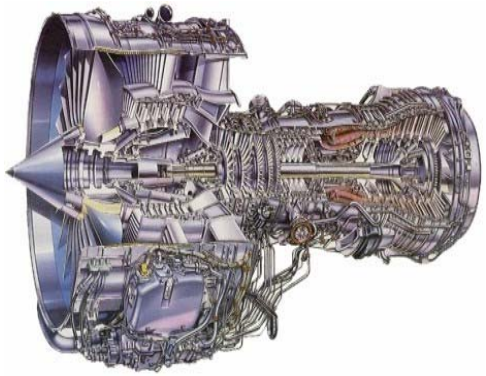
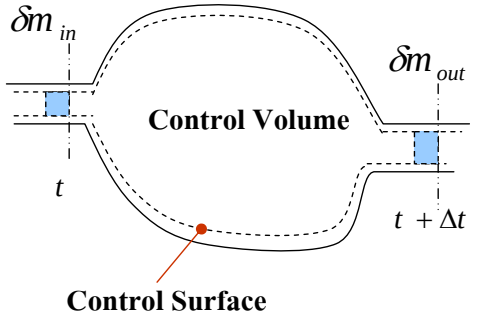
บทที่ 8

กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับระบบเปิด
The First Law of Thermodynamics for Open Systems



8.1 ปริมาตรควบคุม (Control Volume)

(สมการต่อเนื่องของมวล) Continuity of mass



รูปที่ 8.1 แสดงมวลที่ไหลผ่านระบบเปิด (ปริมาตรควบคุม)

$$\delta m_{in} - \delta m_{out} = m_{cv\,2} - m_{cv\,1} \qquad \text{.....(8.1.1)}$$

$$\frac{\delta m_{in}}{\Delta t} - \frac{\delta m_{out}}{\Delta t} = \frac{m_{cv\,2} - m_{cv\,1}}{\Delta t}$$

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \left[\frac{dm}{dt}\right]_{cv} \qquad \text{.....(8.1.2)}$$

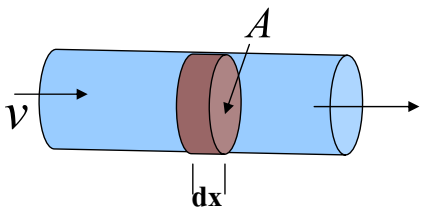
$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \left[\frac{dm}{dt}\right]_{cv}$$

$\dot{m}_{in} > \dot{m}_{out}$ มวลภายในปริมาตรควบคุมเพิ่มขึ้น

$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$ มวลภายในปริมาตรควบคุมคงที่

$\dot{m}_{in} < \dot{m}_{out}$ มวลภายในปริมาตรควบคุมลดลง

อัตราการไหล (mass flow rate)



รูปที่ 8.2 แสดงการไหลของของไหลผ่านช่องปิด

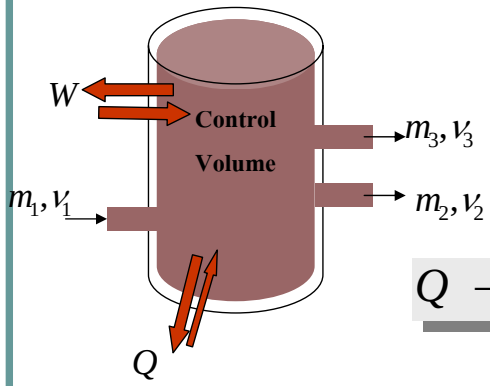
$$\delta m = \rho A dx$$

$$\dot{m} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A v$$

$$\dot{m} = \frac{Av}{v} \quad \text{.....(8.1.3)}$$

8.2 กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับระบบเปิด

The First Law of Thermodynamics for Open Systems



จากสมการที่ (8.2.1) สมการทั่วไปของสมการกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์

$$Q - W = \Delta E \quad \text{.....(8.2.1)}$$

รูปที่ 8.3 แสดงการแลกเปลี่ยนพลังงานในระบบเปิด

<u>สำหรับระบบเปิด</u> กฎข้อที่ 1 สำหรับระบบเปิดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (8.2.2)

พ.ที่เข้า = พ.ที่ออก + พ.ที่เปลี่ยนไปของระบบ

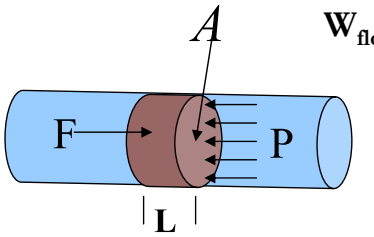
$$Q_{cv} + \sum E_{in} = W_{cv} + \sum E_{out} + \Delta E_{sys} \quad \text{.....(8.2.2)}$$

8.3 พลังงานของการไหล (Flow Energy)

พลังงานของการไหล = PV .....(8.3.1)

$$F = P.A$$

$$W_{flow} = F.L = P.A.L = PV \quad \text{.....(8.3.2)}$$



รูปที่ 8.4 แสดงการไหลของของไหลภายใต้ความดัน

พลังงานของตัวของไหล, $E_{flow} = U + PV + KE + PE$ .....(8.3.3)

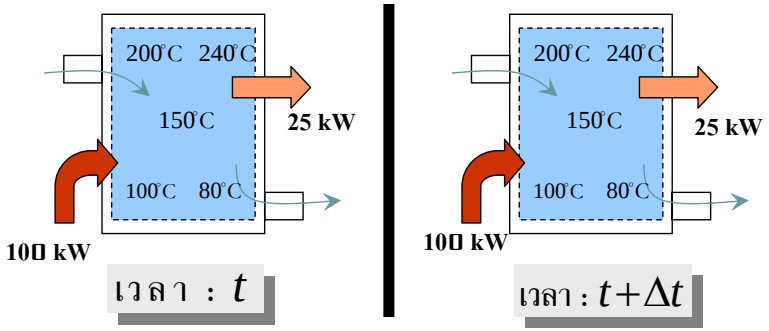
$$= H + KE + PE$$

$$E_{flow} = m\left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right) \quad \text{.....(8.3.4)}$$

8.4 กระบวนการไหลคงที่และสภาวะคงที่ (Steady State-Steady Flow Process, SSSF)

สมมติฐานของ SSSF

1. คุณสมบัติของสารตัวกลางที่ตำแหน่งต่างๆภายในปริมาตรควบคุมไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (สภาวะคงที่, $\Delta E_{sys} = 0$)
2. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม $\left[\frac{dm}{dt}\right]_{cv} = 0 \rightarrow \sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$
3. อัตราการถ่ายเทความร้อนและงานผ่านผิวควบคุมมีค่าคงที่
4. ปริมาตรควบคุมไม่เคลื่อนที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิง



รูปที่ 8.5 แสดงกระบวนการไหลคงที่และสภาวะคงที่

สมการกฎข้อที่ 1 สำหรับระบบเปิด กระบวนการไหลคงที่และสภาวะคงที่

$$Q_{cv} + \sum E_{in} = W_{cv} + \sum E_{out} + \Delta E_{sys} \quad \text{.....(8.4.1)}$$

$$Q_{cv} + \sum E_{in} = W_{cv} + \sum E_{out}$$

$$Q_{cv} + \sum m_i \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_i = W_{cv} + \sum m_e \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_e$$

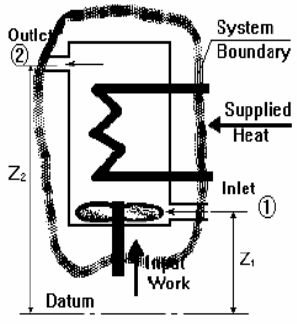
เขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงอัตรา

$$\dot{Q}_{cv} + \sum \dot{m}_i \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_i = \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_e \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_e \quad \text{...(8.4.2)}$$

กรณีระบบมีทางไหลเข้า 1 ทาง และไหลออก 1 ทาง ดังรูป

$$\dot{Q}_{cv} + \dot{m}_i \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_i = \dot{W}_{cv} + \dot{m}_e \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_e \quad \text{.....(8.4.3)}$$

SSSF กรณีระบบมีทางไหลเข้า 1 ทาง และไหลออก 1 ทาง $\dot{m}_i = \dot{m}_e$

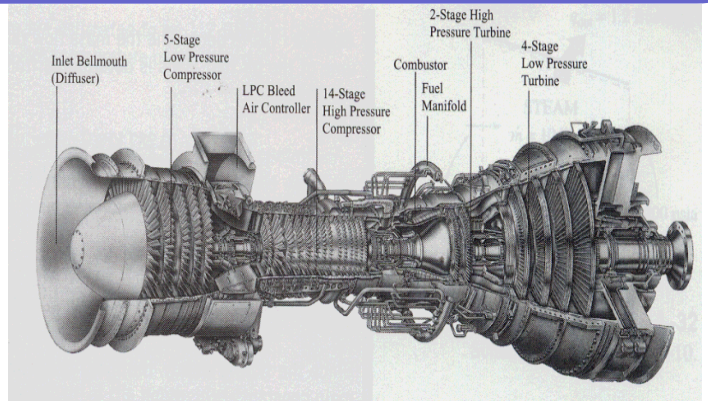


$$q_{cv} + \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_i = w_{cv} + \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_e$$

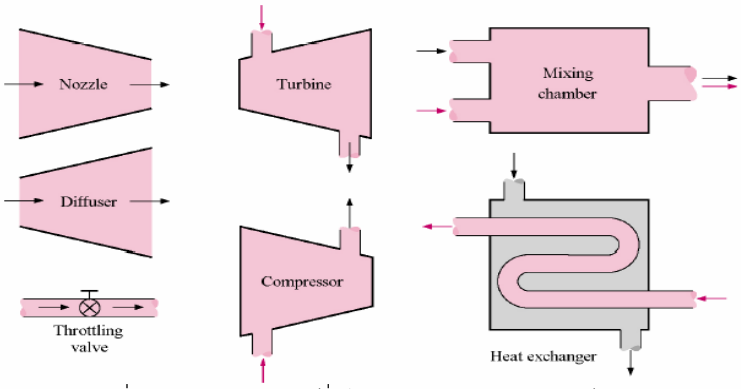
.....(8.4.4)

รูปที่ 8.6 ภาพประกอบการวิเคราะห์กระบวนการไหลคงที่และสภาวะคงที่

ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้สมมติฐาน SSSF ในการวิเคราะห์



รูปที่ 8.7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้สมมติฐาน SSSF ในการวิเคราะห์

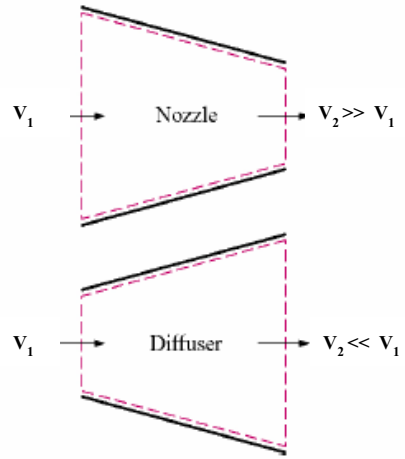


รูปที่ 8.8 ภาพจำลองอุปกรณ์ที่ใช้สมมติฐาน SSSF ในการวิเคราะห์

8.4.1 Nozzle & Diffuser

สมมติฐาน 1) $Q_{CV} \cong 0$ 2) $\Delta PE \cong 0$ 3) $W_{cv} \cong 0$

โดยปกติมักมีทางไหลเข้า และทางไหลออก อย่างละ 1 ทาง



$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$
$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$
$$\dot{m}\left(h_1 + \frac{\vec{V}_1^2}{2}\right) = \dot{m}\left(h_2 + \frac{\vec{V}_2^2}{2}\right) \quad \text{.....(8.4.5)}$$

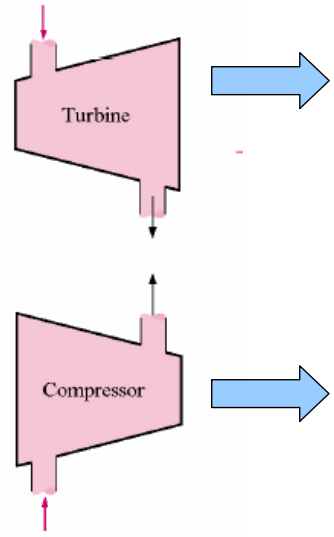
$$\vec{V}_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2) + \vec{V}_1^2} \quad \text{.....(8.4.6)}$$

รูปที่ 8.9 ภาพจำลองการไหลผ่าน Nozzle& Diffuser ซึ่งสามารถใช้สมมติฐาน SSSF ในการวิเคราะห์

8.4.2 Turbine & Compressor

สมมติฐาน 1) $Q_{CV} \cong 0$ 2) $\Delta KE \& \Delta PE \cong 0$ 3) $W_{cv} \neq 0$

โดยปกติมักมีทางไหลเข้า และทางไหลออก อย่างละ 1 ทาง



$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$
$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$
$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{W}_{out}$$
$$\dot{W}_{out} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad \text{.....(8.4.7)}$$

$$-\dot{W}_{net} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$
$$-(-\dot{W}_{in}) = \dot{m}(h_2 - h_1)$$
$$\dot{W}_{in} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad \text{.....(8.4.8)}$$

รูปที่ 8.10 ภาพจำลองการไหลผ่าน Turbine& Compressor ซึ่งสามารถใช้สมมติฐาน SSSF ในการวิเคราะห์

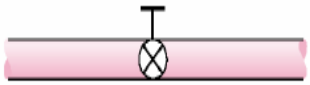
รูปที่ 8.11 แสดงภาพใบจักรของกังหันไอน้ำ

รูปที่ 8.12 แสดงภาพใบจักรและตัวเรือนของ Axial flow compressor

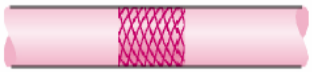
8.4.3 Throttling Devices (Throttling Process)

สมมติฐาน 1) $Q_{CV} \cong 0$ 2) $\Delta KE \& \Delta PE \cong 0$ 3) $W_{cv} \cong 0$

โดยปกติมักมีทางไหลเข้า และทางไหลออก อย่างละ 1 ทาง



(a) An adjustable valve



(b) A porous plug

(c) A capillary tube

รูปที่ 8.13 ภาพจำลองการไหลผ่าน Throttling Devices ซึ่งสามารถใช้สมมติฐาน SSSF ในการวิเคราะห์

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e$$
$$\dot{m}_i h_i = \dot{m}_e h_e$$
$$\boxed{h_i = h_e} \quad \text{.....(8.4.9)}$$

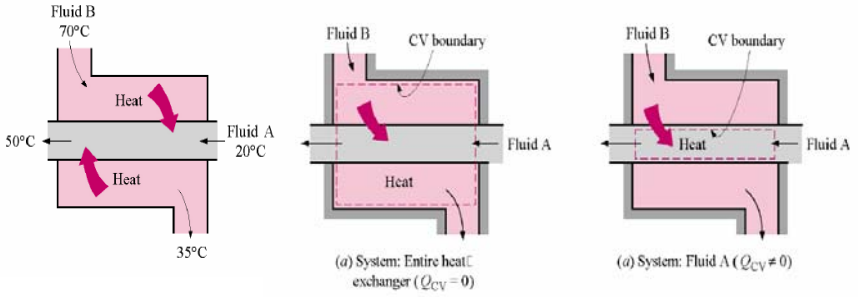
หากสารตัวกลางเป็น Ideal Gas จะได้;

$$h_i = h_e$$
$$h_e - h_i = 0$$
$$\int_i^e C_p(T)dT = 0$$
$$or$$
$$T_e = T_i \quad \text{.....(8.4.10)}$$

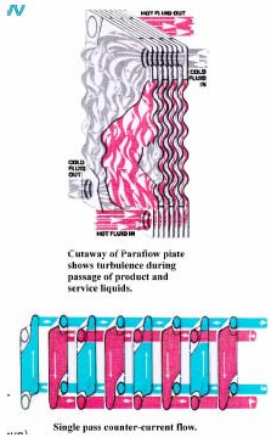
8.4.4 Heat Exchanger

สมมติฐาน 1) $Q_{CV} \cong 0$ หรือ $Q_{CV} \neq 0$ ขึ้นอยู่กับการเลือก Control volume

2) $\Delta KE \& \Delta PE \cong 0$ 3) $W_{CV} \cong 0$



รูปที่ 8.14 ภาพจำลองการไหลผ่าน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสามารถใช้สมมติฐาน SSSF ในการวิเคราะห์



รูปที่ 8.15 แสดงภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นขนานขนาดใหญ่

8.5 กระบวนการไหลสม่ำเสมอและสภาวะสม่ำเสมอ (Uniform State-Uniform Flow Process, USUF)

สมมติฐานของ USUF

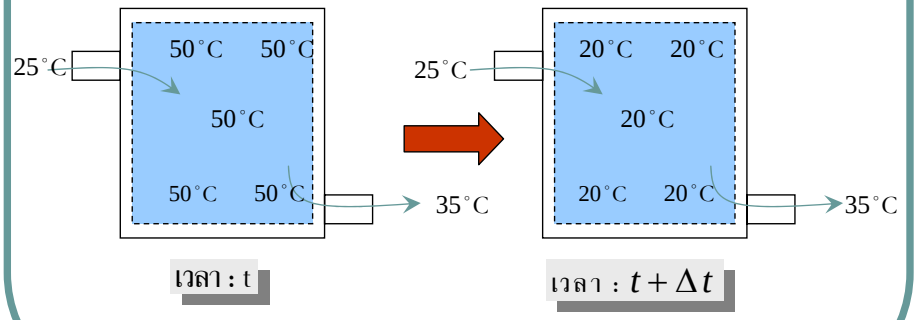
1. คุณสมบัติของสารตัวกลางภายในปริมาตรควบคุม,มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาตรควบคุม (สภาวะสม่ำเสมอ) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้อาจเปลี่ยนไปตามเวลา

$$\Delta E_{sys} \neq 0$$

2. คุณสมบัติของมวลสารที่ไหลผ่านผิวควบคุมมีค่าคงที่ แต่อัตราการไหลเชิงมวลอาจเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} + \frac{\Delta m_{cv}}{\Delta t} \qquad \text{.....(8.4.11)}$$

3. ปริมาตรควบคุมไม่เคลื่อนที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิง



รูปที่ 8.16 แสดงกระบวนการไหลคงที่และสภาวะคงที่

สมการกฎข้อที่ 1 สำรับระบบเปิด กระบวนการไหลสม่ำเสมอและสภาวะสม่ำเสมอ

$$Q_{cv} + \sum E_{in} = W_{cv} + \sum E_{out} + \Delta E_{sys} \quad \text{.....(8.4.12)}$$

$$\Delta E_{sys} = E_2 - E_1 = (U + KE + PE)_2 - (U + KE + PE)_1$$

$$= m_2\left(u + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_2 - m_1\left(u + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_1$$

$$Q_{cv} + \sum m_i\left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_i = W_{cv} + \sum m_e\left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_e +$$

$$m_2\left(u + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_2 - m_1\left(u + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_1 \quad \text{.....(8.4.13)}$$

กรณีระบบมีทางไหลเข้า 1 ทาง และไหลออก 1 ทาง

$$Q_{cv} + m_i\left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_i = W_{cv} + m_e\left(h + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_e +$$

$$m_2\left(u + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_2 - m_1\left(u + \frac{v^2}{2} + gZ\right)_1 \quad \text{.....(8.4.14)}$$