัน ให้อยู่ในรูปของอัตราการเย็นตัวลงของอุณหภูมิ ได้เป็น

$$\frac{dT}{dt} = (-\frac{k}{mc_p})(T - T_s) \quad \text{.....(3)}$$

หรือ $$\frac{dT}{dt} = -k_1(T - T_s) \quad \text{.....(4)}$$

เมื่อ $k_1 = \frac{k}{mc_p}$

จัดรูปสมการที่ (4) ใหม่

$$\frac{dT}{(T - T_s)} = - k_1 dt$$

และหาคำตอบของสมการ ได้ดังนี้

$$\ln(T - T_s) = -k_1 t + C \quad \text{.....(5)}$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่

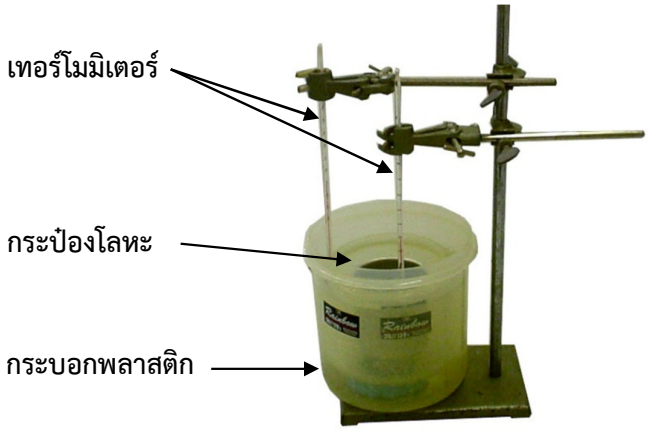
เราสามารถสังเกตพฤติกรรมการเย็นตัวลงของวัตถุร้อน โดยการจัดรูปสมการที่ 5 ใหม่ได้เป็น

$$T - T_s = e^{-k_1 t + C} \quad \text{.....(6)}$$

ซึ่งพบว่า ในการถ่ายเทความร้อนของวัตถุร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมนั้น อุณหภูมิของวัตถุร้อนจะลดลงในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น อยู่ในรูปแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) เทียบกับเวลา จนกระทั่งอุณหภูมิของวัตถุมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม หรืออยู่ในสมดุลเทอร์โมไดนามิกส์

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การจัดอุปกรณ์การทดลอง

2. บรรจุน้ำสำหรับหล่อเย็นลงในช่องว่างระหว่างกระบอกพลาสติกใบในและใบนอก
3. ตวงของเหลวที่กำหนดให้ใส่ลงในกระป๋องโลหะ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร (150 cm^3 หรือ 150 ml)
4. วัดค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ซึ่งเสมือนเป็นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (T_S) ด้วยเทอร์โมมิเตอร์
5. นำกระป๋องโลหะบรรจุของเหลวไปตั้งไว้ในกระป๋องพลาสติกใบใน แล้วอ่านอุณหภูมิของของเหลวในกระป๋องโลหะ (T) พร้อมกับเริ่มจับเวลา
6. อ่านค่าทุก ๆ 2 นาทีต่อเนื่อง จนเวลาผ่านไป 30 นาที โดยวัดค่าอุณหภูมิของของเหลวในกระป๋องโลหะเป็น T และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเป็น T_S ระหว่างทำการทดลองให้กวนของเหลว ในกระป๋องโลหะเบา ๆ ด้วยแท่งแก้วตลอดเวลา

7. นำค่า $T - T_S$ กับเวลา ไปเขียนกราฟบนกระดาษกราฟ โดยให้ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของของเหลวกับสิ่งแวดล้อม $T-T_S$ ในหน่วยองศาเซลเซียส อยู่บนแกน y และเวลาในหน่วย**นาที** อยู่ในแกน x สังเกตลักษณะกราฟที่ได้แล้วอภิปรายในส่วนสรุปผล
8. นำค่า $T - T_S$ กับเวลาในหน่วย**วินาที** ไปเขียนกราฟบนกระดาษกราฟกึ่งล็อก พร้อมคำนวณหาค่าคงที่ k_1 แล้วอภิปรายลงในส่วนสรุปผล

การคำนวณหาค่าคงที่ k_1

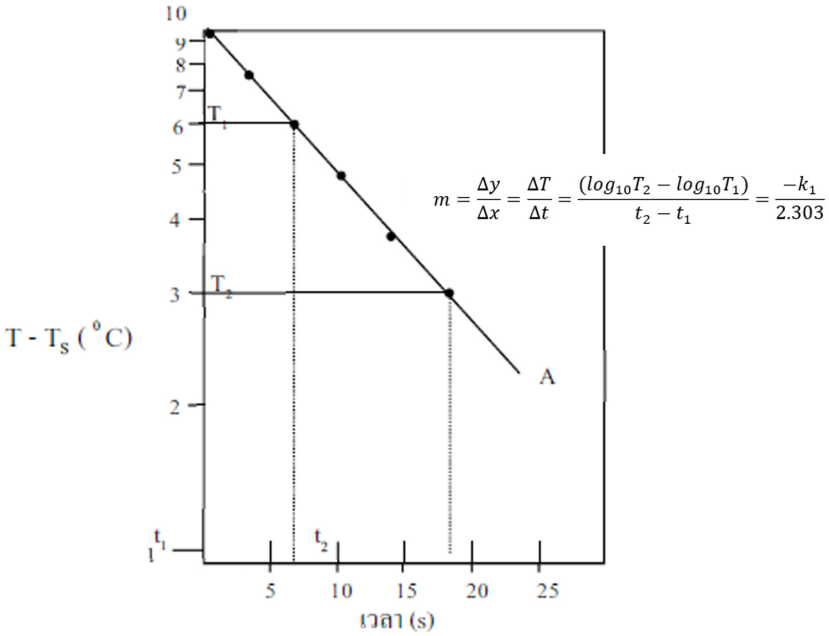
ในการเขียนกราฟลงบนกระดาษกราฟกึ่งล็อกนั้น เราสามารถนำค่า T – Ts ไปบันทึกลงบนแกนล็อกฐาน 10 หรือแกน y ของกระดาษกราฟได้โดยตรงเลย โดยเราต้องทำการเปลี่ยนสมการที่ (5) ซึ่งอยู่ในรูปของล็อกธรรมชาติ ln ให้อยู่ในรูปล็อกฐาน 10 เสียก่อน โดยจากสมการที่ (5) เราได้ว่า

$$\ln(T - T_s) = \log_e(T - T_s) = 2.303\log_{10}(T - T_s) = -k_1 t + C$$

จัดรูปของสมการใหม่ เราจะได้เป็น

$$\log_{10}(T - T_s) = \frac{-k_1}{2.303}t + \frac{C}{2.303}$$

เมื่อนำข้อมูลที่ทดลองมาบันทึก เราจะได้เป็นกราฟเส้นตรง ที่มีความชัน $m = -k_1/2.303$ และ จุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $C/2.303$ ตามลำดับ



รูปที่ 3 ตัวอย่างกราฟกึ่งล็อกสำหรับคำนวณค่าความชัน k_1

หมายเหตุ

1) เมื่อทำการทดลองเสร็จ ให้นำของเหลวและน้ำหล่อเย็น เทคืนภาชนะเดิม
2) หลังจากทำการทดลองเสร็จต้องนำเทอร์โมมิเตอร์ กระป๋องโลหะ และแท่งแก้ว ไปล้างให้สะอาด และเช็ดให้แห้ง