

Thermodynamics I

Assoc.Prof.Sommai Pripem, Ph.D.

Chapter 4 : The First Law of Thermodynamics



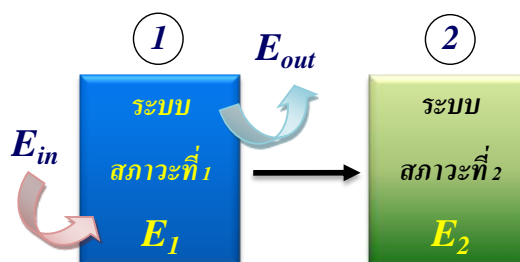
บทที่ 4

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

(The First Law of Thermodynamics)

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ก็คือ “กฎทรงของพลังงาน ” (Law of Conservation of Energy) ที่เรารู้จักกันดีนั่นเอง ในบทนี้ตอนแรกจะพิจารณาถึงการใช้กฎข้อนี้กับระบบที่ดำเนิน ไปเป็นวัฏจักร และหลังจากนั้นจะเป็นการใช้กฎข้อนี้กับระบบปิดเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ ส่วนการใช้กฎข้อที่หนึ่งสำหรับระบบเปิดจะได้กล่าวในบทถัดไป

กฎทรงของพลังงานกล่าวว่า “พลังงานไม่สามารถถูกทำลายหรือสร้างขึ้นมาได้ แต่พลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้” ซึ่งในการประยุกต์มาใช้งานนั้นจะสร้างเป็นสมการโดยใช้หลักดุลพลังงาน (Energy balance) ทั้งนี้จะต้องกำหนดระบบเสียก่อน จากนั้นเมื่อระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ก็จึงพิจารณารูปแบบของพลังงานที่เกี่ยวข้องในสถานะเริ่มต้น สถานะสุดท้ายของระบบ รวมทั้งพลังงานที่ถ่ายเทเข้าออกจากระบบในระหว่างการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 1 เราจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงพลังงานที่เกี่ยวข้องกับระบบ

$$E_1 + E_{in} = E_{out} + E_2$$

$$E_{in} = E_{out} + (E_2 - E_1) \quad (1)$$

เมื่อ E_1 คือ พลังงานของระบบที่สถานะเริ่มต้น

E_2 คือ พลังงานของระบบที่สถานะสุดท้าย

E_{in} คือ พลังงานรวมทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบในระหว่างการเปลี่ยนแปลงจาก 1 ไป 2

E_{out} คือ พลังงานรวมทั้งหมดที่ออกจากระบบในระหว่างการเปลี่ยนแปลงจาก 1 ไป 2

สมการที่ 1 นี้เป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของพลังงานในภาพรวม แต่เนื่องจากระบบอาจมีความซับซ้อน อีกทั้งพลังงานมีหลายรูป สมการนี้จึงยังไม่สะดวกที่จะนำไปใช้โดยตรง แต่จะเขียนเป็นสมการเฉพาะกรณีเพื่อสะดวกในการใช้ ได้แก่ สมการสำหรับ วัฏจักร ระบบปิด และระบบเปิด

4.1 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบที่ดำเนินไปเป็นวัฏจักร

(The First Law of Thermodynamics for a System Undergoing a Cycle)

การที่ระบบดำเนินไปเป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์นั้นหมายถึงว่า ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเริ่มต้น ไปสู่สถานะต่างๆ แล้วในที่สุดกลับมาสู่สถานะสุดท้ายซึ่งคือสถานะเริ่มต้นอีกครั้ง แล้วดำเนินซ้ำเป็นวัฏจักร เมื่อพิจารณาสมการที่ 1 จะสรุปได้ว่า **พลังงานของระบบที่สถานะสุดท้าย E_2 ก็เท่ากับพลังงานของระบบที่สถานะเริ่มต้น E_1** ดังนั้นจะได้ว่า **พลังงานรวมทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบ (E_{in}) จะเท่ากับพลังงานรวมทั้งหมดที่ออกจากระบบ E_{out}** และเนื่องจากเป็นวัฏจักรสสารจะอยู่ภายในระบบเท่านั้น ไม่มีการถ่ายเทเข้าหรือออกจากระบบเลย ดังนั้นพลังงานที่ถ่ายเทเข้าหรือออกจึงมีเฉพาะความร้อนและงานเท่านั้น สมการที่ 1 จึงเป็น

$$Q_{in} + W_{in} = Q_{out} + W_{out}$$

$$Q_{in} - Q_{out} = W_{out} - W_{in}$$

$$Q_{net} = W_{net} \dots\dots\dots (2)$$

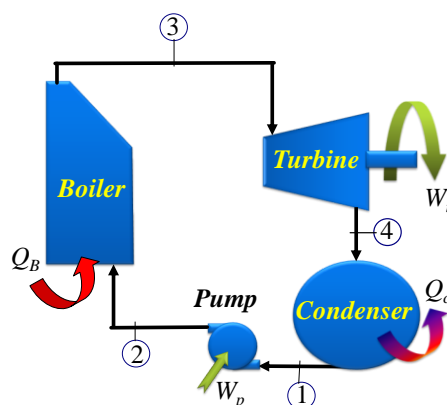
เมื่อ Q_{net} คือปริมาณความร้อนสุทธิรอบวัฏจักร

W_{net} คือปริมาณงานสุทธิรอบวัฏจักร

จะเห็นว่าความร้อนและงานนั้นเป็น vector ทิศทางของมันคือเข้าหรือออกจากระบบในที่นี้จะเห็นว่าเครื่องหมายทิศทางนั้นคือความร้อนที่เข้าสู่ระบบจะมีเครื่องหมายเป็นบวก (+) และงานที่ออกจากระบบจะมีเครื่องหมายเป็นบวก (+) หากตรงข้ามนี้ก็จะลบ (-) สมการที่ (2) นี้ก็คือสมการกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักร ซึ่งอาจสรุปได้ว่า “ในวัฏจักรหนึ่งๆ ปริมาณความร้อนสุทธิเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณงานสุทธิ” หรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ว่า

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

ตัวอย่างที่ 4.1 ในโรงจักรกังหันไอน้ำโรงหนึ่ง งานที่ผลิตได้จากกังหัน 1000 kW ปริมาณความร้อนที่ต้องใส่ในหม้อน้ำเป็น 2800 kJ/kg ความร้อนที่ระบายทิ้งไปกับน้ำหล่อเย็นในอุปกรณ์ควบแน่นเท่ากับ 2100 kJ/kg และงานที่ใช้ในการปั๊มน้ำจากเครื่องควบแน่นเข้าสู่หม้อน้ำเท่ากับ 5 kW จงคำนวณหาอัตราการไหลของไอน้ำในวัฏจักรนี้



วิธีทำ กฎข้อที่ 1 $\oint \delta Q = \oint \delta W$

เขียนเป็นสมการอัตรา $\oint \delta \dot{Q} = \oint \delta \dot{W}$

$$\begin{aligned}\oint \delta q &= q_{\text{in}} + q_{\text{out}} \\ &= (2800 \text{ kJ/kg}) + (-2100 \text{ kJ/kg}) = 700 \text{ kJ/kg} \\ \oint \delta Q &= \dot{m} \oint \delta q\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\oint \delta W &= W_{\text{out}} + W_{\text{in}} \\ &= (1000 \text{ kW}) + (-5 \text{ kW}) = 995 \text{ kW}\end{aligned}$$

แทนค่า $\dot{m}(700 \text{ kJ/kg}) = 995 \text{ kW}$

$$\dot{m} = \frac{995 \text{ kJ/s}}{700 \text{ kJ/kg}} = 1.421 \text{ kg/s} \quad \underline{\text{ตอบ}}$$

4.2 พลังงานภายใน – คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างหนึ่ง

(Internal Energy - A Thermodynamics Property)

ก่อนที่จะพิจารณาหัวข้อที่หนึ่งสำหรับระบบปิด เราต้องทำความเข้าใจกับพลังงานที่อยู่ภายในตัวสารเสียก่อน ในระบบปิดนั้น สารจะถูกกักให้อยู่ภายในระบบ หากสารซึ่งบรรจุในภาชนะ เมื่อภาชนะเคลื่อนที่มันก็จะมีพลังงานจลน์ (Kinetic energy) เนื่องจากความเร็วของการเคลื่อนที่ และหากตัวสารในภาชนะอยู่ต่างจากระดับอ้างอิงมันก็จะมีพลังงานศักย์ (potential energy) และพลังงานที่อยู่ภายในตัวของสารที่นอกเหนือจากพลังงานกลทั้งสองรูปนั้น เรียกว่า พลังงานภายใน (Internal energy) พลังงานรูปนี้ก็คือพลังงานที่ทำให้สารมีอุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้นนั่นเอง ที่ต้องแยกแยะให้ชัดเจนสองประเด็นคือ ประเด็นแรกพลังงานภายในไม่ใช่พลังงานความร้อน เพราะความร้อนจะเกิดเมื่อมีการถ่ายเทพลังงานผ่านขอบเขตระบบ สิ่งที่อยู่ภายในตัวสารคือพลังงานภายในของมัน ประเด็นที่สองคือ พลังงานภายในนี้หมายถึงพลังงานที่อยู่ในตัวสารที่ไม่ไหล หากสารไหลมันจะมีพลังงานอีกรูปหนึ่งเพิ่มขึ้นมาเรียกว่า “พลังงานของการไหล” (Flow energy หรือ Flow work) ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป



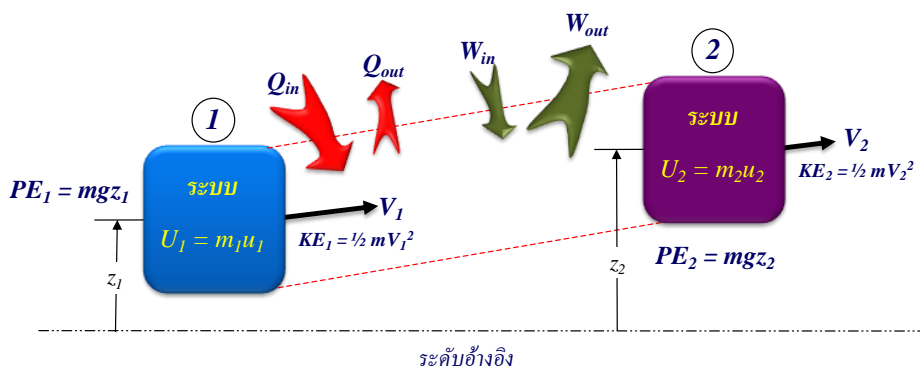
รูปที่ 4.2 พลังงานของสารที่บรรจุในภาชนะ

พลังงานภายในเป็นคุณสมบัติเชิงมวล สัญลักษณ์ U ใช้แทนพลังงานภายในทั้งหมดของระบบซึ่งมีมวล m เช่นเดียวกับคุณสมบัติเชิงมวลอื่น ๆ เรากำหนดให้ u แทนพลังงานภายในต่อหน่วยน้ำหนัก ซึ่งเรียกได้ว่า u คือพลังงานภายในจำเพาะ (Specific internal energy)

4.3 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบปิด

(The First Law of Thermodynamics for a Change in State of a System)

โดยปกติแล้วการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์เรามักวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแต่ละกระบวนการมากกว่าที่จะวิเคราะห์ทั้งวัฏจักรทีเดียว ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงระบบปิดก่อน สมมุติว่ามีระบบปิดใดๆ ระบบหนึ่ง มีสถานะเริ่มต้น คือ สถานะ 1 ซึ่งระบบมีพลังงานภายในเท่ากับ U_1 และกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_1 จึงมีพลังงานจลน์เป็น KE_1 ระบบอยู่สูงกว่าระดับอ้างอิง z ก็จะมีพลังงานศักย์ PE_1 จากนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไปสู่สถานะ 2 ซึ่งก็มีพลังงานรูปแบบต่างๆแบบเดียวกับสถานะแรกและในระหว่างการเปลี่ยนแปลงนั้นมีพลังงานในรูปของความร้อนและงานผ่านเข้าและออกระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 จากสมการที่ 1 จะเขียนได้ว่า



รูปที่ 4.3 แสดงพลังงานรูปแบบต่างๆที่เกี่ยวข้องในระบบปิด

จากสมการที่ 1

$$E_{in} = E_{out} + (E_2 - E_1)$$

$$Q_{in} + W_{in} = Q_{out} + W_{out} + (U_2 + KE_2 + PE_2) - (U_1 + KE_1 + PE_1)$$

$$Q_{in} - Q_{out} = W_{out} - W_{in} + (U_2 + KE_2 + PE_2) - (U_1 + KE_1 + PE_1)$$

$${}_1Q_2 = {}_1W_2 + m_2(u_2 + 1/2V_2^2 + gz_2) - m_1(u_1 + 1/2V_1^2 + gz_1) \quad \dots(4)$$

$$\text{หรือ} \quad {}_1Q_2 = {}_1W_2 + (U_2 - U_1) + \Delta KE + \Delta PE$$

$$\Delta KE = KE_2 - KE_1 = \frac{1}{2}mV_2^2 - \frac{1}{2}mV_1^2 = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2)$$

$$\Delta PE = PE_2 - PE_1 = mgZ_2 - mgZ_1 = mg(Z_2 - Z_1)$$

โดยทั่วไปพลังงานศักย์และพลังงานจลน์มักน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานรูปอื่น จึงสามารถตัดทิ้งได้

และประกอบกับกฎทรงมวลเมื่อไม่มีการถ่ายเทมวลเข้าออกจากระบบมวลทั้งสองสถานะจึงเท่ากัน

สมการที่ 4 จะลดรูปเป็น

$${}_1Q_2 = {}_1W_2 + m(u_2 - u_1) \quad (5)$$

เมื่อ ${}_1Q_2$ คือพลังงานความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทระหว่างสถานะที่ 1 ไป 2 โดยต้องใส่เครื่องหมายทิศทาง

ความร้อนเข้าสู่ระบบเป็นบวก แต่ความร้อนที่ออกจากระบบเป็นลบ มีหน่วยเป็น kJ

${}_1W_2$ คืองานสุทธิที่ถ่ายเทระหว่างสถานะที่ 1 ไป 2 โดยต้องใส่เครื่องหมายทิศทางการเข้าสู่ระบบเป็นลบ แ่งงานที่ออกจากกระบบเป็นลบ มีหน่วยเป็น kJ

m คือมวลของสารในระบบมีหน่วยเป็น kg

u คือพลังงานภายในของสารในระบบมีหน่วยเป็น kJ/kg

1 หมายถึงสถานะเริ่มต้น

2 หมายถึงสถานะสุดท้าย

ตัวอย่างที่ 4.2 ถังบรรจุของเหลวและมีพายกวของเหลวงานที่ใช้ในการหมุนพายเป็น 5,090 kJ และความร้อนที่ถ่ายเทออกจากถังเป็น 1,500 kJ ถ้ากำหนดให้ถังและของเหลวเป็นระบบ จงคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบ

วิธีทำ

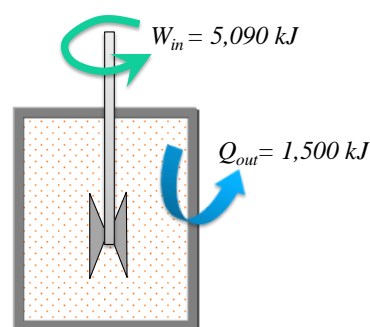
ระบบ กำหนดให้ถังและของเหลวเป็นระบบ - เป็นระบบปิด

สมมติฐาน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

กฎข้อที่ 1 ; ${}_1Q_2 = {}_1W_2 + U_2 - U_1$

แทนค่า $-1,500 \text{ kJ} = U_2 - U_1 + (-5,090 \text{ kJ})$

$$U_2 - U_1 = 3,590 \text{ kJ} \quad \underline{\text{ตอบ}}$$



ตัวอย่างที่ 4.3 ก้อนหินมีมวล 10 kg เดิมอยู่ที่ระดับ 10.2 m เหนือถังซึ่งบรรจุน้ำ 100 kg

ทั้งก้อนหินและน้ำมีอุณหภูมิเท่ากัน จากนั้นหินหล่นลงไปใต้น้ำ

จงหา ΔU , ΔKE , ΔPE , Q และ W สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่กำหนดข้างล่างนี้

กำหนดให้ใช้ความเร่งศูนย์กลางของโลก 9.80665 m/s^2

1) ก้อนหินอยู่ผิวน้ำ

2) ก้อนหินเพิ่งลงไปถึงก้นถัง

3) หลังจากที่มีความร้อนได้ถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อมจนกระทั่งอุณหภูมิเท่าตอนแรก

วิธีทำ กฎข้อที่ 1 ${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + \Delta KE + \Delta PE + {}_1W_2$

1) ก้อนหินอยู่ที่ผิวน้ำ สมมติว่าในขณะที่หินหล่นลงมาไม่มีการถ่ายเทความร้อน กำหนดให้หินคือระบบและสรุปได้ว่า

เมื่อ ${}_1Q_2 = 0$, ${}_1W_2 = 0$, $\Delta U = 0$;

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad -\Delta KE &= \Delta PE = mg(Z_2 - Z_1) \\ &= 10 \text{ kg} \times 9.80665 \text{ m/s}^2 (-10.2 \text{ m}) \end{aligned}$$

$$= -1000 \text{ J} \quad = -1 \text{ kJ}$$

นั่นคือ $\Delta KE = 1 \text{ kJ}, \Delta PE = -1 \text{ kJ}$ ตอบ

2) ก้อนหินเพิ่งถึงก้นถัง

เมื่อ $V = 0, \Delta KE = 0, {}_1Q_3 = 0, {}_1W_3 = 0;$

แทนค่า $0 = U_3 - U_1 + mg(Z_3 - Z_1)$

$Z_3 = Z_2 = 0; \quad \Delta U = U_3 - U_1$

$$= - (10 \text{ kg}) \left(9.80655 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (-10.2 \text{ m}) = 1 \text{ kJ}$$

$\Delta U = 1 \text{ kJ}, \Delta PE = -1 \text{ kJ}$ ตอบ

3) พิจารณาสถานะ 1-4

เมื่อ $\Delta U = 0, {}_1W_4 = 0, \Delta KE = 0;$

แทนค่า ${}_1Q_4 = \Delta PE = mg(Z_4 - Z_1)$

$Z_4 = Z_3 - Z_2 = 0; \quad {}_1Q_4 = mg(Z_2 - Z_1) = -1 \text{ kJ}$ ตอบ

4.4 การวิเคราะห์และเทคนิคในการแก้ปัญหา (Problem Analysis and Solution Technique)

มาถึงจุดนี้เราได้ศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์มากมายพอที่จะพัฒนาเทคนิคหรือวิธีการในการแก้ปัญหาด้านเทอร์โมไดนามิกส์ แม้ว่าในขณะนี้อาจดูไม่จำเป็นนัก แต่ต้องคำนึงเสมอว่าต่อไปจะต้องพบโจทย์ที่สลับซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นการเริ่มฝึกหัดใช้เทคนิคนี้ให้คล่องจะเป็นประโยชน์ต่อไป การวิเคราะห์ปัญหาและเทคนิคในการหาคำตอบที่จะกล่าวนี้ ประกอบด้วยคำถามเป็นข้อ ๆ ซึ่งคำตอบจะเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาโจทย์ ดังนี้

1. ระบบเป็นระบบปิดหรือระบบเปิด? ควรวาดรูประบบจะช่วยได้มาก
2. โจทย์บอกอะไรบ้างเกี่ยวกับสถานะเริ่มต้น? (คุณสมบัติ)
3. ทราบอะไรเกี่ยวกับสถานะสุดท้ายบ้าง?
4. กระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นอย่างไร? มีอะไรคงที่หรือเป็นศูนย์บ้าง? ทราบความสัมพันธ์ของคุณสมบัติใดหรือไม่?

5. เขียนแผนภาพของข้อมูลในข้อ 2-4 เช่น T-v หรือ P-v จะช่วยได้มาก
6. สารตัวกลางเป็นอะไร? (จะใช้ตารางคุณสมบัติหรือกฎของแก๊ส)
7. ปัญหาเกี่ยวข้องกับอะไร? (งานในระบบปิดหรือกฎข้อที่ 1)
8. จะหาคำตอบได้อย่างไร? ต้องใช้วิธีลองผิดลองถูกหรือไม่?

การทำโจทย์ไม่จำเป็นจะต้องเขียนออกมาตามลำดับทั้งหมด แต่เมื่อพบโจทย์ที่ไม่คุ้น ควรจะทบทวนลำดับข้างต้น จะช่วยทำให้นักศึกษาสามารถแก้ปัญหายาก ๆ ได้

ตัวอย่างที่ 4.4 ถังปริมาตร 5 m^3 ภายในบรรจุไอน้ำอิ่มตัว 0.05 m^3 และที่เหลือเป็นไอน้ำอิ่มตัว ที่ความดัน 0.1 MPa จากนั้นให้ความร้อนเข้าไป จนกระทั่งภายในถังเป็นไอน้ำอิ่มตัวทั้งหมด จงหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านเข้าไป

วิธีทำ

ระบบ กำหนดให้ของไหลในถังเป็นระบบ

ระบบนี้เป็นระบบปิด

สมมติฐาน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

และไม่คิดความจุความร้อนของถัง

กฎข้อที่ 1; ${}_1Q_2 = {}_1W_2 + (U_2 - U_1)$

เนื่องจากเป็นถังคงรูป; $V = \text{constant}$ ดังนั้น ${}_1W_2 = 0$

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1$$

$$U_1 = (m_1 u_1)_{\text{liq}} + (m_1 u_1)_{\text{vap}}$$

จากตาราง A.1.2 ที่ความดัน 0.1 MPa ; $v_f = 0.001043 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_g = 1.6904 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$m_{\text{liq}} = \frac{V_{\text{liq}}}{v_f} = \frac{0.05 \text{ m}^3}{0.001043 \text{ m}^3/\text{kg}} = 47.94 \text{ kg}$$

$$m_{\text{vap}} = \frac{V_{\text{vap}}}{v_g} = \frac{4.95}{1.6940} = 2.92 \text{ kg}$$

จากตาราง A.1.2 ที่ความดัน 0.1 MPa ; $u_f = 417.36 \text{ kJ/kg}$, $u_g = 2506.1 \text{ kJ/kg}$

$$U_1 = 47.94(417.36) + 2.92(2506.1) = 27.326 \text{ kJ}$$

ที่สภาวะสุดท้ายเป็นไอน้ำอิ่มตัว ทั้งหมดและ $m_2 = m_1 = 47.94 + 2.92 = 50.86 \text{ kg}$

$$V_2 = V_1 = 5 \text{ m}^3$$

แต่เรายังไม่ทราบว่าสภาวะตอนนี้เป็นอย่างไร รู้แต่ว่าเป็นไอน้ำอิ่มตัว ต้องหาคุณสมบัติอีก 1 อย่าง

$$\text{จาก } v = \frac{V}{m}; \quad v_2 = \frac{5.0 \text{ m}^3}{50.86 \text{ kg}} = 0.09831 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

จากตาราง A.1.2 พบว่าสภาวะนี้จะอยู่ระหว่างความดัน 2.00 และ 2.25 MPa

และจากการ Interpolate ได้ความดัน 2.03 MPa และ $u_g = 2600.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$U_2 = m u_2 = 50.86 (2600.5) = 132.26 \text{ kJ}$$

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 = 132.26 - 27.32 = 104.94 \text{ kJ}$$

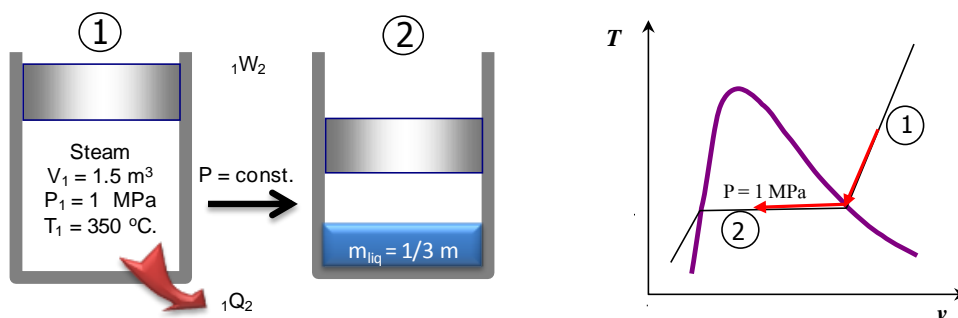
ตอบ

ตัวอย่างที่ 4.5 ไอน้ำบรรจุในกระบอกสูบและลูกสูบ เริ่มแรกอยู่ที่สภาวะ $1 \text{ MPa}, 350^\circ\text{C}$ และ 1.5 m^3

จากนั้นไอน้ำถูกทำให้เย็นลง โดยที่ความดันคงที่ตลอดเวลา จนกระทั่งมีมวลจำนวน $1/3$ ควมนั่นเป็น

ของเหลว จงเขียนแผนภาพ T-v พร้อมเส้นไอน้ำ และหา (ก) มวลของน้ำทั้งหมด (ข) คุณภาพของไอน้ำ

สภาวะสุดท้าย (ค) ปริมาณงานในกระบวนการ และ (ง) ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท



วิธีทำ

ระบบ ควบคุมมวลของน้ำในกระบอกสูบ เป็นระบบปิด

สมมติฐาน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

วิเคราะห์ สสารเป็นไอน้ำ ใช้ค่าคุณสมบัติจากตาราง คำนวณงานจาก $w = \int P dV$ คำนวณความร้อนจากสมการกฎข้อที่ 1 ของระบบปิด ${}_1Q_2 = {}_1W_2 + U_2 - U_1$

กระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการความดันคงที่ สภาวะแรกเป็นไอน้ำ และสภาวะสุดท้ายเป็นของผสม T-v diagram ดังแสดงในรูป

(ก) หามวลของน้ำ พิจารณาสภาวะที่ 1 $P_1 = 1 \text{ MPa}$, $T_1 = 350^\circ\text{C}$ และ $V_1 = 1.5 \text{ m}^3$

ตารางที่ 5 ที่ 1 MPa $T_{\text{sat}} = 179.9^\circ\text{C}$; $T > T_{\text{sat}}$ ดังนั้นเป็นไอน้ำ

ตารางที่ 6 ที่ 1 MPa $T = 350^\circ\text{C}$; $v = 0.2825 \text{ m}^3/\text{kg}$, $u = 2875.2 \text{ kJ/kg}$

$$m = V_1/v_1 = (1.5 \text{ m}^3)/(0.2825 \text{ m}^3/\text{kg}) = 5.31 \text{ kg}$$

ตอบ

(ข) คุณภาพของไอน้ำที่สภาวะสุดท้าย ที่สภาวะสุดท้ายมีมวลของไอน้ำเหลืออยู่ $2/3m$

$$\text{Quality, } x = m_v/m = (2/3m)/m = 2/3 = 0.6667$$

ตอบ

(ค) หาปริมาณงานในกระบวนการ

$$\text{เพราะ } P = \text{constant} \text{ ดังนั้น } {}_1W_2 = \int_1^2 P dV = P(V_2 - V_1) = mP(v_2 - v_1)$$

สภาวะที่ 2 เป็นของผสมที่ความดัน 1 MPa

$$\text{ตารางที่ 5 ที่ 1 MPa: } v_f = 0.001127 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad v_g = 0.19444 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned} v &= v_f + xv_g = (0.001127 \text{ m}^3/\text{kg}) + (0.6667)(0.19444 - 0.001127) \text{ m}^3/\text{kg} \\ &= 0.1300 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$${}_1W_2 = mP(v_2 - v_1) = (5.31 \text{ kg})(1,000 \text{ kPa})(0.1300 - 0.2825) \text{ m}^3/\text{kg} = -809.7 \text{ kJ}$$

ปริมาณงานที่ใส่ให้ระบบในกระบวนการเท่ากับ 809.7 kJ **ตอบ**

$$(ง) \text{ หาปริมาณความร้อน } {}_1Q_2 = {}_1W_2 + U_2 - U_1$$

$$\text{ตารางที่ 5 ที่ 1 MPa: } u_f = 761.68 \text{ kJ/kg}, \quad u_{fg} = 1822.0 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} u &= u_f + xu_{fg} = (761.68 \text{ kJ/kg}) + (0.6667)(1822.0) \text{ kJ/kg} \\ &= 1,976.3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

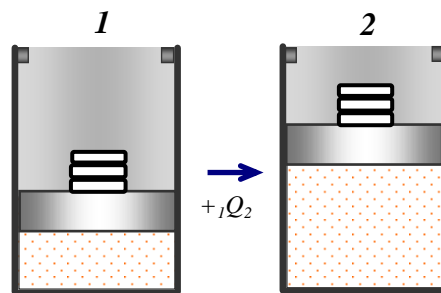
$$U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1) = 5.31 \text{ kg}(1,976.3 - 2875.2) \text{ kJ/kg} = -4,772.7 \text{ kJ}$$

$${}_1Q_2 = {}_1W_2 + U_2 - U_1 = (-809.7 \text{ kJ}) + (-4,772.7 \text{ kJ}) = -5,582.4 \text{ kJ}$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากไอน้ำในระหว่างกระบวนการเท่ากับ 5.58 MJ **ตอบ**

4.5 เอนทัลปี (Enthalpy)

ในการวิเคราะห์กระบวนการต่าง ๆ บ่อยครั้งที่เราพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติบางกลุ่มปรากฏอยู่เสมอ จึงมีการตั้งชื่อเป็นคุณสมบัติตัวใหม่ ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงที่มาของคุณสมบัติตัวใหม่ พิจารณากระบวนการเปลี่ยนแปลงแบบความดันคงที่โดยสมดุล เสมือน (Quasiequilibrium) ดังรูปที่ 4 และไม่มี การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์



รูปที่ 4.4 กระบวนการความดันคงที่โดยสมดุล เสมือน

กฎข้อที่ 1	${}_1Q_2 = {}_1W_2 + U_2 - U_1$	
แต่	${}_1W_2 = \int_1^2 P dV$	
เนื่องจากความดันคงที่	${}_1W_2 = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1)$	
หรือเขียนได้ว่า	${}_1W_2 = P_2V_2 - P_1V_1$	
ดังนั้น	${}_1Q_2 = P_2V_2 - P_1V_1 + U_2 - U_1$	(4.6)
	$= (U_2 + P_2V_2) - (U_1 + P_1V_1)$	

เราพบว่าในกรณีนี้ปริมาณความร้อนที่ให้แก่ระบบขึ้นอยู่กับความเปลี่ยนแปลงของปริมาณ $(U+PV)$

ระหว่างสถานะเริ่มต้นและสุดท้าย ปริมาณนี้ประกอบด้วยคุณสมบัติทั้งนั้น เนื่องจากคุณสมบัติมีค่าขึ้นอยู่กับสถานะเท่านั้นปริมาณอันนี้จึงขึ้นกับสถานะเช่นเดียวกัน ดังนั้นเราจึงกำหนด คุณสมบัติขึ้นมาใหม่ตัวหนึ่ง ชื่อว่า เอนทัลปี ซึ่งเป็นคุณสมบัติอิงมวล

$$H = U + PV \quad (4.7)$$

หรือต่อหน่วยมวล $h = u + Pv \quad (4.8)$

นักศึกษาอาจจะสับสนว่าถ้ากระบวนการที่เกิดขึ้นไม่ใช่กระบวนการความดันคงที่ แล้วค่าเอนทาลปีจะคำนวณได้เช่นเดียวกับค่าข้างบนหรือไม่ ขอเพียงจงจำไว้ว่า เอนทาลปีเป็นคุณสมบัติย่อมขึ้นกับสถานะเท่านั้น ไม่ขึ้นกับกระบวนการเปลี่ยนแปลง ก็จะตัดความสับสนนี้ไปได้

ในตารางคุณสมบัติก็ได้กำหนดค่าเอนทาลปีไว้เช่นกัน แต่เป็นเอนทาลปีจำเพาะสำหรับค่าเอนทาลปีจำเพาะของไอสามารถคำนวณหาได้ โดยวิธีเดียวกันกับปริมาตรจำเพาะ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ

2.5

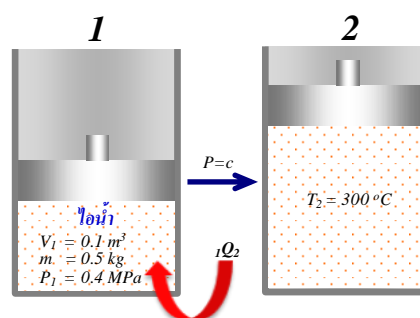
สำหรับตารางสมบัติของไอดง ส่วนมากจะไม่แสดงค่าพลังงานภายในจำเพาะ เราต้องคำนวณหาจากความสัมพัทธ์ $u = h - Pv$

ตัวอย่างที่ 4.6 กระบอกสูบและลูกสูบเดิมมีปริมาตร 0.1 m^3 บรรจุไอน้ำ 0.5 kg ที่ความดัน 0.4 MPa จากนั้นให้ความร้อนเข้าไปจนกระทั่งอุณหภูมิเป็น 300°C โดยที่ความดันคงที่ จงหาปริมาณความร้อนและงานของกระบวนการนี้

วิธีทำ

ระบบ กำหนดให้ไอน้ำในกระบอกสูบเป็นระบบ
ระบบนี้เป็นระบบปิด

สมมติฐาน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ และไม่คิดความจุความร้อนของกระบอกสูบลูกสูบ



กฎข้อที่ 1; ${}_1Q_2 = {}_1W_2 + m(u_2 - u_1)$

$$P = \text{constant:} \quad {}_1W_2 = \int_1^2 P dV = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1) = m(P_2 v_2 - P_1 v_1)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad {}_1Q_2 = m(u_2 - u_1) + m(P_2 v_2 - P_1 v_1) = m(h_2 - h_1)$$

จะหา h_1 ได้เราต้องสามารถกำหนดสถานะของไอน้ำตอนแรกให้ได้เสียก่อน ตอนนี้เรารู้คุณสมบัติอย่างเดียว คือ $P_1 = 0.4 \text{ MPa}$ คุณสมบัติอีกตัวหนึ่งที่จะหาได้ คือ

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{0.1 \text{ m}^3}{0.5 \text{ kg}} = 0.2 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

ตรวจสอบจากตารางไอน้ำตัว (A.1.2) ที่ความดัน 0.4 MPa พบว่า

$$v_f = 0.001084 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{ และ } v_g = 0.4625 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{ ซึ่งมากกว่า } v_1 \text{ แสดงว่าสถานะที่ 1 เป็นไอน้ำ}$$

ดังนั้นต้องหาค่าคุณภาพของไอน้ำ, x

จาก

$$v = v_f + x v_{fg}$$

$$v_{fg} = v_g - v_f = 0.4625 - 0.001084 = 0.461416 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{0.2 - 0.001084}{0.461416} = 0.4311$$

$$h = h_f + x h_{fg} = 604.74 \text{ kJ/kg} + (0.4311 \times 2,133.8) \text{ kJ/kg} = 1,524.6 \text{ kJ/kg}$$

สภาวะ 2 คือ $P_2 = 0.4 \text{ MPa}$, $T_2 = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ตรวจสอบที่ความดัน 0.4 MPa , $T_s = 143.63 \text{ }^{\circ}\text{C} < T_2$ แสดงว่าสภาวะ 2 เป็นไอคง

จากตารางไอคง (A.1.3) ที่ความดัน 0.4 MPa และ $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = 3,066.8 \text{ kJ/kg}$

$$\begin{aligned}\therefore {}_1Q_2 &= (0.5 \text{ kg})(3,066.8 - 1,524.6) \text{ kJ/kg} \\ &= 771.1 \text{ kJ}\end{aligned}$$

$${}_1W_2 = mP(v_2 - v_1)$$

จากตารางที่แล้ว

$$v_2 = 0.6548 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned}{}_1W_2 &= (0.5 \text{ kg})(400 \text{ kPa})(0.6548 - 0.2) \text{ m}^3/\text{kg} \\ &= 91.0 \text{ kJ}\end{aligned}$$

ตอบ

4.6 ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่และที่ความดันคงที่

(The Constant – Volume and Constant – Pressure specific Heats)

ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่และความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่เป็นค่าที่ใช้ประโยชน์ได้มากในการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแก๊ส ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ (C_v) นิยามโดยความสัมพันธ์

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (4.9)$$

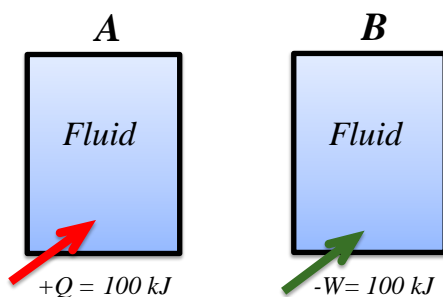
ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (C_p) นิยามโดยความสัมพันธ์

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (4.10)$$

เป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณทั้งสองนิยามด้วยเทอมของคุณสมบัติ ดังนั้นตัวมันเองจึงเป็นคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสสารด้วย นิยามทั้งสองนี้มาจากสมมติฐานว่าส่วนประกอบของสสารไม่เปลี่ยนแปลง และไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงตึงผิว, ไฟฟ้า และแม่เหล็ก

บางครั้งก็ใช้คำว่า ความจุความร้อน (heat capacity) แทนความร้อนจำเพาะ (specific heat) แต่ทั้งสองชื่อก็ยังไม่สื่อความหมายครอบคลุมธรรมชาติของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์อันนี้ เช่น ลองพิจารณาตัวอย่างของระบบดังรูปที่ 4.3 ในสองกรณีคือ กรณีแรกให้ความร้อนแก่ระบบ 100 kJ และกรณีหลังให้งานกระทำต่อระบบ 100 kJ ดังนั้นพลังงานภายในของทั้งสองระบบจะเพิ่มขึ้นเท่ากัน นั่นคือ สภาวะสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้ายของทั้งสองระบบจะเหมือนกัน ดังนั้นจากสมการ (4.9) จะหาความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ได้เท่ากันทั้งสองกรณี แต่ถ้าความร้อนจำเพาะนิยามในเทอมของการส่งถ่ายความร้อน (ตามชื่อของมัน) จะเห็นว่าทั้งสองกรณีนี้จะได้ความร้อนจำเพาะต่างกัน กล่าวคือ กรณีแรกมีการส่งถ่ายความร้อนจำนวนหนึ่งแต่กรณีหลังการส่งถ่ายความร้อนเป็นศูนย์ แม้ว่าชื่อ

ความร้อนจำเพาะหรือความจุความร้อนจะดูไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องคำนึงเสมอว่ามันเป็นคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ และมีนิยามตามสมการ (4.9) และ (4.10)



รูปที่ 4.5 ภาพแสดงวิธีเพิ่มพลังงานภายในสองวิธี

ตัวอย่างที่ 4.7 จงประมาณค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของไอน้ำที่ 0.5 MPa, 375 °C

วิธีทำ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสถานะสมการ (4.10) อาจเขียนได้ว่า

$$C_p = \left(\frac{\Delta h}{\Delta T} \right)_p$$

จากตารางไอน้ำที่ 0.5 MPa, 350 °C; $h = 3167.7$ kJ/kg

0.5 MPa, 400 °C; $h = 3271.9$ kJ/kg

ดังนั้นค่า C_p โดยประมาณที่ 0.5 MPa, 375 °C;

$$C_p = \frac{(3271.9 - 3167.7)}{(400 - 350)}$$

$$C_p = 2.084 \text{ kJ/kg K}$$

ตอบ

4.7 พลังงานภายใน เอนทัลปี และความร้อนจำเพาะของแก๊สจินตภาพ

จากการทดลองของ Joule ในปี ค.ศ.1843 สรุปได้ว่า พลังงานภายในของแก๊สจินตภาพขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวไม่ว่าความดันจะเป็นเท่าไร ดังนั้นสำหรับแก๊สจินตภาพเขียนได้ว่า

$$u = f(T) \quad (4.11)$$

จาก $C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$

แต่สำหรับแก๊สจินตภาพ พลังงานภายในของมันไม่ขึ้นกับปริมาตรจำเพาะ จึงเขียนได้ว่า

$$C_{vo} = \left(\frac{du}{dT} \right)$$

$$du = C_{vo} dT \quad (4.12)$$

$$dU = mC_{vo} dT \quad (4.13)$$

เมื่อ Subscript o หมายถึงแก๊สจินตภาพ

$$\text{และจากค่าจำกัดความของเอนทาลปี} \quad h = u + Pv$$

$$\text{สำหรับแก๊สจินตภาพ} \quad Pv = RT$$

$$h = u + RT \quad (4.14)$$

เนื่องจากค่า R เป็นค่าคงที่และ u ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้น h ขึ้นกับอุณหภูมิอย่างเดียวกัน

$$h = f(T) \quad (4.15)$$

$$\text{จาก} \quad C_p = \left(\frac{\delta h}{\delta T} \right)_p$$

สำหรับแก๊สจินตภาพเอนทาลปีขึ้นกับอุณหภูมิอย่างเดียวไม่ขึ้นกับความดัน จึงเขียนได้ว่า

$$C_{po} = \left(\frac{dh}{dT} \right) \quad dh = C_{po} dT \quad (4.16)$$

$$dH = mC_{po} dT \quad (4.17)$$

เนื่องจากแก๊สทุกชนิดที่ความดันใกล้ศูนย์จะมีค่าใกล้เคียงกับแก๊สจินตภาพมาก ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สจินตภาพของแก๊สแต่ละชนิดจึงมักเรียกเป็น ความร้อนจำเพาะที่ความดันศูนย์ (Zero – Pressure Specific Heat) ค่าเหล่านี้มีแสดงในตาราง A.9

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะทั้งสองของแก๊สจินตภาพเป็นความสัมพันธ์ที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้

$$\text{จาก} \quad h = u + Pv = u + RT$$

$$dh = du + RdT$$

$$C_{po} dT = C_{vo} dT + RdT$$

$$C_{po} - C_{vo} = R \quad (4.18)$$

นั่นคือ ความแตกต่างระหว่างความร้อนจำเพาะทั้งสองเป็นค่าคงที่ และค่า C_{po} มากกว่า C_{vo} เสมอ เพราะ R มีค่าเป็นบวกเสมอแน่นอน

อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ต่อความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่เป็นค่าที่จะพบและได้ใช้ต่อไป มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ (Specific heat ratio) หรือมีอีกชื่อหนึ่งว่า ดัชนีไอเซนโทรปิก (Isentropic – index) มีสัญลักษณ์เป็น k หรือในตำราบางเล่มใช้ γ

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (4.19)$$

ตัวอย่างที่ 4.8 จงหาการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของออกซิเจน 1 kg เมื่อได้รับความร้อนจาก 300 K กลายเป็น 1500 K สมมติให้เป็นแก๊สจินตภาพ

วิธีทำ ใช้ค่าความร้อนจำเพาะจากตาราง A.9

$$\begin{aligned} \bar{h}_2 - \bar{h}_1 &= \int_{T_1}^{T_2} \bar{C}_{po} dT \\ &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \bar{C}_{po}(\theta) \times 100 d\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{h}_{1500} - \bar{h}_{300} &= 100(37.432\theta + \frac{0.020102}{2.5}\theta^{2.5} + \frac{178.57}{0.5}\theta^{-0.5} - 236.88\theta^{-1}) \Big|_{\theta_1=3}^{\theta_2=15} \\ &= 40,525 \text{ kJ/kmol}\end{aligned}$$

$$\therefore \bar{h}_{1500} - \bar{h}_{300} = \frac{\bar{h}_{1500} - \bar{h}_{300}}{M} = \frac{40,525}{32} = 1,266 \text{ kJ/kg} \quad \text{ตอบ}$$

ความร้อนจำเพาะเฉลี่ย (Average specific heat) สำหรับกระบวนการเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$C_{p(av)} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \bar{C}_{po} dT}{T_2 - T_1} \quad (4.20)$$

ดังนั้นสำหรับตัวอย่างที่ 4.6

$$C_{p(av)} = \frac{1266 \text{ kJ/kg}}{(1500 - 300) \text{ K}} = 1.055 \text{ kJ/kg K}$$

ตัวอย่างที่ 4.9 ไนโตรเจนบรรจุในกระบอกสูบเดิมมีปริมาตร 0.1 m^3 150 kPa 25°C จากนั้นอัดลูกสูบจนกระทั่งความดันภายในเป็น 1 MPa และอุณหภูมิเป็น 150°C โดยใช้งานไป 20 kJ และในระหว่างการอัดนั้นมีการถ่ายเทความร้อนออกจากไนโตรเจนด้วย จงคำนวณหาปริมาณความร้อนนี้

วิธีทำ

ระบบ กำหนดให้ไนโตรเจนในกระบอกสูบเป็นระบบ

ระบบนี้เป็นระบบปิด

สมมติฐาน สมมติให้ ไนโตรเจนเป็นแก๊สจินตภาพ

และค่าความร้อนจำเพาะ คงที่

ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

กฎข้อที่ 1; ${}_1Q_2 = {}_1W_2 + m(u_2 - u_1)$

$$= {}_1W_2 + mC_{vo}(T_2 - T_1)$$

เราจะหามวลของไนโตรเจนในกระบอกสูบได้ โดยใช้สมการกำหนดสถานะของแก๊สจินตภาพและใช้

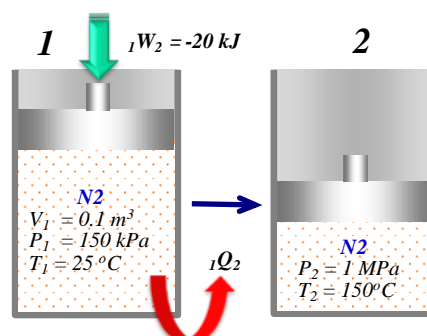
ค่า R จากตาราง A.8 และคำนวณจากสถานะ 1

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{(150 \text{ kPa})(0.1 \text{ m}^3)}{(0.2968 \text{ kJ/kg K})(298.15 \text{ K})} = 0.1695 \text{ kg}$$

สมมติว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะ ใช้ตาราง A.8; $C_{vo} = 0.7448 \text{ kJ/kg K}$

$$\begin{aligned}{}_1Q_2 &= {}_1W_2 + mC_{vo}(T_2 - T_1) \\ &= (-20 \text{ kJ}) + (0.1695 \text{ kg})(0.7448 \text{ kJ/kg K})(150 - 25) \text{ K} \\ &= -4.2 \text{ kJ}\end{aligned}$$

ตอบ



4.8 กฎข้อที่หนึ่งในรูปสมการเชิงอัตรา (The First Law as a Rate Equation)

เรามักพบเสมอว่า จำเป็นที่จะต้องใช้กฎข้อที่หนึ่งในรูปของสมการเชิงอัตรา กล่าวคือ เมื่อพิจารณาพลังงานที่ส่งผ่านระบบในขณะใดขณะหนึ่งหรือในอัตราเฉลี่ยในรูปของงานหรือความร้อนและอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบ พิจารณาในช่วงเวลา δt ซึ่งเกิดการส่งผ่านความร้อนปริมาณ δQ ระบบทำงานในปริมาณ δW พลังงานภายในของระบบเปลี่ยนไป ΔU พลังงานจลน์เปลี่ยนไป ΔKE และพลังงานศักย์เปลี่ยนไป ΔPE

จากกฎข้อที่หนึ่งเขียนได้ว่า

$$\delta Q = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE + \delta W$$

หารด้วย δt จะได้ปริมาณต่าง ๆ เป็นอัตรา

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = \frac{\Delta U}{\delta t} + \frac{\Delta KE}{\delta t} + \frac{\Delta PE}{\delta t} + \frac{\delta W}{\delta t}$$

ถ้าให้ δt เป็นช่วงเวลาสั้น ๆ เกือบเป็นศูนย์จะได้ว่า

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\delta t} = \dot{Q} \quad , \text{ อัตราการส่งถ่ายความร้อน}$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta W}{\delta t} = \dot{W} \quad , \text{ กำลังงาน}$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\delta t} = \frac{dU}{dt}$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta KE}{\delta t} = \frac{d(KE)}{dt}$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta PE}{\delta t} = \frac{d(PE)}{dt}$$

ดังนั้นกฎข้อที่หนึ่งในรูปสมการเชิงอัตราคือ

$$\dot{Q} = \frac{d(U)}{dt} + \frac{d(KE)}{dt} + \frac{d(PE)}{dt} + \dot{W} \quad (4.21)$$

หรืออาจเขียนในรูป

$$\dot{Q} = \frac{dE}{dt} + \dot{W}$$

ตัวอย่างที่ 4.10 ในระหว่างการประจุแบตเตอรี่ใช้กระแสไฟฟ้า 20 A และความต่างศักย์ 12.8 V อัตราการส่งถ่ายความร้อนจากแบตเตอรี่เท่ากับ 10 W จงหาอัตราการเพิ่มพลังงานภายในของแบตเตอรี่

วิธีทำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์สามารถละทิ้งได้ ดังนั้น

สามารถทำในรูปของสมการเชิงอัตราจากสมการ (4.21) คือ

$$\dot{Q} = \frac{dU}{dt} + \dot{W}$$

$$\dot{W} = -VI = -20 \times 12.8 = -256 \text{ W}$$

ดังนั้น

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} = (-10 \text{ W}) - (-256 \text{ W})$$

$$\therefore \frac{dU}{dt} = 246 \text{ W}$$

ตอบ

Concussion : สรุปท้ายบทที่ 4

โดยหลักแล้วในบทนี้กล่าวถึง กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งคือ กฎทรงของพลังงาน ซึ่งกล่าวว่า “พลังงานไม่สามารถถูกทำลายหรือสร้างขึ้นมาใหม่ได้ แต่พลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้” นำมาพิจารณากับระบบต่างๆ ได้ดังนี้

1. กฎข้อที่ 1 กับระบบที่เป็นวัฏจักร สรุปได้ว่าพลังงานรวมทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบจะเท่ากับพลังงานรวมทั้งหมดที่ออกจากระบบ ซึ่งในวัฏจักรมีเพียงความร้อนและงานที่ถ่ายเทเข้าออกเท่านั้น

เพราะฉะนั้น $Q_{\text{net}} = W_{\text{net}}$

2. พลังงานภายใน (Internal Energy) คือ พลังงานที่ทำให้สสารมีอุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่ใช่พลังงานจลน์หรือพลังงานศักย์ พลังงานนี้มีคุณสมบัติอิงมวล สัญลักษณ์ U แทนพลังงานภายในทั้งหมดของมวล m และ สัญลักษณ์ u แทนพลังงานภายในจำเพาะ

3. กฎข้อที่ 1 กับระบบปิด สมมติให้สภาวะ 1 เปลี่ยนแปลงไปสู่สภาวะ 2 ซึ่งทั้ง 2 สถานะประกอบไปด้วย พลังงานภายใน พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ ตามสถานะนั้นๆ จะได้สมการดังนี้

$${}_1Q_2 = {}_1W_2 + m_2(u_2 + \frac{1}{2}v_2^2 + gz_2) - m_1(u_1 + \frac{1}{2}v_1^2 + gz_1)$$

4. การวิเคราะห์และการแก้ปัญหา ประกอบด้วยคำถาม 8 ข้อซึ่งเป็นการเปิดประเด็นเพื่อช่วยแก้ปัญหา โจทย์ที่อาจสลับซับซ้อน จึงต้องมีกระบวนการคิดวิเคราะห์ที่เป็นระบบ

5. เอนทัลปี เนื่องจากการพบคุณสมบัติกลุ่มหนึ่งอยู่เสมอ จึงได้ตั้งเป็นคุณสมบัติใหม่ขึ้นมาคือ

เอนทัลปี $h = u + Pv$

6. ความร้อนจำเพาะ ที่ปริมาตรคงที่ $C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$
 ที่ความดันคงที่ $C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$

7. พลังงานภายใน เอนทัลปี และความร้อนจำเพาะของแก๊สจินตภาพ

พลังงานภายในของแก๊สจินตภาพไม่ขึ้นกับปริมาตรจำเพาะ

ดังนั้น $du = c_{vo}dT$

เอนทัลปีขึ้นกับอุณหภูมิอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับความดัน

ดังนั้น $dh = c_{po}dT$

Exercises : แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4

Source: Cengel, Y.A., and Boles, M.A., *THERMODYNAMICS :An Engineering Approach*, 5th Edition in SI unit, McGraw-Hill, 2006.

Prepared by: Assoc.Prof.Sommai Priprem, PhD.

3-70 A closed system undergoes a cycle consisting of two process. During the first process, 40 kJ of heat is transferred to the system while the system does 60 kJ of work. During the second process, 45 kJ of work is done on the system.

(a) Determine the heat transfer during the second process.

(b) Calculate the net work and net heat transfer for the cycle.

Answers: (a) -25kJ; (b) 15kJ, 15kJ

3-35 A mass of 5 kg of saturated water vapor at 200 kPa is heated at constant pressure until the temperature reaches 300 °C. Calculate the work done by the steam during this process. (430.5 kJ)

3-39 Nitrogen at an initial state of 300 K, 150 kPa, and 0.2 m³ is compressed slowly in an isothermal process to a final pressure of 800 kPa. Determine the work done during this process.

3-41 During an expansion process, the pressure of a gas changes from 100 to 900 kPa according to the relation $P = aV + b$, where $a = 1 \text{ MPa/m}^3$ and b is a constant. If the initial volume of the gas is 0.2 m³, calculate the work during the process. (400 kJ)

3-42 During some actual expansion and compression process in piston-cylinder devices, the gases have been observed to satisfy the relationship $PV^n = C$, where n and C are constant. Calculate the work done when a gas expands from a state of 150 and 0.03 m³ to a final volume of 0.2 m³, for the case of $n = 1.3$.

3-72 A classroom that normally contains 40 people is to be air conditioned with window air-conditioning units of 5-kW rating. A person at rest may be assumed to dissipate heat at a rate of about 360 kJ/h. There are 10 light bulbs in the room, each with a rating of 100 W. The rate of heat transfer to the classroom through the walls and the window is estimated to be 15,000 kJ/h. If the room air is to be maintained at constant temperature of 21°C, determine the number of window air conditioning units required.
Answer: 2 units

3-78 A piston-cylinder device contains 5 kg of refrigerant-12 at 800 kPa and 60°C. The refrigerant is now cooled at constant pressure until it exists as a liquid at 20°C. Determine the amount of heat transfer, and show the process on a T -v diagram with respect to saturation lines.
Answer: -829.25 kJ

3-79 A piston-cylinder device contains 0.2 kg of water initially at 800 kPa and 0.08 m³. Now 180 kJ of heat is transferred to the water while its pressure is kept constant.

Determine the final temperature of the water. Also show the process on a T-v diagram with respect to saturation lines.

3-80 An insulated piston-cylinder device contains 5 L of saturated liquid water at a constant pressure of 150 kPa. Water is stirred by a paddle wheel while a current of 8 A flows for 45 min through a resistor placed in the water. If one-half of the liquid is evaporated during this constant-pressure process and the paddle-wheel work amounts to 300 kJ, determine the voltage of the source. Also, show the process on a P-v diagram with respect to saturation lines.
Answer: 230.9 V

3-81 A piston-cylinder device contains steam initially at 1 MPa, 350°C, and 1.5 m³. Steam is allowed to cool at constant pressure until it first starts condensing. Show the process on a T-v diagram with respect to saturation lines, and determine (a) the mass of the steam, (b) the final temperature, and (c) the amount of heat transfer.

3-82 A piston-cylinder device initially contains steam at 200 kPa, 200°C, and 0.5 m³. At this state, a linear spring ($F \propto x$) is touching the piston but exerts no force on it. Heat is now slowly transferred to the steam, causing the pressure and the volume to rise to 500 kPa and 0.6 m³, respectively. Show the process on a P-v diagram with respect to saturation lines, and determine (a) the final temperature, (b) the work done by the steam, and (c) the total heat transferred.
Answers: (a) 1131°C, (b) 35 kJ, (c) 807 kJ

3-83 A piston-cylinder device initially contains 0.5 m³ of saturated water vapor at 200 kPa. At this state, the piston is resting on a set of stops, and the mass of the piston is such that a pressure of 300 kPa is required to move it. Heat is now slowly transferred to the steam until the volume doubles. Show the process on a P-v diagram with respect to saturation lines and determine (a) the final temperature, (b) the work done during this process, and (c) the total heat transfer.
Answers: (a) 878.90°C, (b) 150 kJ, (c) 875 kJ

3-84 A piston-cylinder device with a set of stops on the top contains 3 kg of saturated liquid water at 200 kPa. Heat is now transferred to the water, causing some of the liquid to evaporate and move the piston up. When the piston reaches the stops, the enclosed volume is 60 L. More heat is added until the pressure is doubled. Show the process on a P-v diagram with respect to saturation lines, and determine

- (a) the amount of liquid at the final state, if any,
- (b) the final temperature, and
- (c) the total work and heat transfer.
