

บทที่ 2

กฎข้อที่หนึ่งและหลักพื้นฐานอื่น ๆ

(The First Law and Other Basic Concepts)

2.2 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (Formulation of the First law of Thermodynamics)

“แม้ว่าจะสมมติว่าพลังงานมีหลายรูปแบบ แต่ปริมาณพลังงานทั้งหมดจะคงที่ และเมื่อพลังงานรูปหนึ่งหายไปจะปรากฏเป็นพลังงานในรูปอื่นทันที” นี่เป็นกฎข้อที่ 1 ของ Thermodynamics

ขอบเขตที่เกี่ยวข้องกับกฎข้อที่ 1 จะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ system และ surroundings

System คือส่วนที่กระบวนการเกิดขึ้น system จะมีขนาดต่างๆ ขึ้นกับสถานะจำเพาะ และจะถูกล้อมรอบด้วยขอบเขต หรือ boundary ซึ่งอาจเป็น boundary จริงหรือสมมติ หรือเป็นของแข็งหรือยืดหยุ่น (flexible) ก็ได้

ส่วนที่ไม่รวมอยู่ใน system จะเป็น surroundings

กฎข้อที่ 1 จะใช้รวมทั้ง system และ surrounding เขียนได้เป็น

$$\Delta(\text{energy of the system}) + \Delta(\text{energy of surroundings}) = 0 \quad (2.1)$$

การเปลี่ยนแปลงของ energy อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ internal energy, potential energy หรือ kinetic energy ของ system

ในทาง thermodynamics ทั้ง heat และ work ถือว่าเป็นพลังงานที่ส่งผ่านผ่าน boundary ที่อยู่ระหว่าง system และ surrounding จะเป็นพลังงานที่ไม่สามารถสะสมหรือเก็บได้ พลังงานจะถูกเก็บภายในวัตถุในรูปของ E_K , E_p และ U การเปลี่ยนแปลงพลังงานจากรูปหนึ่งไปรูปหนึ่ง จะถ่ายเทโดยกลไกของ heat และ work

กรณี **closed system** คือระบบที่ boundary ไม่ยอมให้มวลผ่านแต่ยอมให้ energy ในรูปของ heat และ work ผ่านได้กรณีนี้เทอมที่ 2 ของสมการ (2.1) อาจเขียนได้เป็น

$$\Delta (\text{energy of surroundings}) = Q - W$$

และเมื่อมวลของระบบคงที่ เราจะได้

$$\Delta (\text{energy of the system}) = \Delta U + \Delta E_K + \Delta E_p$$

แทนในสมการ (2.1) จะได้

$$\Delta U + \Delta E_K + \Delta E_p = Q - W \quad (2.3)$$

โดย Q จะมีเครื่องหมาย + เมื่อ system รับความร้อน เป็น - เมื่อเสียความร้อน
 W จะมีเครื่องหมาย + เมื่อ system ให้งานออกมา เป็น - เมื่อรับงานเข้ามา

Closed system ส่วนใหญ่มักเป็นขบวนการที่ E_K และ E_p ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เปลี่ยนเฉพาะ U ฉะนั้นสมการจะลดเป็น

$$\Delta U = Q - W \quad (2.4)$$

หรือในรูป differential changes

$$dU = dQ - dW \quad (2.5)$$

2.4 The Thermodynamic State and State Functions

ในทาง thermodynamics จะแยกชนิดของปริมาณออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ปริมาณที่ไม่ขึ้นกับเส้นทาง (path) ได้แก่ temperature, pressure, และ specific volume เมื่อตรงค่าปริมาณนี้ 2 ค่า จะตรงค่า properties อื่นของสารบริสุทธิ์ที่เป็นเนื้อเดียวกัน นั่นคือจะบอกสถานะ (state) หรือสถานะของสารนั้นได้ เช่น N_2 ที่ 300 K และ 10^5 kPa จะมีค่า v , ρ , μ , และ thermal conductivity ที่แน่นอนค่าหนึ่ง ถ้าสารนี้ทำให้เย็นหรือร้อนหรืออัดหรือขยาย ค่า properties หรือคุณสมบัติก็จะมีค่าคงที่ที่สถานะใหม่นั้น ๆ คุณสมบัตินี้จะไม่ขึ้นกับเส้นทางที่จะไปถึงสถานะใหม่นั้น จะขึ้นกับภาวะปัจจุบัน ปริมาณเหล่านี้เราเรียกว่า state functions ฉะนั้นเมื่อตรงค่า 2 ค่า ของ properties สำหรับสารบริสุทธิ์เนื้อเดียว สถานะทาง thermodynamics (thermodynamic state) ของสารนั้นจะถูกตรึงด้วย

Internal energy เป็น state function เนื่องจากเป็นคุณสมบัติของ system ที่ค่าของมันไม่ขึ้นกับ เส้นทางที่ได้ดำเนินมา เนื่องจาก state function สามารถแสดงในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของโคออดิเนต เช่น T และ P ฉะนั้นค่าของมันจึงระบุเป็นจุดในกราฟได้ การอินทิเกรตจะได้ค่าแตกต่างที่แน่นอนระหว่าง 2 ค่าของ property นั้นเช่น

$$\int_{P_1}^{P_2} dP = P_2 - P_1 = \Delta P$$

หรือ

$$\int_{U_1}^{U_2} dU = U_2 - U_1 = \Delta U$$

Heat และ work ไม่ใช่ state function เนื่องจากค่าของมันขึ้นกับเส้นทาง (path) และไม่สามารถระบุเป็นจุดในกราฟได้ แต่ค่าจะแสดงเป็นพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อมีการอินทิเกรตจะได้ค่าแน่นอน ไม่ใช่ค่าการเปลี่ยนแปลง (Δ) เช่น

$$\int dQ = Q \quad \text{และ} \quad \int dW = W$$

จากการทดลองพบว่ากระบวนการที่เป็น closed system ที่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สถานะเดียวกันที่เส้นทางต่างๆ พบว่าแม้ heat และ work จะต่างกัน แต่ค่า $Q-W$ จะเท่ากันเสมอ แสดงให้เห็นว่าสมการ (2.4) ให้ค่า ΔU เท่ากันจะไม่ขึ้นกับเส้นทางของกระบวนการ แสดงให้เห็นว่า U เป็น state function

ข้อแตกต่างอื่นๆ ระหว่าง state function กับ heat และ work คือ state function เป็นคุณสมบัติของ system และมีค่าเสมอ แต่ heat กับ work จะปรากฏเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในระบบอันเนื่องมาจากกระบวนการซึ่งต้องใช้เวลา

internal energy จะเหมือนกับปริมาตร คือขึ้นกับปริมาณของเนื้อสาร เราเรียกคุณสมบัตินี้ว่า **extensive properties**

ค่า T และ P จะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับปริมาณเนื้อสารที่ประกอบเป็น system จะเป็น **intensive properties**

ส่วนมากเราเขียนสมการในทาง thermodynamics โดยใช้ค่าเป็นต่อหน่วยของสาร ซึ่งอาจเป็นต่อมวลหรือ mole คุณสมบัติ เช่น volume หรือ internal energy จะเป็นค่าต่อหน่วยของสาร ฉะนั้นค่าเหล่านี้จะเป็น intensive properties ไม่ขึ้นกับปริมาณสารที่มีอยู่จริง ๆ

ฉะนั้น U (molar internal energy) v (molar volume) จะเป็น intensive properties

ค่า U จะมีประโยชน์มากในการหา heat และ work สำหรับเครื่องมือ heat exchanger, evaporator, distillation volume และอื่นๆ เนื่องจากเป็น state function เพราะสามารถวัดและแสดงค่าในรูปของตารางที่ขึ้นกับ T และ P ได้ ส่วนค่า Q และ W จะแสดงเป็นค่าในรูปตารางไม่ได้

ตัวอย่างที่ 2.1 พิจารณาน้ำ 1 kg ในน้ำตกซึ่งตกจากที่สูง 100m โดยสมมุติว่าไม่มีพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำ 1 kg นี้กับ surroundings

- ให้หา potential energy ของน้ำบนยอดน้ำตกเมื่อเทียบกับฐานน้ำตก
- kinetic energy เป็นเท่าไร เมื่อน้ำตกตกลงมาก่อนกระทบพื้น
- หลังจากน้ำ 1 kg เข้าสู่น้ำข้างล่างสถานะของมันจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร

วิธีทำ เมื่อไม่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานกับ surrounding Q และ W จะเท่ากับ 0 จาก Eq (2.3)

$$\Delta U + \Delta E_K + \Delta E_p = 0$$

$$(a) \quad E_p = m \frac{zg}{g_c} = \frac{(1)(100\text{m})(9.3066\text{m/s})}{\left(1 \frac{\text{m.kg}}{\text{N.s}^2}\right)} = 980.66 \text{ N.m}$$

(b) ระหว่างที่น้ำตกลงมา $\Delta U = 0$ ฉะนั้นจากสมการบน

$$E_{K_2} - E_{K_1} + E_{p_2} - E_{p_1} = 0$$

$$\text{แต่} \quad E_{K_1} = E_{p_2} = 0 \quad \text{ฉะนั้น}$$

$$E_{K_1} = E_{p_2} = 980.66 \quad \text{N.m} \quad (\text{หรือ J})$$

(c) เมื่อน้ำ 1 kg ตกลงมาจะรวมกับน้ำข้างล่างในแม่น้ำ ค่า kinetic energy จะเปลี่ยนเป็น internal energy

$$\Delta U + \Delta E_K = 0 \quad \text{หรือ} \quad \Delta U = E_{K_2} - E_{K_3}$$

เนื่องจากแม่น้ำมีความเร็วช้ามาก จึงสมมติว่า $E_{K_3} = 0$

$$\therefore \Delta U = E_{K_2} = 980.66 \quad \text{N.m}$$

สรุปคือ potential energy ในที่สุดจะเปลี่ยนเป็น internal energy ซึ่งจะอยู่ในรูปของน้ำที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

$$\text{น้ำ 1 kg มี } T \text{ เพิ่มขึ้น} = \frac{980.66}{4,184} = 0.234^\circ\text{C}$$

(ความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 4,137 J/kg)

ตัวอย่างที่ 2.2 ก๊าซบรรจุในลูกสูบความดันเริ่มแรกของก๊าซเท่ากับ 7 bar และมีปริมาตร 0.10 m³ ถ้าเครื่องมือวางอยู่ในสุญญากาศ ถามว่า energy ของเครื่องมือจะเปลี่ยนไปอย่างไรเมื่อปล่อยให้ลูกสูบเคลื่อนที่ทำให้ปริมาตรขยายตัวเป็น 2 เท่า

วิธีทำ system ในที่นี้คือก๊าซ, ลูกสูบ (piston) และกระบอก (cylinder) และไม่มี work ระหว่างกระบวนการ เพราะ ไม่มีแรงจากนอกกระบอก และไม่มี Q ถ่ายเทออกไปสู่สุญญากาศ

ฉะนั้น Q และ W จะเท่ากับ 0 และ total energy ของ system จะไม่เปลี่ยนอะไรเลย

ตัวอย่างที่ 2.3 ถ้าขบวนการใน ตัวอย่างที่ 2.2 ทำซ้ำ แต่ให้อยู่ในอากาศที่มีความดันมาตรฐาน 101.3 kPa พลังงานของเครื่องมือจะเปลี่ยนอย่างไร สมมติว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องมือกับอากาศช้ามาก

วิธีทำ กรณีนี้ work จะกระทำโดย system โดยผลักลูกสูบไปยังบรรยากาศข้างนอก จาก Eq (1.1)

$$\begin{aligned} W &= P_{\text{atm}} \Delta V = (101.3) (0.2-0.1) = 10.13 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 \\ &= 10.13 \text{ kNm} = 10.13 \text{ kJ} \end{aligned}$$

และ Heat อาจมีการถ่ายเทไป surrounding ด้วย แต่เนื่องจาก W เกิดขึ้นทันทีในขณะที่ Q เกิดขึ้นซึ่งกรณีนี้ให้เป็น 0 จาก Eq (2.3)

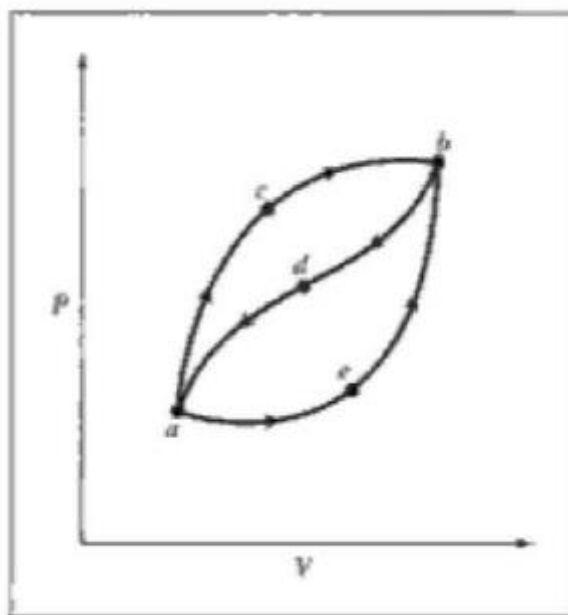
$$\begin{aligned} \Delta (\text{energy of system}) &= Q - W \\ &= 0 - 10.13 = -10.13 \text{ kJ} \end{aligned}$$

∴ total energy ของระบบจะลดลงเท่ากับ work ที่กระทำต่อ surrounding

ตัวอย่างที่ 2.4 เมื่อระบบเปลี่ยนจาก state a ไป b ดังรูป ตามทาง aeb จะมีความร้อน 100 J ไหลเข้า system และ system ทำงาน 40 J อยากทราบว่า heat ไหลเข้าระบบเท่าไรตามเส้นทาง aeb และถ้างานกระทำโดย system เท่ากับ 20 J ถ้างานที่กระทำต่อระบบเท่ากับ 30 J ระบบย้อนกลับจาก b ไป a ตามเส้นทาง bda จะดึงหรือปล่อย heat ออก จำนวนเท่าไร

วิธีทำ เราสมมติว่าระบบเปลี่ยนเฉพาะ U ฉะนั้นจาก Eq (2.4) จากเส้นทาง acb

$$\begin{aligned} \Delta U_{ab} &= Q_{acb} - W_{acb} \\ &= 100 - 40 = 60 \text{ J} \end{aligned}$$



รูปที่ 2.1 แผนภาพสำหรับตัวอย่าง 2.4

นี่คือค่า internal energy ที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะจาก a ไป b ในทุกๆ เส้นทาง
จะนั้นสำหรับเส้นทาง aeb

$$\Delta U_{ab} = 60 = Q_{acb} - W_{acb} = Q_{acb} - 20$$

$$Q_{acb} = 80 \text{ J}$$

สำหรับเส้นทาง bda : $\Delta U_{ba} = -\Delta U_{ab} = -60 = Q_{bda} - W_{bda} = Q_{bda} - (-30)$

$$Q_{bda} = -60 - 30 = -90 \text{ J}$$

จะนั้น Heat จะปล่อยออกจากระบบ

2.5 Enthalpy

นิยามว่า

$$H \equiv U + PV$$

(2.6)

เมื่อ U = internal energy

P = absolute pressure

V = volume

เนื่องจาก U , P และ V เป็น state function ฉะนั้น H ก็เป็น state function ด้วย เขียนในรูปการเปลี่ยนแปลงจะได้

$$\Delta H = \Delta U + \Delta (PV) \quad (2.7)$$

ส่วนใหญ่ค่าแต่ละเทอมจะเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือหนึ่ง mole

ตัวอย่างที่ 2.5 ให้คำนวณหา ΔU และ ΔH สำหรับน้ำ 1 kg เมื่อระเหยที่อุณหภูมิคงที่ 100°C และความดัน 101.33 kPa ค่า specific volumes ของ liquid และ vapor ที่สถานะนี้คือ 0.00104 และ $1.673 \text{ m}^3/\text{kg}$ ในการเปลี่ยนแปลงนี้ต้องใช้ความร้อน 2256.9 kJ

วิธีทำ พิจารณา 1 kg ของน้ำเป็นระบบ สมมติว่าอยู่ในลูกสูบที่ไม่มีความเสียดทาน เมื่อใส่ความร้อนปริมาตรจะเปลี่ยนจาก 0.00104 m^3 เป็น 1.673 m^3 และเมื่อ P คงที่

$$\begin{aligned} \therefore W &= P\Delta V = (101.33 \text{ kPa}) (1.673 - 0.001) \text{ m}^3 \\ &= 169.4 \text{ kPa m}^3 = 169.4 \text{ kJ} \end{aligned}$$

จากสมการ (2.4)

$$\Delta U = Q - W = 2256.7 - 169.4 = 2087.5 \text{ kJ}$$

$$\therefore \Delta H = \Delta U + P\Delta V = 2087.5 + 169.4 = 2256.9 \text{ kJ}$$

ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า $\Delta H = Q$

2.6 กระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว (The Steady – state flow process)

Eqs (2.4) และ (2.5) ใช้กับกระบวนการที่เป็นแบบที่ไม่มีการไหล (nonflow) จะมีการเปลี่ยนแปลงของ U แต่กรณีที่สำคัญในอุตสาหกรรมจะเป็นกระบวนการที่ของไหลเป็นการไหล

แบบคงตัว (steady flow) ผ่านเครื่องมือ คำว่า steady state บอกโดยนัยว่าสถานะที่จุดต่างๆ ในเครื่องมือ จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงหรือขึ้นกับเวลา เช่น อัตราอุณหภูมิหรือความดันจะคงที่ ไม่มีการสะสมของสารหรือพลังงานในเครื่องมือในช่วงเวลาที่พิจารณา

พิจารณาระบบดังรูป 2.2 และให้ system เป็นมวลหนึ่งหน่วยของของไหล
จาก Eq (2.3) จะได้ว่า

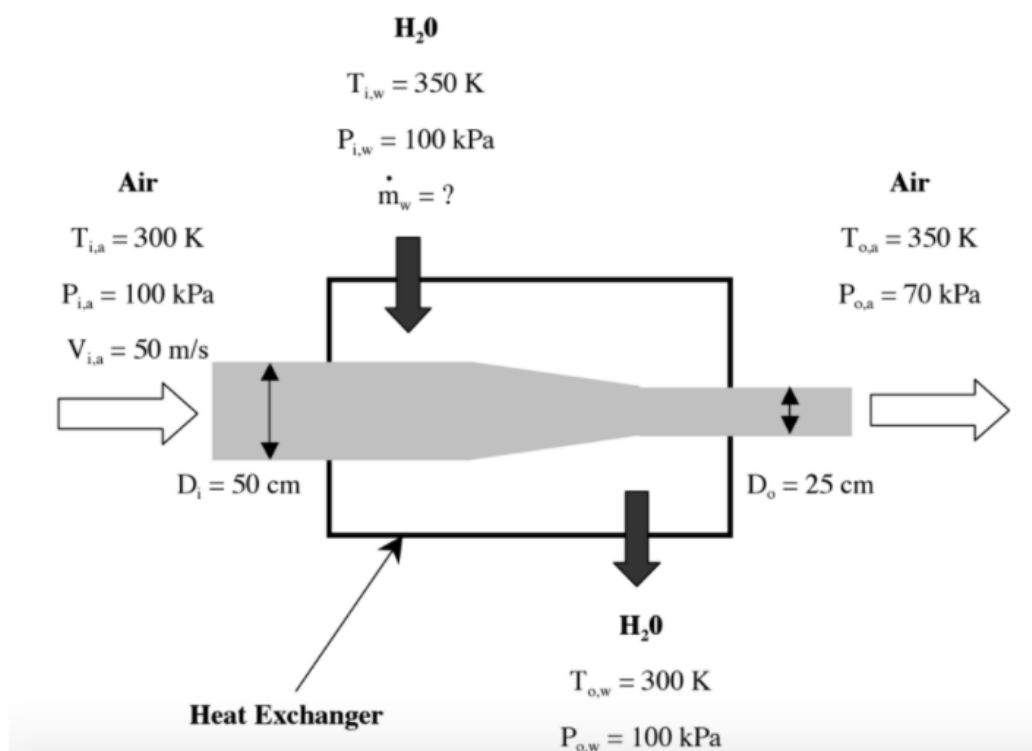
$$\Delta U + \frac{\Delta u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} \Delta z = Q - W \quad (2.8)$$

เมื่อ u เป็นความเร็วเฉลี่ยของ fluid หาจาก volumetric flow rate หารด้วยพื้นที่หน้าตัดขวาง ส่วน W จะประกอบด้วย shaft work และ work ที่เกิดจากการเปลี่ยน P และ V ฉะนั้น

$$\Delta U + \frac{\Delta u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} \Delta z = Q - (W_s + P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

หรือ $\Delta U + \Delta(PV) + \frac{\Delta u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} \Delta z = Q - W_s$

ดังนั้น



รูปที่ 2.2 Steady-state flow process

$$\Delta H + \frac{\Delta u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} \Delta z = Q - W_s \quad (2.9)$$

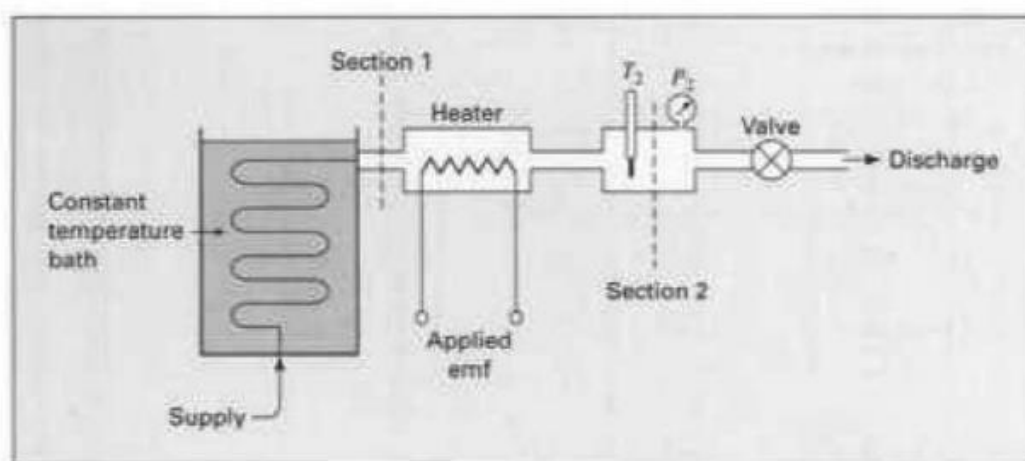
แต่ในการใช้ทั่วไป ค่า kinetic และ potential energy จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ ΔH ฉะนั้น

$$\Delta H = Q - W_s \quad (2.10)$$

ซึ่งทั้ง 2 สมการเป็นสมการเกี่ยวกับของไหลไหลผ่านเครื่องแบบ steady-state flow

คำว่า Shaft work W_s จะหมายถึงงานที่กระทำโดยของไหล หรือถูกกระทำบนของไหลที่ผ่านชิ้นส่วนของเครื่องมือ และส่งผ่านโดยทางแกน (shaft) ที่ยื่นออกมาจากเครื่องมือ อาจโดยที่แกนหมุนหรือชักเข้าชักออก

พิจารณา flow calorimeter ในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 Flow calorimeter

กรณีนี้ไม่มี shaft work และพิจารณา sections 1 และ 2

$$\Delta H = H_2 - H_1 = Q$$

$$\text{หรือ} \quad H_2 = H_1 + Q$$

ในกรณีที่ section 1 เป็นน้ำที่ 0°C ค่า $H_1 = 0$ นั้น

$$H_2 = Q$$

เครื่องมือนี้มีประโยชน์ในการหาค่า H ที่อุณหภูมิ t และความดัน P ใด ๆ ทำให้ได้ตารางต่าง ๆ เช่นกรณีที่เป็น H_2O จะได้ตารางคือ Steam tables ดังที่แสดงใน Appendix C โดยค่า U จะหาจากสมการ (2.6)

ตัวอย่างที่ 2.6 น้ำเมื่อทดสอบใน flow calorimeter ได้ข้อมูลดังนี้

$$\text{อัตราการไหล} = 4.15 \text{ g/s}$$

$$t_1 = 0^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 300^\circ\text{C}$$

$$P_2 = 3 \text{ bar}$$

$$\text{Rate of heat ที่ผ่าน resistance heater} = 12740 \text{ W}$$

และสังเกตเห็นว่าน้ำกลายเป็นไออย่างสมบูรณ์ ให้หา H_2 ที่ 300°C และ 3 bar เทียบกับน้ำที่ 0°C ที่มี $H_1 = 0$

$$\text{วิธีทำ} \quad \text{กรณีนี้} \quad H_2 = Q = \frac{12740 \text{ J/s}}{4.15 \text{ g/s}} = 3070 \text{ J/s}$$

ตัวอย่างที่ 2.7 อากาศที่ 1 bar 25°C เข้า compressor ด้วยความเร็วต่ำและออกที่ 3 bar จากนั้นเข้า nozzle ซึ่งจะขยายตัวได้ความเร็วสุดท้าย 600 m/s ที่อุณหภูมิและความดันเริ่มต้น ถ้า work ของการอัด คือ 240 kJ ต่อ kg ของอากาศ จะต้องเอาความร้อนออกเท่าไรระหว่างการอัด

วิธีทำ กรณี ΔE_p และ ΔE_k จะน้อย และเนื่องจาก T และ P ตอนเริ่มต้นและสุดท้ายเท่ากัน ฉะนั้น $\Delta H = 0$

จาก Eg (2.10) จะได้

$$\begin{aligned} Q &= \frac{u_2^2}{2g_c} + W_s = \frac{(600)^2}{2(1)} + (-240000) \\ &= -6000 \text{ J/kg} = -60 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

เครื่องหมาย- แสดงว่าต้องเอาความร้อนออก 60 kJ ต่อ 1 kg ของอากาศที่อัด

ตัวอย่างที่ 2.8 น้ำ 200°F ถูกปั๊มจากถังเก็บด้วยอัตรา 50 gal/min มอเตอร์ของปั๊มให้งาน 2 hp น้ำจะผ่าน heat exchanger ซึ่งจะให้ความร้อนออกไป 40000 Btu/min แล้วจึงมาที่ถังเก็บถังที่ 2 ซึ่งอยู่สูง 50 ft เหนือถังแรก ค่าอุณหภูมิของน้ำที่เข้าถังที่ 2 จะเป็นเท่าไร

วิธีทำ ค่า u_1 และ u_2 น้อยมากเพราะเป็นความเร็วในถัง (เมื่อเทียบกับ u ในท่อ) จาก Eq (2.10)

$$\Delta H = Q - W_s - \frac{g}{g_c} \Delta z$$

เพราะว่า $1 \text{ ft}^3 = 7.48 \text{ gal}$ และ ρ ของน้ำที่ $200^\circ\text{F} = 60.1 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$

$$50 \text{ gal/min} = \frac{(50)(60.1)}{7.48} = 402 \text{ lb}_m/\text{min}$$

$$Q = -40,000/402 = -99.5 \text{ Btu/lb}_m$$

$$W_s = -(2)(42.41)/402 = -0.21 \text{ Btu/lb}_m (\because 1 \text{ hp} = 42.41 \text{ Btu/min})$$

$$\therefore 778.16 \text{ ft-lb}_f = 1 \text{ Btu}$$

$$\therefore \Delta H = -99.5 - (-0.21) - \frac{32.174(50)}{(32.174)(778.16)} = -99.35 \text{ Btu/lb}_m$$

จาก steam table ที่ 200°F จะได้ $H_1 = 168.09 \text{ Btu/lb}_m$

$$\therefore H_2 = \Delta H + H_1 = (-99.35) + 168.09 = 68.74 \text{ Btu/lb}_m$$

จาก steam table ที่ $H_2 = 69.79 \text{ Btu/lb}_m$ จะได้ $t = 100.74^\circ\text{F}$

จะสังเกตว่า ค่า ΔE_p จะน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมอื่น

2.8 The Phase Rule

จะบอกว่าจะต้องตรึง independent variables (ซึ่งเป็น intensive properties) เช่น T , P , และ compositions ที่ตัวแปร ตัวแปรอื่นๆ จึงจะถูกตรึงด้วย

independent variables ที่ต้องระบุหาจาก degree of freedom F ดังนี้

$$F = 2 - \pi + N \quad (2.12)$$

เมื่อ π = จำนวน phases

N = จำนวนสารเคมี (chemical species)

ตัวอย่าง ที่ triple point ของน้ำ กรณีนี้ $\pi = 3$, $N = 1$ จะได้ $F = 2 - 3 + 1 = 0$

นั่นคือระบบในกรณีนี้จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้จะถูกตรึงไว้แน่นอน ฉะนั้นน้ำจะเป็นของเหลว, ไอ และน้ำแข็งอยู่ด้วยกันใน equilibrium จะเกิดที่ 0.01°C และ 0.00610 bar แน่นอนตายตัว

ตัวอย่างที่ 2.9 degree of freedom ในระบบต่อไปนี้จะเป็นเท่าไร

- (a) น้ำสมดุลกับไอน้ำ
- (b) น้ำสมดุลกับของผสมไอน้ำและ N_2
- (c) สารละลาย alcohol ในน้ำสมดุลกับไอ

วิธีทำ

$$(a) \quad F = 2 - \pi + N = 2 - 2 + 1 = 1$$

นั่นคือระบบนี้ต้องระบุตัวแปรตัวหนึ่ง เช่น T หรือ P แล้วตัวแปรอื่นจะถูกตรึง

$$(b) \quad F = 2 - 2 + 2 = 2$$

นั่นคือต้องระบุตัวแปร 2 ตัว เช่น T และ P จะทำให้สามารถระบุความเข้มข้นออกมาได้

$$(c) \quad F = 2 - 2 + 2 = 2$$

ต้องระบุตัวแปร 2 ตัวแปรอาจเป็น T, P หรือ Composition (weight หรือ mole fraction) เช่นถ้าระบุความเข้มข้นของ alcohol ในน้ำและความดัน ค่า T ของระบบจะถูกตรึงคงที่ที่ค่าหนึ่ง ทำให้ทราบค่าได้

2.9 The Reversible Process

คือขบวนการที่ทิศทางสามารถย้อนกลับได้ที่จุดใด ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงภาวะภายนอกเพียงเล็กน้อย หรือเป็นขบวนการที่ไม่มี friction อยู่ในสภาวะใกล้ equilibrium นั่นเอง ค่า driving force จะมีขนาดเป็น differential

จากสมการ (1.2) และ (1.3)

$$dW = PdV$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

ในทาง thermodynamics การคำนวณ W จะคำนวณกรณี reversible process และโดยอาศัยค่า efficiency จะคำนวณงานของกระบวนการจริงออกมาได้

ตัวอย่างที่ 2.10 piston-cylinder วางในแนวนอนในอ่าง T คงที่ การเลื่อนของลูกสูบไม่คำนึงถึง friction และมี external force มาตรึงต้านความดันก๊าซภายในซึ่งเริ่มต้นมีความดันขนาด 14 bar

เริ่มต้นปริมาตรในทรงกระบอกเป็น 0.03 m^3 ค่า external force จะค่อย ๆ ลดลงจนทำให้ปริมาตรเพิ่มเป็น 2 เท่า จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ภาวะนี้ค่าความสัมพันธ์ PV จะคงที่ทำให้ทำงานที่ทำการเคลื่อนที่โดย external force

และ work ที่กระทำจะเป็นเท่าไร ถ้า external force จะลดลงไปเป็นครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้นทันที

เพราะว่า $PV = k$ หรือ $P = k/V$

$$\text{จาก } W = \int_{V_1}^{V_2} P_2 dV = k \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = k \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$k = P_1 V_1 = (14 \times 10^5) (0.03) = 42000 \text{ J}$$

$$\therefore W = 42000 \ln 2 = 29112 \text{ J}$$

$$\text{ค่า } P_2 \text{ สุดท้าย} = \frac{k}{V_2} = \frac{42000}{0.06} = 700,000 \text{ Pa} = 7 \text{ bar}$$

เมื่อ external force ลดลงทันทีไปเป็นค่าสุดท้าย กรณีนี้

$$W = P (\Delta V) = (7 \times 10^5) (0.06 - 0.03) = 21,000 \text{ J}$$

แสดงว่าขบวนการตอนหลังนี้ไม่ใช่ reversible process และเมื่อเทียบงานกับ reversible จะมี efficiency

$$\frac{21000}{29112} = 0.721 \quad \text{หรือ} \quad 72.1\%$$

2.10 กระบวนการที่ปริมาตรคงที่และความดันคงที่ (Constant-volume and Constant Pressure Processes)

ที่กล่าวมาก่อนทั้งหมด ค่า U และ V ไม่ระบุปริมาณสาร ต่อจากนี้ไปค่า U และ V จะหมายถึง specific หรือ molar properties ฉะนั้นถ้าระบบมีมวล m และ mole n ค่ารวมจะเป็น mU หรือ nU และ mV หรือ nV

ฉะนั้นสมการ first law ทั่วไปคือสมการ (2.5) ซึ่งเป็น non flow และ reversible

$$d(nU) = dQ - dW \quad (2.13)$$

$$dW = Pd(nV) \quad (2.14)$$

กรณี process ที่เกิดที่ปริมาตรคงที่ (non flow)

$$dQ = d(nU) \quad (2.16)$$

$$Q = n\Delta U \quad (2.17)$$

กรณี process เกิดที่ความดันคงที่ (non flow)

$$dQ = d(nH) \quad (2.18)$$

$$Q = n\Delta H \quad (2.19)$$

ฉะนั้นขบวนการที่ P คงที่ enthalpy จะมีบทบาทสำคัญ

2.1.1 Heat Capacity

บอกความสามารถของวัตถุที่จะเก็บความร้อน ถ้าปริมาณความร้อนที่ส่งให้กับวัตถุแล้วมี อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด วัตถุนั้นจะมี heat capacity สูง จากนิยาม

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

กรณีกระบวนการแบบ constant-volume

$$dU = C_v dT \quad (2.22)$$

$$\text{หรือ } \Delta U = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT \quad (2.23)$$

$$Q = n\Delta U = n \int_{T_1}^{T_2} C_v dT \quad (2.24)$$

กรณีกระบวนการแบบ constant-Pressure

$$dH = C_p dT \quad (2.25)$$

$$\text{หรือ } \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (2.26)$$

$$Q = n\Delta H = n \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (2.27)$$

ตัวอย่าง 2.12 Ideal gas มีค่า PV/T คงที่ แก๊สชนิดหนึ่งมีปริมาตร $0.02271 \text{ m}^3/\text{mole}$ ที่ 0°C และ 1 bar ปัญหาต่อไปนี้จะพิจารณาอากาศเป็น ideal gas ซึ่งมี heat capacity คงที่ โดย

$$C_v = \frac{5}{2}R \quad C_p = \frac{7}{2}R$$

เมื่อ $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mole}\cdot\text{K})$ ดังนั้น

$$C_v = 20.781 \quad \text{และ} \quad C_p = 29.099 \text{ J}/(\text{mole}\cdot\text{K})$$

ภาวะเริ่มต้นของอากาศคือ $1 \text{ bar } 25^\circ\text{C}$ ถูกอัดไปที่ $5 \text{ bar } 25^\circ\text{C}$ โดย 2 กลไกแบบ reversible process ให้คำนวณ heat และ work ที่ต้องการ และ ΔU , ΔH ของแต่ละเส้นทาง

- (a) ทำให้เย็นที่ P คงที่ จากนั้นทำให้ร้อนที่ V คงที่
- (b) ทำให้ร้อนที่ V คงที่ ตามด้วยทำให้เย็นที่ P คงที่

วิธีทำ

$$V_1 = (0.02271) \left(\frac{298.15}{273.15} \right) \quad \left(\text{จาก } \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \right)$$

$$= 0.02479 \text{ m}^3$$

ปริมาตรสุดท้ายกรณีนี้ $V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = (0.02479) \left(\frac{1}{5} \right) = 0.004958 \text{ m}^3$

$$\left[\begin{array}{ccc} 298.15 \text{ K} & T & 298.15 \text{ K} \\ 1 \text{ bar} & \longrightarrow & 1 \text{ bar} & \longrightarrow & 5 \text{ bar} \\ 0.02479 \text{ m}^3 & & 0.004958 \text{ m}^3 & & 0.004953 \text{ m}^3 \end{array} \right]$$

(a) ตอนแรกทำให้เย็นที่ P คงที่

$$T = (298.15) \left(\frac{0.004958}{0.02479} \right) = 59.63 \text{ K}$$

$$Q = \Delta H = C_p \Delta T = (29.099) (59.63 - 298.15) = -69401 \text{ J}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะว่า } \Delta U &= \Delta H - \Delta (PV) = \Delta H - P\Delta V \\ &= -6941 - (1 \times 10^5) (0.004958 - 0.02479) = -4958 \text{ J} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 2 เป็นการทำให้ร้อนที่ V คงที่

$$Q = \Delta U = C_v \Delta T = (20.785) (298.15 - 59.63) = 4958 \text{ J}$$

ขั้นตอนสมบูรณ์ 2 ขั้นรวมกันจึงเป็น

$$Q = -6941 + 4958 = -1983 \text{ J}$$

$$\Delta U = -4958 + 4958 = 0$$

$$\text{จาก } \Delta U = Q - W$$

$$W = (-1983) - 0 = -1983 \text{ J}$$

$$\text{จากสมการ (2.8) } \Delta H = \Delta U + \Delta (PV)$$

$$\text{แต่ } T_1 = T_2 \text{ ฉะนั้น } P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \left(\text{จาก } \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_1}{T_2} \right)$$

$$\Delta H = \Delta U = 0$$

$$(c) \quad \begin{array}{ccccc} 298.15 \text{ K} & & T & & 298.15 \text{ K} \\ 0.02479 \text{ m}^3 & \rightarrow & 0.02479 \text{ m}^3 & \rightarrow & 0.0049583 \text{ m}^3 \\ 1 \text{ bar} & & 5 \text{ bar} & & 5 \text{ bar} \end{array}$$

ขั้นแรกทำให้ร้อนที่ V คงที่

$$T = (298.15) \left(\frac{5}{1} \right) = 1470.75 \text{ K}$$

$$Q = \Delta U = C_v \Delta T = (20.78) (1490.75 - 298.15) = 24788 \text{ J}$$

ขั้นที่ 2 ทำให้เย็นที่ P คงตัว

$$Q = \Delta H = C_p \Delta T = (29.099) (298.15 - 1490.75) = -34703 \text{ J}$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta H - P \Delta V = -34703 - (5 \times 10^3) (0.004958 - 0.02479) \\ &= -24788 \text{ J} \end{aligned}$$

ทั้ง 2 ขั้นรวมกันได้

$$Q = 24788 + (-34703) = -9915 \text{ J}$$

$$\Delta U = 24788 + (-24788) = 0$$

$$W = Q - \Delta U = -9915$$

กรณีนี้เช่นเดียวกับข้อ (a) $\Delta H = \Delta U = 0$

จะสังเกตเห็นว่า Q และ W จะขึ้นกับเส้นทาง (path)

ตัวอย่างที่ 2.13 ให้หา ΔU และ ΔH เมื่ออากาศเปลี่ยนจาก 40°F 10 atm โดยมี molar volume $36.47 \text{ ft}^3/\text{lb mole}$ ไปเป็น 140°F , 1 atm สมมุติว่า $\frac{PV}{T} = \text{คงที่}$ และ $C_v = 5$, $C_p = 7 \text{ Btu}/(\text{lb mole}) (^\circ\text{F})$

วิธีทำ การคำนวณอาจแบ่งเป็น 2 ขั้น คือ

(a) ทำให้เย็นที่ V คงที่ไปที่ P สุดท้าย

(b) ทำให้ร้อนที่ P คงที่ไปที่ T สุดท้าย

พิจารณา	1 lb-mole	ของอากาศ
	$40^\circ\text{F}, 499.67 \text{ R}$	$T' \quad 140^\circ\text{F}, 599.67 \text{ R}$
	10 atm	$\rightarrow 1 \text{ atm} \quad \rightarrow 1 \text{ atm}$
	$v = 36.40 \text{ ft}^3$	36.49 ft^3

ขั้น (a) $\frac{PV}{T} = k$ มีค่าคงที่ ฉะนั้นเมื่อ V คงที่ T/P จะคงที่

$$T' = (499.67) (1/10) = 49.97 \text{ R}$$

$$\Delta U_a = C_v \Delta T_a = (5) (49.97 - 499.67) = -2248.5 \text{ Btu/lb-mole}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_a &= \Delta U_a + \Delta PV = \Delta U_a + V \Delta P_a = -2248.5 + (36.49) (1-10)(2.7195) \\ &= -3141.6 \text{ Btu (เพราะว่า } 1 \text{ atm.ft}^3 = 2.7195 \text{ Btu)} \end{aligned}$$

ขั้น (b) $\Delta H_b = C_p \Delta T_b = (7) (599.67 - 49.97) = 3847.9 \text{ Btu/lb-mole}$

$$\Delta U_b = \Delta H_b - P \Delta V_b$$

แต่ $V_2 = \frac{V_1 F_1}{T_1} \times \frac{T_2}{P_2} = \frac{(360.49)(10)}{499.67} \times \frac{599.67}{1} = 437.93 \text{ ft}^3$

$$\therefore \Delta U_b = (3847.9) - (1) (437.93 - 36.43)(2.7195) = 2756.2 \text{ Btu}$$

ฉะนั้นรวม 2 ขั้นเข้าด้วยกัน จะได้

$$\Delta U = -2248.5 + 2756.2 = 507.7 \text{ Btu}$$

$$\Delta H = -3141.6 + 3847.9 = 706.3 \text{ Btu}$$

แบบฝึกหัดบทที่ 2

2.1 ภาชนะที่หุ้มฉนวนและไม่มีเป็นตัวนำไฟฟ้า บรรจุน้ำ 10 kg ที่อุณหภูมิ 20°C ภายในมีตัวกวน (stirrer) ตัวกวนจะทำให้หมุนโดยแรงโน้มถ่วงของก้อนน้ำหนัก 25 kg. ก้อนน้ำหนักจะตกลงมาอย่างช้าๆ ผ่านระยะทาง 10 m เพื่อขับเคลื่อนตัวกวน สมมติว่างานที่กระทำบนก้อนน้ำหนักจะถ่ายเทไปที่น้ำและค่า local acceleration เท่ากับ 9.8 m/s^2 ให้หา

- ปริมาณงานที่กระทำต่อน้ำ
- internal-energy change ของน้ำ
- Final temperature ของน้ำ
- ปริมาณความร้อนที่ต้องเอาออกจากน้ำ เพื่อทำให้น้ำกลับไปที่อุณหภูมิเริ่มต้น
- total energy change ของจักรวาล เนื่องจาก (1) กระบวนการที่ทำให้ก้อนน้ำหนักตกลงมา, (2) กระบวนการที่ทำให้น้ำเย็นลงไปที่อุณหภูมิเริ่มต้น และ (3) ทั้งสองกระบวนการรวมกัน

2.2 ทำข้อ 2.1 อีกครั้ง โดยกรณีนี้อุณหภูมิของภาชนะเปลี่ยนแปลงพร้อมกับน้ำด้วย โดยภาชนะมี heat capacity เทียบเท่ากับน้ำ 3 kg ให้แก้ปัญหาสองแบบคือ (a) ให้น้ำและภาชนะเป็น system และ (b) ให้น้ำเป็น system อย่างเดียว

2.3 น้ำที่ 100°C และ 1 bar มี internal energy เท่ากับ 419.0 kJ/kg และ specific volume $1.044 \text{ cm}^3/\text{g}$

- Enthalpy จะเท่ากับเท่าไร
- ทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำที่ 200°C และ 800 kPa ซึ่งที่สภาวะนี้ไอน้ำมี enthalpy เท่ากับ 2838.6 kJ/kg และ specific volume เท่ากับ $260.79 \text{ cm}^3/\text{g}$ ให้คำนวณหา ΔU และ ΔH สำหรับกระบวนการ

2.4 พิจารณา 1 kg ของสาร

- ความสูงของสารจะเปลี่ยนแปลงเท่าใดเมื่อ potential energy เปลี่ยน 1 kJ
- เริ่มจากหยุดนิ่ง ความเร็วจะถูกเร่งไปเท่าใด เพื่อทำให้ kinetic energy เท่ากับ 1 kJ
- มีข้อสรุปอย่างไรจากผลที่ได้

2.5 ใส่ความร้อน 5 kJ แก่ระบบในขณะที่ internal energy ลดลงไป 10 kJ อยากทราบว่าพลังงานจะเปลี่ยนไปเป็น work เท่ากับเท่าไร และสำหรับกระบวนการที่การเปลี่ยนแปลงสภาวะ (change of state) เหมือนกัน แต่มี work = 0 ความร้อนกรณีนี้จะถ่ายเทเท่าไร

- 2.6 แท่งทองแดงหนัก 0.2 kg มีอุณหภูมิเริ่มต้น 400 K และน้ำซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้น 300 K ถูกใส่ลงในถังหุ้มฉนวน ซึ่งทำด้วยทองแดงหนัก 0.5 kg แล้วปล่อยให้อยู่ในสมดุลย์ การเปลี่ยนแปลงของ energy ของระบบทั้งหมดซึ่งรวมทั้งถังด้วยจะเป็นเท่าใด โดยกรณีไม่คำนึงถึงผลของการขยายตัวและหดตัว และสมมติว่า specific heat มีค่าคงที่ โดยของน้ำเท่ากับ 4.184 J/(g.K) และของทองแดงเท่ากับ 0.380 J/(g.K)
- 2.7 จากข้อที่แล้ว สมมติว่าแท่งทองแดงถูกปล่อยลงไปในน้ำจากความสูง 50 m. และสมมติว่าน้ำไม่สูญเสียออกไปจากถัง การเปลี่ยนแปลง internal energy ของน้ำจะเป็นเท่าใด
- 2.8 ไนโตรเจนไหลที่สภาวะ steady-state ในท่อที่วางในแนวราบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2 นิ้ว และเกิดความดันลด (pressure drop) เมื่อไหลผ่านวาล์วที่เปิดบางส่วน โดยกระแสเหนือวาล์วมีความดัน 80 psia อุณหภูมิเท่ากับ 100°F และความเร็วเฉลี่ย 15 ft/s ถ้าความดันของกระแสใต้วาล์วเท่ากับ 20 psia อุณหภูมิของกระแสใต้วาล์วจะเป็นเท่าใด สมมติว่าก๊าซไนโตรเจนมี $PV/T = \text{ค่าคงที่}$, $C_v = (5/2)R$ และ $C_p = (7/2)R$
- 2.9 น้ำที่ 70°F ไหลผ่านท่อตรงในแนวราบที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนและงานกับสิ่งแวดล้อมด้วย ความเร็ว 30 ft/s ท่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1 นิ้ว ให้หา enthalpy change ของน้ำเมื่อไหลผ่านท่อ 1.5 นิ้วทันที และเมื่อผ่านท่อ 3 นิ้ว
- 2.10 น้ำไหลผ่านขดท่อที่วางในแนวราบและถูกทำให้ร้อนโดย flue gases เมื่อน้ำไหลผ่านขดท่อน้ำจะเปลี่ยนสภาวะจาก 2 atm และ 180°F ไปเป็น 1 atm และ 250°F ถ้าความเร็วตอนเข้าเท่ากับ 10 ft/s และทางออกเท่ากับ 600 ft/s ให้หา heat ที่ถ่ายเทผ่านขดท่อต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำ โดย enthalpy ของน้ำเข้าเท่ากับ 148 Btu/lb_m และขาออกเท่ากับ 1168.8 Btu/lb_m
- 2.11 ระบบที่ประกอบด้วย n-butane และ propane และมี 2 เฟส อยู่ในสมดุลย์ระหว่างของเหลวและไอที่ความดัน 10 bar และ 323 K mole fraction ของ propane ใน vapor phase เท่ากับ 0.67 และใน liquid phase เท่ากับ 0.40 ถ้า propane บริสุทธิ์ถูกเติมลงไปในระบบและนำไปสู่สมดุลย์ที่อุณหภูมิและความดันเหมือนเดิม โดยที่ยังปรากฏมี vapor และ liquid phases อยู่ผลของการเติม propane ต่อ mole fractions ของ propane ใน liquid และ vapor phases จะเป็นอย่างไร

2.12 ใน natural gasoline fractionation system จะมีสารเคมีปรากฏอยู่คือ methane ethane propane, isobutane, n-butane, และ n-pentane ถ้าเอาของผสมของสารเคมีเหล่านี้ไปใส่ในภาชนะปิดที่เอาอากาศเหลวออกแล้ว ให้หาจำนวน phase rule variables ที่ต้องเลือกเพื่อจะตรึงองค์ประกอบของทั้งสองเฟสได้

2.13 สำหรับก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ $C_v = 20.8$ และ $C_p = 29.1 \text{ J(mole}^\circ\text{C)}$

(a) ไนโตรเจน 5 โมล ที่ 80°C บรรจุในภาชนะแข็ง ให้ความร้อนที่ต้องให้แก่ระบบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิไปเป็น 300°C เมื่อสมมติว่าภาชนะไม่มีความจุความร้อน และถ้าภาชนะมีมวล 100 kg มี heat capacity เท่ากับ $0.5 \text{ J/(g}^\circ\text{C)}$ จะต้องให้ความร้อนเท่าใด

(b) ไนโตรเจน 3 โมล ที่ 230°C ถูกบรรจุในลูกสูบ (piston/cylinder arrangement) จะต้องดึงความร้อนออกจากระบบเท่าใด เพื่อลดอุณหภูมิลงเป็น 80°C โดยที่ความดันคงที่ สมมติว่าลูกสูบและกระบอกสูบไม่มีความจุความร้อน

2.14 Internal energy U^t ของก๊าซจำนวนหนึ่ง หาจากสมการ

$$U^t = 1.5 PV^t$$

เมื่อ P มีหน่วย psia และ V^t มีหน่วย ft^3 กระบวนการของก๊าซดำเนินไปแบบ reversible process จากสถานะเริ่มต้นที่ 1500 psia และ 500 R ระหว่างกระบวนการนี้ V^t มีค่าคงที่เท่ากับ 10 ft^3 และ P เพิ่มขึ้น 50% ให้คำนวณหาค่า Q และ ΔH^t (หน่วย Btu) ของกระบวนการนี้

2.15 เส้นทางที่ดำเนินไปของก๊าซในกระบวนการเชิงกล reversible process แสดงได้จากสมการ

$$P + aV^t = c$$

เมื่อ a และ c เป็นค่าคงที่ ในภาวะเริ่มต้น $P_1 = 60 \text{ bar}$ และ $V^t = 0.002 \text{ m}^3$ และในภาวะสุดท้าย $P_2 = 20 \text{ bar}$ และ $V_2^t = 0.004 \text{ m}^3$ และในระหว่างกระบวนการ ความร้อน 5000 J ได้ถ่ายเทไปสู่ก๊าซ ให้คำนวณ W และ ΔU^t และถ้าสมมติว่าก๊าซดำเนินไปในเส้นทางอื่น โดยที่ภาวะเริ่มต้นและสุดท้ายยังเหมือนเดิม ปริมาณ Q , W และ ΔU^t ตัวไหนที่ไม่เปลี่ยนแปลงเพราะอะไร

2.16 สารชนิดหนึ่งดำเนินแบบ mechanically reversible process ขยายตัวจากภาวะเริ่มต้น 20 bar ไปเป็นสภาวะสุดท้ายที่ 8 bar เส้นทางของกระบวนการอธิบายได้โดยสมการ

$$P = \frac{0.036}{V^t} - 4$$

เมื่อ P มีหน่วยเป็น bar และ V^t มีหน่วย m^3 ถ้า $\Delta U^t = -1400 \text{ J}$ ให้คำนวณหา W , Q และ ΔH^t

17. หนึ่งกิโลกรัมของอากาศถูกทำให้ร้อนแบบ reversible ที่ความดันคงที่จากภาวะเริ่มต้น 300 K และ 1 bar ไปเป็นจนกระทั่งปริมาตรเป็น 3 เท่า ให้คำนวณหา W , Q , ΔU และ ΔH ของกระบวนการนี้ สมมติว่าอากาศเป็นไปตามความสัมพันธ์ $PV/T = 83.14 \text{ bar cm}^3/(\text{mole.K})$ และ $C_p = 29 \text{ J}/(\text{mole.K})$
-