Thermodynamics I

Assoc.Prof.Sommai Priprem, Ph.D.

Chapter 8 : Second Law Analysis for a Control Volume

บทที่ 8
การวิเคราะห์ระบบเปิดด้วยกฎข้อที่สอง
(Second Law Analysis for a Control Volume)

ในสองบทที่ผ่านมาเราได้พูดถึงกฎข้อที่สองและเอนโทรปี ส่วน ในบทนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้กฎข้อนี้กับระบบเปิด และกล่าวถึงหัวข้อสำคัญอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

8.1 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิคส์สำหรับระบบเปิด

(The Second Law Analysis for a Control Volume)

กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิคส์สามารถประยุกต์ใช้กับการเปลี่ยนแปลงในระบบได้ด้วยวิธีการคล้าย ๆ กับกฎข้อที่หนึ่ง ในระบบเปิดในทั่วๆ ไป เมื่อพิจารณาในช่วงเวลา δt ความร้อนส่งถ่ายจากสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ T และ เนื่องจากเอนโทรปีเป็นคุณสมบัติ ดังนั้นมันจึงมีการขนถ่ายได้เหมือนกับเอนธาลปีและพลังงานภายใน ปริมาณเอนโทรปีที่เข้าสู่ระบบในช่วงเวลา δt คือ $\delta m_i s_i$ และปริมาณที่ออกจากระบบคือ $\delta m_e s_e$ ความร้อนที่ส่งผ่านเข้าสู่ระบบจะทำให้เอนโทรปีของระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้น

เอนโทรปีเข้าสู่ระบบเนื่องจากการส่งถ่ายความร้อน = $\Sigma_{C.V.}\left(\frac{\delta Q}{T}\right)$ (8.1)

และเอนโทรปีที่เพิ่มขึ้นของระบบเนื่องจากการไหลของมวลคือ

$$s_1 - s_2 = (s_{t+\delta t} - s_t) + (s_e \delta m_e - s_i \delta m_i) \quad (8.2)$$

โดย s_t คือ เอนโทรปีในปริมาตรควบคุมที่เวลา t

$s_{t+\delta t}$ คือ เอนโทรปีในปริมาตรควบคุมที่เวลา $t + \delta t$

$s_1 = s_t + s_i \delta m_i$ คือ เอนโทรปีของระบบที่เวลา t

$s_2 = s_{t+\delta t} + s_e \delta m_e$ คือ เอนโทรปีของระบบที่เวลา $t + \delta t$

ปริมาตร $(s_e \delta m_e - s_i \delta m_i)$ คือ ปริมาตรเอนโทรปีสุทธิที่เข้าสู่ระบบในช่วงเวลา δt อันเนื่องมาจากการไหลเข้าและออกของมวล แต่เอนโทรปีของระบบสามารถ ที่จะ เพิ่มได้อีกทางหนึ่ง คือ เนื่องมาจาก ความไม่คืนสภาพภายในระบบ เช่น ความเสียดทาน ดังได้กล่าวในกฎข้อที่สอง ปริมาตรเอนโทรปีนี้ เรียกว่า เอนโทรปีที่เกิดจากระบบ (entropy production) ดังนั้น เราเขียนได้ว่า

ปริมาตรเอนโทรปีสุทธิที่เพิ่มขึ้นของระบบ = ปริมาตรเอนโทรปีเนื่องจากการส่งถ่ายความร้อน + ปริมาตรเอนโทรปีที่เกิดจากระบบ

นั้นคือ

$$(s_{t+\delta t} - s_t) + (s_e\delta m_e - s_i\delta m_i) = \sum_{C.V.}\left(\frac{\delta Q}{T}\right) + ds_{prod} \tag{8.3}$$

ปริมาตรเอนโทรปีที่เกิดจากระบบจะเท่ากับศูนย์ ถ้ากระบวนการในระบบทุก กระบวนการคืนสภาพ คือ

$$ds_{prod} \geq 0 \tag{8.4}$$

ดังนั้น สมการ (8.3) จะเขียนได้ว่า

$$(s_{t+\delta t} - s_t) + (s_e\delta m_e - s_i\delta m_i) \geq \sum_{C.V.}\left(\frac{\delta Q}{T}\right) \tag{8.5}$$

เมื่อคิดเป็นอัตราต่อหน่วยเวลาสมการ (8.5) จะเป็น

$$\frac{(s_{t+\delta t} - s_t)}{\delta t} + \left(s_e\frac{\delta m_e}{\delta t} - s_i\frac{\delta m_i}{\delta t}\right) \geq \sum_{C.V.}\frac{1}{T}\left(\frac{\delta Q}{\delta T}\right) \tag{8.6}$$

ถ้าพิจารณาในช่วงเวลาสั้น ๆ เข้าใกล้ศูนย์ และถ้าหากของไหลที่มีการไหลเข้าและออกจากระบบหลายทาง สมการ (8.6) จะเขียนได้ว่า

$$\frac{ds_{C.V.}}{dt} + \sum m_e s_e - \sum m_i s_i \geq \sum_{C.V.}\left(\frac{Q_{C.V.}}{T}\right) \tag{8.7}$$

ปริมาตรทั้งสองข้างเท่ากันเมื่อกระบวนการที่เกิดในระบบเป็นกระบวนการคืนสภาพ และไม่เท่ากันเมื่อกระบวนการภายในไม่คืนสภาพ

8.2 กระบวนการสภาวะคงที่ไหลคงที่ และขบวนการสภาวะสม่ำเสมอไหลสม่ำเสมอ

(The Steady State Steady Flow Process and the Uniform State Uniform Flow Process)

สำหรับกระบวนการสภาวะคงที่ไหลคงที่ (SSSF Process) ดังได้นิยามไว้ในบทที่ 5 นั้น สรุปได้ว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีของระบบ เมื่อเทียบกับเวลา ดังนั้น

$$\frac{ds_{C.V.}}{dt} = 0 \tag{8.8}$$

ดังนั้น สมการ (8.7) จึงเหลือเพียง

$$\sum m_e s_e - \sum m_i s_i \geq \sum_{C.V.}\left(\frac{Q_{C.V.}}{T}\right) \tag{8.9}$$

ในกรณีที่มีการไหลเข้าและออกของของไหลเพียงทางเดียว ดังนั้น

$$m(s_e - s_i) \geq \sum_{C.V.} \left(\frac{Q_{C.V.}}{T} \right) \qquad (8.10)$$

และสำหรับกระบวนการที่ไม่มีการส่งถ่ายความร้อนจะได้ว่า

$$s_e \geq s_i \qquad (8.11)$$

s_e และ s_i จะมีค่าเท่ากันก็ต่อเมื่อขบวนการเป็นกระบวนการคืนสภาพ

<u>ตัวอย่าง 8.1</u> ไอน้ำไหลเข้ากังหันไอน้ำที่ความดัน 1 MPa อุณหภูมิ 300 °C และความเร็ว 50 m/s ขาออกมีความดัน 150 kPa และความเร็ว 200 m/s จงคำนวณหางานต่อกิโลกรัมของไอน้ำที่ผ่านกังหัน สมมุติให้กระบวนการเป็นกระบวนการคืนสภาพและไม่ถ่ายเทความร้อน

<u>วิธีทำ</u> กำหนดปริมาตรควบคุมรอบกังหัน จากกฎข้อที่หนึ่ง ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์

$$h_i + \frac{V_i^2}{2} = w + h_e + \frac{V_e^2}{2}$$

จากตารางไอน้ำ $h_1 = 3051.2$ kJ/kg, $s_i = 7.1229$ kJ/kg K

กฎข้อที่สอง $s_e = s_i = 7.1229$ kJ/kg K

เมื่อทราบคุณสมบัติที่สภาวะขาออก 2 ตัวคือ P_e และ s_e สามารถหาค่า h_e ได้

$$s_e = 7.1229 = s_f + x_e s_{fg} = 1.4336 + x_e 5.7897$$

$$x_e = 0.9827$$

$$h_e = h_f + x\, h_{fg} = 467.1 + 0.9827(2226.5)$$

$$= 2655.0 \text{ kJ/kg}$$

แทนค่าในกฎข้อที่หนึ่ง

$$w = 3051.2 + \frac{50\times50}{2\times1000} - 2655.0 - \frac{200\times200}{2\times1000}$$

$$= 377.5 \text{ kJ/kg}$$

<u>ตอบ</u>

สำหรับกระบวนการสภาวะสม่ำเสมอไหลสม่ำเสมอ (USUF Process) สมการ (8.7) จะเขียนได้ว่า

$$\frac{d}{dt} + (ms)_{c.v.} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum_{c.v.} \left(\frac{\dot{Q}_{c.v.}}{T} \right) \qquad (8.12)$$

ถ้าอินทิเกรด ในช่วงเวลา t จะได้

$$\int_0^2 \frac{d}{dt} + (ms)_{c.v.}^{dt} = (m_2 s_2 - m_1 s_1)$$

$$\int_0^2 \left(\sum \dot{m}_e\, s_e\right) dt = \sum \dot{m}_e\, s_e ; \int_0^t \left(\sum \dot{m}_i\, s_i\right) dt = \sum m_i\, s_i$$

$$\int_0^2 \sum_{c.v.} \left(\frac{\dot{Q}c.v.}{T}\right) dt = \int_0^2 \frac{1}{T} \sum_{c.v.} \frac{\dot{Q}c.v.}{T} dt = \int_0^2 \left(\frac{\dot{Q}c.v.}{T}\right) dt$$

ดังนั้นในช่วงเวลา t กฎข้อที่สองจะเป็น

$$(m_2 s_2 - m_1 s_1)_{c.v.} + \sum \dot{m}_e\, s_e - \sum \dot{m}_i\, s_i \int_0^t \left(\frac{\dot{Q}c.v.}{T}\right) dt \qquad (8.13)$$

8.3 งานในการขับปั๊ม (Pump Work)

ในการปั๊มของเหลวซึ่งถือว่าเป็นของไหลไม่ยุบตัว (Incompressible fluid) ถ้าใช้กฎข้อที่หนึ่งในการวิเคราะห์อย่างเดียว จะหางานได้ยากเพราะตารางคุณสมบัติของของเหลวมีไม่เพียงพอ ในที่นี้จะแสดงการหางาน ในการไหลอย่างคงที่ และกระบวนการที่เกิดขึ้น

กฎข้อที่หนึ่ง $q + h_i + \frac{V^2{}_i}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V^2{}_e}{2} + Z_e g$

ถ้าไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ $w = h_i - h_e$

จากความสัมพันธ์ $Tds = dh = vdp$

และ $ds = 0;\ dh = vdp$

อินทิเกรดจะได้

$$h_e - h_i = \int_i^e vdP ; h_i - h_e = -\int_i^e vdP$$

เนื่องจากเป็นของไหลไม่ยุบตัว จึงถือว่าปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น V คงที่

$$h_e - h_i = v \int_i^e dP = -v\,(P_e - P_i)$$

ดังนั้น $w = -V\,(P_e - P_i)$ (8.14)

<u>ตัวอย่างที่ 8.2</u> จงหางานในการปั๊มน้ำจาก 100 kPa, 30 °C ไปเป็น 5 Mpa

<u>วีธีทำ</u> $V_i = 0.001004\ m^3/kg$

$$w = -V\,(P_e - P_i) = -0.001004\ \frac{m^3}{kg}\ (5000\text{-}100)\ kPa\ = -4.92\ kJ/kg$$

8.4 ประสิทธิภาพ (Efficiency)

ในบทที่ผ่านมาเราได้กล่าวถึงประสิทธิภาพของวัฏจักรมาแล้ว และในบทนี้กล่าวถึงประสิทธิภาพของกระบวนการ เช่น ประสิทธิภาพของกังหัน ประสิทธิภาพของเครื่องอัดแก๊ส เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของเครื่องจักรจะหาได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะในการใช้งานจริงกับสมรรถนะในจินตนาการ เมื่อทำงานที่สภาพแวดล้อมเดียวกัน ดังนั้นในประสิทธิภาพของกังหัน ก็เท่ากับอัตราส่วนของงานจริงที่ได้ต่อหน่วยมวล (w_a) หาร ด้วย งานต่อหน่วยมวล และ ถ้ากระบวนการเป็นไอเซนโทรปิค ซึ่งมีสภาวะขาเข้าและความดันขาออกเท่ากัน (w_s) เขียนได้ว่า

$$\eta_{turbine} = \frac{w_a}{w_s} \tag{8.15}$$

สำหรับหัวฉีด (nozzle) ซึ่งมีจุดประสงค์ต้องการให้ได้พลังงานจลน์มากที่สุดในจินตนาการ แล้วกระบวนการไม่มีการส่งถ่ายความร้อน และเป็นกระบวนการคืนสภาพได้ ดังนั้นประสิทธิภาพของหัวฉีด คือ อัตราส่วนระหว่าง พลังงานจลน์ที่ออกจากหัวฉีดจริง $\left(\frac{1}{2}V_s^2\right)$ ต่อพลังงานจลน์ แต่ ถ้าเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิค โดยสภาวะขาเข้าและความดันขาออกเหมือนกัน $\left(\frac{1}{2}V_s^2\right)$

$$\eta_{turbine} = \frac{\frac{1}{2}V_a^2}{\frac{1}{2}V_a^2} \tag{8.16}$$

ในเครื่องอัดแก๊ส มี กระบวนการในจินตนาการสองแบบ ในการอัดที่ไม่ต้องการ ให้แก๊สเย็นลงในระหว่างอัด กระบวนการก็จะเป็นไอเซนโทรปิค ซึ่งงานไอเซนโทรปิค (W_s) จะน้อยกว่างานจริงที่ใช้ (W_a) ดังนั้น

$$\eta_{turbine\ \ compressor} = \frac{W_s}{W_a} \tag{8.17}$$

แต่ถ้าในระหว่างการอัดเราพยายามลดอุณหภูมิของแก๊สโดยการหล่อเย็นด้วยน้ำหรืออากาศก็ตามกระบวนการในจินตนาการก็จะเป็นการอัดโดยกระบวนการอุณหภูมิคงที่คืนสภาพงานที่ใช้คือ W_t ดังนั้น

$$\eta_{\text{turbine compressor}} = \frac{W_t}{W_a} \qquad (8.18)$$

<u>ตัวอย่าง 8.3</u> เครื่องกังหันไอน้ำรับไอน้ำ 1 MPa, 300°C ขาออกไอน้ำมีความดัน 15 kPa วัดงานที่ได้จากกังหันได้เท่ากับ 600 kJ/kg ของไอที่ไหลผ่าน จงหาประสิทธิภาพของกังหัน

<u>วิธีทำ</u> ประสิทธิภาพของกังหัน $\eta_{turb} = \frac{W_a}{W_s}$

ดังนั้นต้องหา W_s ที่ได้ถ้าสภาวะขาเข้าเหมือนกันและความดันขาออกเท่ากัน

กฎข้อที่ 1: $h_1 = h_{2s} + W_s$; $W_s = h_1 - h_{2s}$

และ $S_{2s} = S_1$; จากตาราง $h_1 = 3051.2$ kJ/kg, $s_1 = 7.1229$ kJ/kgK

$\therefore S_{2s} = 7.1229$ น้อยกว่า S_g แต่มากเท่า S_f แสดงว่าเป็นไอชื้น

$$X_{2s} = \frac{S_{2s} - S_f}{S_{fg}} = \frac{7.1229 - 0.7549}{7.2536} = 0.8780$$

$$h_{2s} = h_f + X_{2s}h_{fg} = 225.94 + (0.8780 \times 2373.1) = 2309.3 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore WS = 3051.2 - 2309.3\ 741.89$$

$$\eta_{turb} = \frac{W_a}{W_s} = \frac{600}{741.89} = 0.8087 = 80.9\%$$

8.5 งานคืนสภาพและเออรีเวอสซิบิลิตี (Reversible Work and Irreversibility)

ในหัวข้อนี้จะนิยามคำว่า เออรีเวอสซิบิลิตี (Irreversibility) ซึ่งจะเป็นตัวช่วยในการประเมินประสิทธิภาพของ กระ บวนการต่างๆ สมมติว่ามีกระ บวนการสอง กระ บวนการที่เหมือนกัน โดยกระบวนการแรกเป็นกระบวนการไม่คืนสภาพ รับความร้อน $Q_{c.v.}$ จากสิ่งแวดล้อมและให้งาน $W_{c.v.}$ ส่วนอีกกระบวนการคืนสภาพ รับความร้อนเท่ากัน และให้งาน W_{rev} โดยที่สภาวะและการไหลของมวลของทั้งสองกระบวนการเหมือนกัน เพื่อความง่ายในการอธิบายในขั้นนี้จะพิจารณาในกรณีที่กระ บวนการเป็น กระ บวนการสภาวะสม่ำเสมอไหลสม่ำเสมอ (USUF Process) และไม่มีการเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์กับพลังงานจลน์ จากกฎข้อที่สองสรุปได้ว่า W_{rev} มากกว่า $W_{c.v.}$ จึงนิยามคำว่าเออรีเวอสซิบิลิตี (I) ว่าเป็นผลต่างของงานคืนสภาพและงานจริง นั้นคือ

$$I = W_{rev} - W_{c.v.} \tag{8.19}$$

เออรีเวอสซิบิลิตีจะเป็นตัววัดความด้อยประสิทธิภาพ (inefficiency) ของ กระ บวนการ โดย ถ้ากระบวนการเป็นกระบวนการคืนสภาพเออรีเวอสซิบิลิตีจะเป็นศูนย์

จากกฎข้อที่หนึ่ง

$$Q_{rev} + m_i h_i = W_{rev} + m_e h_e + (m_2 u_2 - m_1 u_1) \tag{8.20}$$

และจากกฎข้อที่สอง

$$(m_2 s_2 - m_1 s_1)_{c.v.} + m_e s_e - m_1 s_1 \int_0^t \left(\frac{\dot{Q}c.v.}{T}\right)_{rev} dt \tag{8.21}$$

ถ้าระบบรับความร้อนจากแหล่งความร้อน T_0 อุณหภูมินี้ต้องคงที่ เนื่องจากเป็นการถ่ายเทความร้อนคืนสภาพดังได้อธิบายในหัวข้อ 6.6 นั้นคือ

$$\int_0^t \left(\frac{\dot{Q}c.v.}{T}\right)_{rev} dt \int_0^t \frac{1}{T_0}(\dot{Q}c.v.)_{rev} dt = \frac{1}{T_0} Q_{rev}$$

แทนในสมการ (8.21) แล้วแทนค่า $(Qc.v.)_{rev}$ ลงในสมการ (8.20) จะได้

$$T_0(m_2 s_2 - m_1 s_1 + m_e s_e - m_i s_i) + m_i h_i = W_{rev} + m_e h_e + (m_2 u_2 - m_1 u_1)$$

$$W_{rev} = m_i(h_i - T_0 S_i) - m_e (h_e - T_0 s_e) - [m_2(u_2 - T_0 s_2) - m_1 (u_1 - T_0 s_1)]_{c.v.} \quad (8.22)$$

ถ้ากระบวนการไม่มีการไหล ($m_1 = m_e = 0$) ก็จะเป็นระบบปิดนั้นเอง

$$W_{rev} = 1\left(\frac{W_{rev}}{m}\right)_2 = (u1 - T_0 s_1)(u_2 - T_0 s_2) \tag{8.23}$$

ถ้ารวมการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์กับพลังงานจลน์ด้วยก็จะเป็น

$$W_{rev} = 1\left(\frac{W_{rev}}{m}\right)_2 = \left(u_1 - T_0 s_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1\right)\left(u_2 - T_0 s_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2\right) \tag{8.24}$$

และสำหรับกระบวนการสภาวะคงที่ไหลคงที่ (SSSF Process)

$$\dot{W}_{rev} = \sum \dot{m}_i \left(h_i - T_0 s_1 \frac{V_i^2}{2} + gz_i\right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e - T_0 s_e + \frac{V^2{}_e}{2} + gz_e\right) \tag{8.25}$$

หากมีการไหลเข้าและออกทางเดียวกัน

$$\dot{W}_{rev} \frac{\dot{W}_{rev}}{\dot{m}} = \left(h_i - T_0 s_i \frac{V_i^2}{2} + gz_i\right) - \left(h_e - T_0 s_e + \frac{V^2{}_e}{2} + gz_e\right) \tag{8.26}$$

คราวนี้จะพิจารณาหาค่าเออรีเวอสซิบิลิตีของกระบวนการ จากกฎข้อที่หนึ่ง

$$W_{c.v.} = m_i h_i + m_e h_e - (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{c.v.} + Q_{c.v.} \qquad (8.27)$$

แทนสมการ (8.22) และ (8.27) ลงในสมการ (8.19)

$$I = m_e T_0 s_e - m_i T_0 s_i + (m_2 T_0 s_2 - m_1 T_0 s_1)_{c.v.} - Q_{c.v.}$$

$$I = T_0 [(m_e s_e - m_i s_i) + (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{c.v.}] - Q_{c.v.} \qquad (8.28)$$

สมการ(8.28) นี้เป็นสมการสำหรับการหาเออรีเวอสซิบิลิตีของ กระ บวนการสม่ำเสมอและไหลสม่ำเสมอ (USUF Process)

ทำนองเดียวกันสำหรับกระบวนการสภาวะคงที่ไหลคงที่ (SSSF Process) ก็จะได้ว่า

$$\frac{\dot{I}}{\dot{m}} = T_0 (S_e - S_i) - \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{\dot{m}} \qquad (8.29)$$

และสำหรับระบบปิดก็จะหาได้ว่า

$$_1I_2 = mT_0 (S_2 - S_1) - {}_1Q_2 \qquad (8.30)$$

<u>ตัวอย่าง 8.4</u> จากตัวอย่าง 8.3 จงหางานคืนสภาพและเออรีเวอสซิบิลิตีของ กระ บวนการจริง จากการไหลของไอน้ำผ่านกังหัน กำหนดให้อุณหภูมิของอากาศเป็น 25°C

<u>วิธีทำ</u> จากตัวอย่างที่แล้วจะสามารถหาคุณภาพของไอขาออก (X_e) ได้เท่ากับ 0.9377 ดังนั้น

$$S_e = 0.7549 + 0.9377\ (7.2536) = 7.5566\ \text{kJ/kgK}$$

หางานคืนสภาพโดยสมการ (8.26) โดยไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์

$$W_{rev} = \frac{\dot{W}_{rev}}{\dot{m}} = (h_i - T_0 S_i) - (h_e - T_0 s_e) = (h_i - h_e) - T_0 (S_i - S_e)$$

$$= (3051.2 - 2451.2) - 298.15\ (7.1229 - 7.5566)$$

$$= 729.3\ \text{kJ/kgK}$$

หาเออรีเวอสซิบิลิตี จากสมการ (8.29)

$$\frac{\dot{I}}{\dot{m}} = T_0 (S_e - S_i) - \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{\dot{m}}$$

$$= 298.15\ (7.5566 - 7.1229) = 129.3\ \text{kJ/kg}$$

หรือจะหาได้จากนิยามของมัน

$$\frac{\dot{I}}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}_{rev}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}$$

$$= 729.3 - 600 = 129.3\ \text{kJ/kg}$$

<u>ตัวอย่าง 8.5</u>

1) พิจารณารูปข้างล่าง ถัง A มีปริมาตร 4 m^3 เดิมบรรจุฟรีออน-12 ที่ความดัน 100 kPa และอุณหภูมิ 20°C จากนั้นคอมเพลสเซอร์ดูดฟรีออนจากถัง A ทั้งหมดไปยังถัง B ซึ่งตอนแรกเป็นสุญญากาศ ทำให้ถัง B มีความดันเป็น 500 kPa เมื่ออุณหภูมิสุดท้ายเป็น 20 °C จงหางานที่น้อยที่สุดในการขับคอมเพลสเซอร์ ถ้าอุณหภูมิของบรรยากาศเป็น 20°C

2)หลังจากที่ถัง B ถูกประจุและถัง A เป็นสุญญากาศ เปิดวาล์ว จนกระทั่งถังทั้งสองมีความดันเท่ากันและอุณหภูมิเป็น 20°C จงหาเออรีเวอสซิบิลิตี ของกระบวนการนี้

<u>วิธีทำ</u>

ส่วนที่ 1

$$\left(\frac{W_{rev}}{m}\right)_2 = (u_1 - u_2) - T_0(s_1 - s_2)$$

จาก

$u_1 = h_1 - P_1v_1 = 203.707 - 100 \times 0.197277 = 183.979$ kJ/kg

$s_1 = 0.8275$ kJ/kgK

$u_2 = 196.935 - 500 \times 0.035646 = 179.112$ kJ/kg

s2 = 0.6999 kJ /kgK

$_1(W_{rev})_2 = (183.979 - 179.112) - 293.15\ (0.8275 - 0.6999)$

$= -32.54$ kJ/kg

$$m = \frac{V_1}{v_1}\frac{4}{0.197277} = 20.27\text{kg}$$

$_1(W_{rev})_2 = 20.276\ (-32.54) = -659.8$ kJ

งานน้อยที่สุดในการขับคอมเพลสเซอร์ = 659.8 kJ

ส่วนที่ 2 ก่อนอื่นต้องหาความดันในระบบ ซึ่งจะหาได้จากคุณสมบัติ 2 ตัว คือ T และ v

$V_B = mv_{2B} = 20.276 \times 0.035646 = 0.7228\ m^3$

$V_3 = V_AV_B = 4 + 0.7228 = 4.7228\ m^3$

$V_3 = \frac{V_3}{m} = \frac{4.7228}{20.276} = 0.23292\ m^3/kg$

จากการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ในตารางฟรีออน-12 จะได้ $P_3 = 91.2$ kPa

$h_3 = 203.842$ kJ/kg, $s_3 = 0.8363$ kJ/kgK

u3 = 203.842 – 91.2 ×0.23292 = 182.60 kJ/kg

จาก $_2(W_{rev})_3 = u_2 - u_3 - T_0\,(S_2 - S_2)$

$= (179.112 - 182.60) - 293.15\,(0.699 - 0.8363)$

$= 36.50$ kJ / kg

${}_2(W_{rev})_3 = 20.276\,(36.50) = 740.0$ kJ

${}_2I_3 = {}_2(W_{rev})_3 = {}_2W_3 = 740.0 - 0$

$= 740.0$ kJ

หรือจะหาจากสมการ (8.30)

$${}_2I_3 = mT_0\,(s_3 - s_2) - {}_2Q_3$$

จากกฎข้อที่หนึ่ง ${}_2Q_3 = m\,(u_3 - u_2) - {}_2W_3$

$= 20.276\,(182.60 - 179.112) + 0 = 70.7$ kJ ${}_2Q_3 = m\,(u_3 - u_2) - {}_2W_3$

${}_2I_3 = 20.276 \times 29.15\,(.8363 - 0.6999) - 70.7$

$= 740.0$ kJ

8.6 อะเวียลาบิลิตี (Availability)

ในหัวข้อที่แล้วเราได้สร้างสมการในการหางานคืนสภาพจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะ แต่ระบบจะสามารถให้งานคืนสภาพสูงสุดได้เท่าไรนั้น เราจะกล่าวต่อในหัวข้อนี้นั่นเอง

ถ้าระบบอยู่ในสมดุลกับสิ่งแวดล้อม ระบบก็จะไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้อีก และไม่สามารถผลิตงานออกมาได้ ดังนั้นถ้าระบบอยู่ในสภาวะที่กำหนด แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลง แบบ คืนสภาพจนกระทั่งตัวมันเข้าสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อม จะทำให้ อุณหภูมิและความดันของมันต้องเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_0) และความดันสิ่งแวดล้อม (P_0) อีกทั้งพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ของระบบต้องเป็นศูนย์ ทั้งนี้จะต้องไม่มีอิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงตึงผิวอีกด้วย

ต่อมาจะเป็นการพิจารณาหางานดังกล่าวสำหรับ กระบวนการสภาวะคงที่ไหลคงที่ จากสมการ (8.26)

$$W_{rev} = \left(h_i - T_0 s_i \frac{V_i^2}{2} + gz_i\right) - \left(h_e - T_0 s_e + \frac{V^2{}_e}{2} + gz_e\right)$$

งานนี้จะสูงสุดก็ต่อเมื่อ $h_e = h_o, s_e = s_o, V_e = 0$ และ $Z_e = Z_0$ กำหนดให้งานคืนสภาพสูงสุดต่อหน่วยมวลของของไหลนี้คือ อะเวียลาบิลิตี ต่อหน่วยมวลมีสัญลักษณ์เป็น ψ

$$\psi = \left(h - T_0 s \frac{V^2}{2} + gz\right) - (h_0 - T_0 s_0 + gz_0) \qquad (8.31)$$

จึงสรุปได้ว่างานคืนสภาพต่อหน่วยมวลระหว่างสองสภาวะจะเท่ากับอะเวียลาบิลิตี ที่ลดลงระหว่างสภาวะทั้งสอง

$$W_{rev} = \psi_i - \psi_e \quad (8.32)$$

กรณีที่กระบวนการมีการไหลเข้าและออกหลายทาง จะได้เป็น

$$W_{rev} = \sum \dot{m}_i \psi_i - \sum \dot{m}_e \psi_e \quad (8.33)$$

อะเวียลาบิลิตี สำหรับระบบปิดก็หาได้ทำนองเดียวกัน นอกจากว่าปริมาตรของระบบเพิ่มขึ้น เพราะแสดงว่ามีงานจำนวนหนึ่งจากระบบกระทำต่อสิ่งแวดล้อม แต่งานจำนวนนี้ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เลย จากสมการ (8.23)

$$_1(W_{rev})_2 = (u_1 - T_0S_1)(u_2 - T_0S_2)$$

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งระบบสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมคือ

$$(W_{rev})_{max} = (u - T_0S)(u_2 - T_0S_0) \quad (8.34)$$

อะเวียลาบิลิตีต่อหน่วยมวลของระบบ (ϕ) นิยามว่าคือ งานคืนสภาพสูงสุดลบด้วยงานที่กระทำต่อสิ่งแวดล้อม (W_{suyy}) ซึ่ง

$$(W_{suyy}) = P_0(V_0 - V) = -mP_0(v - v_0) \quad (8.35)$$

ดังนั้น

$$\phi = (W_{rev})_{max} - W_{suyy}$$

$$\phi = (u - T_0S) - (u_2 - T_0S_0) + P_0(v - v_0) \quad (8.36)$$

$$\phi = (u - P_0v - T_0s) - (u_0 + P_0v_0 - T_0s_0)$$

$$\phi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$$

ดังนั้น

$$_1(W_{rev})_2 = \phi_1 - \phi_2 - P_0(v_1 - v_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(Z_1 - Z_2) \quad (8.37)$$

<u>ตัวอย่าง 8.6</u> กังหันไอน้ำดังรูปไอน้ำที่ 3 MPa 350°C ด้วยอัตรา 30 kg/s ที่ความดันภายในกังหันเป็น 0.5 Mpa ไอน้ำถูกดึงออกมาใช้ด้วยอัตรา 5 kg/s อุณหภูมิที่ออกมาเป็น 200 ไอน้ำส่วนที่เหลือออกจากกังหันที่ 15 kPa, x = 90 % ความร้อนที่ถ่ายเทสู่บรรยากาศเป็น 150 kW จงหาอะเวียลาบิลิตีต่อกิโลกรัมของไอน้ำขาเข้าและขาออกทั้งสองจุด และหางานสูงสุดต่อกิโลกรัมของไอน้ำสำหรับการเปลี่ยนแปลงที่กำหนดดังนี้

<u>วิธีทำ</u> ในที่นี้เมื่อไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ ดังนั้น อะเวียลาบิลิตีที่จุดใด ๆ ของไอน้ำ คือ

$$\psi = (h - T_0s) - (h_0 - T_0s_0) = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

สภาวะของบรรยากาศปกติคือ 0.1 MPa 25°C ในสภาวะนี้น้ำจะอยู่ในสภาพของเหลวไม่อิ่มตัว ซึ่งคุณสมบัติของมัน อนุโลมใช้ค่าคุณสมบัติของของเหลวอิ่มตัวที่ 25°C ได้

$h_0 = 104.9 kJ/kg,\ s_0 = 0.3674\ kJ/kgK$

$\psi_1 = (3115.3 - 104.9) - 298.15\,(6.7428 - 0.3674) = 1109.6\ kJ/kg$

$\psi_2 = (2855.4 - 104.9) - 298.15\,(7.0592 - 0.3674) = 755.3\ kJ/kg$

$\psi_3 = (2361.8 - 104.9) - 298.15\,(7.2831 - 0.3674) = 195.0\ kJ/kg$

นั้นคืองานสูงสุด

$$\dot{w}_{rev} = m_1\psi_1 \dot{-} m_2\psi_2 - m_3\psi_3$$

$$\frac{\dot{w}_{rev}}{\dot{m}_1} = \psi_1\frac{m_2}{m_1}\psi_2\frac{m_3}{m_1}\psi_3$$

$$\frac{\dot{w}_{rev}}{\dot{m}_1} = 1109.6 - \frac{5}{30}(755.3) - \frac{25}{30}(195.0) = 821.1\ kJ/kg$$

<u>ตัวอย่าง 8.7</u> แบตเตอรี่แบบตะกั่วที่ใช้ในรถยนต์อันหนึ่งสามารถส่งพลังงานไฟฟ้าได้ 5.2 MJ เพื่อใช้ในการสตาร์ทเครื่องยนต์

ถ้าต้องการใช้อากาศความดันสูงในการสตาร์ทแทน อากาศดังกล่าวเก็บไว้ในถังที่ความดัน 7 MPa อุณหภูมิ 25°C ถังจะต้องมีความจุเท่าไรจึงจะทำให้อากาศมีอะเวียลาบิลิตีถึง 5.2 MJ

<u>วิธีทำ</u> หาอะเวียลาบิลิตีของอากาศที่ 7 MPa, 25°C ก่อน โดยสมการ (8.36)

$$\phi = (u - T_0S) - (u_2 - T_0S_0) + P_0(v - v_0)$$

$$v = {}^{RT}/_{P} = \frac{0.287 \times 298.15}{7000} = 0.01222 m^3/kg$$

$$v = {}^{RT_0}/_{P_0} = \frac{0.287 \times 298.15}{100} = 0.8557 m^3/kg$$

$$\phi = 0 - 298.15\left(0 - 0.287\ \ln\frac{700}{100}\right) + 100(0.01222 - 0.8557)$$

$$= 0 + 363.5 - 84.3 = 279.2\ kJ/kg$$

เพื่อให้มีอะเวียลาบิลิตี 5.2 MJ ต้องมีมวลเป็น

$$m = \frac{5200279.2}{} = 18.625\ kg$$

$$V = mv = 18.625 \times 0.0122 + 2 = 0.2276\ m^3$$

8.7 กระบวนการเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมี (Proceses Involving Chemical Reactions)

กระบวนการที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมี จะมีตัวแปรที่เป็นคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิคส์ที่สำคัญอยู่สองตัวคือ เฮล์มโฮล์ทซฟังชันก์ (Helmholtz Function,A) และกิบส์ฟังชันก์ (Gibbs Function,G) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$A = U - TS$$

$$a = u - Ts \qquad (8.38)$$

$$G = H - TS$$

$$g = h - Ts \qquad (8.39)$$

เนื่องจากปกติอุณหภูมิและความดันของตัวทำปฏิกิริยากับผลของปฏิกิริยามักสมดุลกับบรรยากา ศ ดังนั้น เมื่อพิจารณาระบบปิด จากสมการ (8.23) โดยให้ $T = T_0$ จะได้ว่า

$$W_{rev} = (u_1 - T_1s_1)\ (u_2 - T_2s_2)$$

$$W_{rev} = a_1 - a_2$$

$$W_{rev} = A_1 - A_2 \qquad (8.40)$$

และจากสมการ (8.36) เมื่อให้ $T = T_0$ และ $P = P_0$

$$\phi = (u - P_0v - T_0s) - (u_0 + P_0v_0 - T_0s_0)$$

$$\phi = (u + Pv - Ts) - (u_0 + P_0v_0 - T_0s_0)$$

$$\phi = (h - Ts) - (u_0 + P_0v_0 - T_0s_0)$$

$$\phi = g - g_0 \qquad (8.41)$$

Concussion : สรุปท้ายบทที่ 8

1. กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิคส์สำหรับระบบเปิด

2. กระบวนการสภาวะคงที่ไหลคงที่ และกระบวนการสภาวะสม่ำเสมอไหลสม่ำเสมอ

3. งานในการขับปั๊ม (Pump work)

4. ประสิทธิภาพ (Efficiency)

5. งานคืนสภาพและเออรีเวอสซิบิลิตี (Reversible Work and Irreversibility)

6. อะเวียลาบิลิตี (Availability)

7. กระบวนการเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมี (Process Involving Chemical Reactions)