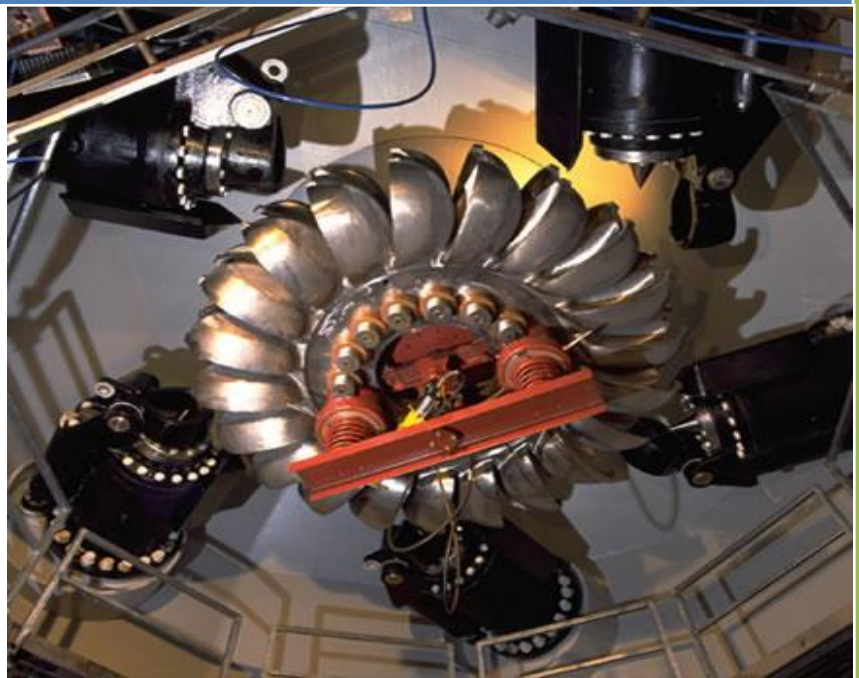


Thermodynamics I

Assoc.Prof.Somma Pripem, Ph.D.

Chapter 5 : First Law Analysis for a Control Volume

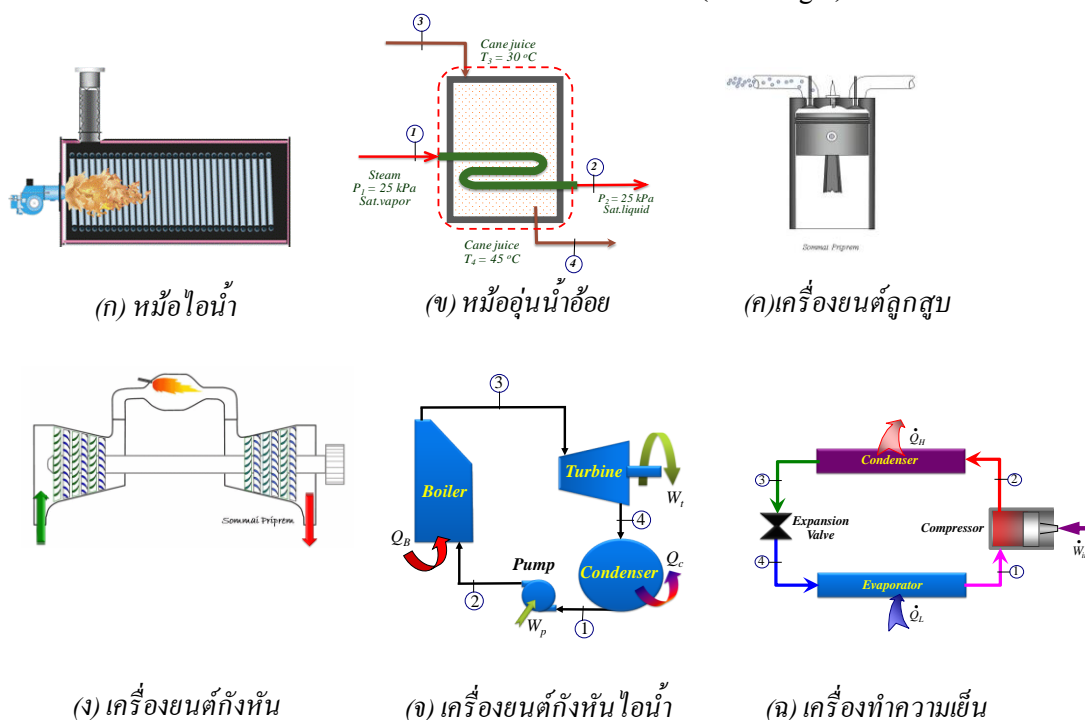


บทที่ 5

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิด (First Law Analysis for a Control Volume)

ในบทที่แล้ว เราได้ศึกษาถึงการใช้กฎข้อที่หนึ่งในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง เนื่องจากระบบของเทอร์โมไดนามิกส์จำนวนมากไม่ได้เข้าข่ายการเป็นระบบปิดแต่เป็นระบบเปิด ในบทนี้จึงจะบรรยายถึง การใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในระบบเปิด

รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์และเครื่องจักรเมื่อทำงานแล้วเข้าข่ายต้องวิเคราะห์เป็นระบบเปิด เช่น ในการผลิตไอน้ำในหม้อไอน้ำ (Boiler) ดังแสดงใน รูปที่ 5.1 (ก) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม น้ำป้อน (feedwater) จะถูกปั๊มเข้าไปในหม้อไอน้ำแล้วเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำเนื่องจากได้รับความร้อน พลังงานความร้อนมาจากการเผาเชื้อเพลิง ซึ่งต้องใช้อากาศ จะเห็นว่า หากพิจารณาหม้อไอน้ำเป็นระบบ จะมีน้ำป้อน ไหลเข้าไอน้ำ ไหลออก เชื้อเพลิงและอากาศไหลเข้าหลังการสันดาปแล้วเป็นก๊าซร้อนซึ่งเมื่อคายความร้อนให้น้ำแล้วเป็นไอเสีย (exhaust gas) ไหลออกไป



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างของอุปกรณ์และเครื่องจักรที่ทำงานในลักษณะเป็นระบบเปิด

อีกตัวอย่างหนึ่งคือหม้ออุ่นน้ำอ้อยแบบต่อเนื่อง (Continuous Cane Juice Heater) ของโรงงานน้ำตาล ดังแสดงใน **รูปที่ 5.1 (ข)** หลังน้ำอ้อยออกจากหีบจะถูกนำไปอุ่นเพื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นก่อนนำไปเกี่ยวกับการป้อนน้ำอ้อยเข้าหม้ออุ่นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นน้ำอ้อยหลังอุ่นแล้วก็ต้องไหลออกอย่างต่อเนื่องด้วย ในการอุ่นนั้นจะใช้ไอน้ำที่ได้จากกระบวนการเกี่ยวซึ่งไอน้ำเมื่อคายความร้อนให้น้ำอ้อยแล้วจะควบแน่นเป็นของเหลวแล้วไหลออกไป จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในการวิเคราะห์ เช่น ต้องการทราบปริมาณไอน้ำที่ต้องใช้ในการอุ่นน้ำอ้อยนั้นต้องวิเคราะห์โดยวิธีการของระบบเปิด **รูปที่ 5.1 (ค)** เป็นเครื่องยนต์ลูกสูบซึ่งอาจเป็นเครื่องยนต์เบนซิน (Gasoline engine) หรือเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel engine) ลองพิจารณาการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน หากพิจารณาการทำงานในภาพรวมของวัฏจักรทางกลของเครื่องยนต์ จะเห็นว่าการดูดไอดี (อากาศผสมเชื้อเพลิง) เข้าไปในกระบอกสูบ แล้วมีการคายไอเสียออกไป โดยได้งานกลออกมา ดังนั้นในการวิเคราะห์จะเป็นระบบเปิด แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะช่วงของการทำงานเช่น ในจังหวะดูด (Intake stroke) ก็จะเป็นระบบเปิดอยู่ แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะช่วงจังหวะอัด (Compression stroke) ก็จะเป็นระบบปิด เพราะจะไม่มีมวลไหลเข้าหรือออกจากกระบอกสูบเลย

รูปที่ 5.1 (ง) แสดงเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas Turbine engine) นิยมใช้เป็นเครื่องจักรต้นกำลังในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและเครื่องยนต์ของเครื่องบิน ซึ่งหากมองในภาพรวมแล้วจะคล้ายเครื่องยนต์ลูกสูบ กล่าวคือมีการดูดอากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิง แล้วมีการคายไอเสียออกไป โดยได้งานกลออกมา แต่อุปกรณ์และกระบวนการทำงานไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปในการวิเคราะห์จะพิจารณาที่กระบวนการ คือเมื่อของไหลไหลผ่านอุปกรณ์แต่ละตัว เพราะตัวแปรจะน้อยทำให้คำนวณได้ง่ายกว่า การพิจารณารวม เช่น หากต้องการทราบกำลังงานที่ใช้ในการอัดอากาศ ก็พิจารณาเฉพาะเครื่องอัดอากาศ ส่วนใน **รูปที่ 5.1 (จ)** เครื่องยนต์กังหันไอน้ำ (Steam Turbine engine) มักใช้เป็นเครื่องจักรต้นกำลังในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เป็นเครื่องยนต์ที่ทำงานเป็นวัฏจักรปิด ซึ่งสารทำงานจะทำงานเป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Cycle) หากพิจารณาในภาพรวมทั้งหม้อน้ำก็เป็นวัฏจักร แต่หากแยกพิจารณาที่ละอุปกรณ์จะเห็นว่าเป็นระบบเปิด เช่น หากต้องการทราบกำลังงานที่ผลิตได้จากกังหัน ก็กำหนดปริมาตรควบคุมรอบกังหัน จะพบว่ามีไอน้ำไหลผ่านเข้าและออก รวมทั้งมีกำลังงานที่ผลิตได้ออกจากปริมาตรควบคุม มันจึงเป็นระบบเปิด และสุดท้าย **รูปที่ 5.1 (ฉ)** เครื่องทำความเย็น (Refrigerator) ดังแสดงใน ก็มีการวิเคราะห์ทำนองเดียวกันกับเครื่องยนต์กังหันไอน้ำ การทำงานและการวิเคราะห์เครื่องยนต์และเครื่องทำความเย็นเหล่านี้จะได้กล่าวถึงในรายละเอียดในบทที่ 9

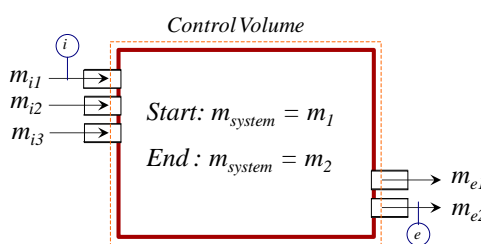
5.1 ปริมาตรควบคุมและกฎทรงมวล (Conservation of mass and the Control volume)

ปริมาตรควบคุม(Control volume) คือ ปริมาตรใด ๆ ที่กำหนดขึ้นในการศึกษาหรือวิเคราะห์ หนึ่งๆ ผิวของปริมาตรควบคุมนี้ เรียกว่า ผิวควบคุม (control surface) ขนาดและรูปร่างของปริมาตร ควบคุมแล้วแต่ผู้กำหนด ทั้งนี้เพื่อให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์นั้น ๆ ผิวอาจจะอยู่กับที่เคลื่อนที่หรือ ขยายได้ แต่ผิวควบคุมนี้ต้องสามารถกำหนดพิกัดได้ มวลรวมทั้งความร้อนงานสามารถผ่านเข้าออกจาก ปริมาตรควบคุมได้ มวลที่อยู่ในปริมาตรควบคุมและคุณสมบัติของมันอาจเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

ในระบบเปิดต้องมีการไหลของมวลเข้าออกจากระบบ มวลก็อนุรักษ์เช่นเดียวกับพลังงานคือ ไม่ถูกทำลายหรือเกิดขึ้นมาเองได้ พิจารณาถึงกฎทรงมวลในความสัมพันธ์กับปริมาตรควบคุมโดย พิจารณาการไหลเข้าออกของมวลผ่านปริมาตรควบคุมและมวลที่ เปลี่ยนไปในระหว่างเวลาเริ่มต้น จนถึงเวลาสุดท้ายของการพิจารณา สมมติว่าในเวลา เริ่มต้นภายในระบบมีมวลอยู่แล้ว m_1 และที่ เวลา สิ้นสุดการพิจารณาภายในระบบมีมวลเหลืออยู่ m_2 ในระหว่างช่วงเวลานี้มีมวลไหลเข้ารวมทั้งหมด Σm_i และมีมวลไหลออกรวมทั้งสิ้น Σm_e ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ดังนั้น จากกฎทรงมวลเขียนได้ว่า

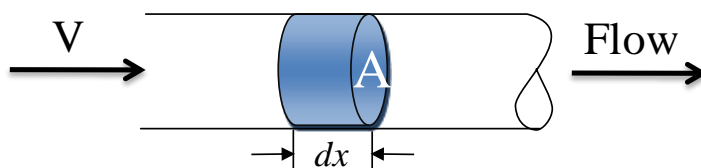
$$\Sigma m_e - \Sigma m_i = (m_2 - m_1) \quad (5.1)$$

สมการ (5.1) มีชื่อเรียกว่า สมการ การไหลต่อเนื่อง (Continuity equation)



รูปที่ 5.2 แสดงปริมาตรควบคุมในการวิเคราะห์สมการ การไหลต่อเนื่อง

คราวนี้มาพิจารณาการไหลผ่านผิวควบคุม ถ้าของไหลไหลในท่อดังแสดงในรูปที่ 5.3 และการ ไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอผ่านผิว A และในช่วงเวลา δt ของไหลเคลื่อนที่ไปได้ เป็นระยะทาง dx ดังนั้น ปริมาตรของของไหลที่ผ่านผิว A คือ $A dx$ นั่นคือ มวลที่ผ่านผิว A ไปได้คือ



รูปที่ 5.3 การไหลผ่านผิวควบคุม

$$\delta m = \frac{A \delta x}{v}$$

เมื่อหารด้วย δt และให้ δt เข้าใกล้ศูนย์จะได้

$$\dot{m} = \frac{AV}{v} \quad (5.2)$$

หรือ $\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v} \quad (5.3)$

หรือ $\dot{m} = \rho AV \quad (5.4)$

เมื่อ \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวล ในท่อ (kg/s)

\dot{V} คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร ในท่อ (m^3/s)

A คือพื้นที่หน้าตัดของการไหล (m^2)

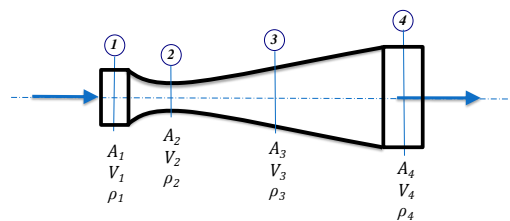
V คือความเร็วของการไหลในท่อ (m/s)

v คือปริมาตรจำเพาะของการไหล (m^3/kg)

ρ คือความหนาแน่นของการไหล (kg/m^3)

เมื่อพิจารณาการไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลเชิงมวลคงที่ในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 จะส่งผลให้สถานะของการไหลก็เปลี่ยนไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ เช่น ความเร็วเปลี่ยนไป ก็จะส่งผลให้ความดัน และความหนาแน่นเปลี่ยนไปด้วย แต่อัตราการไหลเชิงมวลคงที่จากสมการ (5.4) เขียนได้ใหม่ว่า

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \rho_3 A_3 V_3 = \rho_4 A_4 V_4 \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.4 การไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลเชิงมวลคงที่ในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่

ตัวอย่าง 5.1 อากาศไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 m ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ 0.1 m/s อุณหภูมิและความดันเป็น 25 °C และ 150 kPa ตามลำดับ จงหา อัตราการไหลเชิงปริมาตรและ อัตราการไหลเชิงมวล

วิธีทำ จากสมการ (5.4) $\dot{m} = \frac{AV}{v}$

จากตาราง A.8 จะทราบค่า R ของอากาศ

$$v = \frac{RT}{P} = \frac{(0.287)(298.2)}{150} = 0.5705 \text{ m}^3/\text{kg}$$

พื้นที่หน้าตัดของท่อ

$$A = \frac{\pi}{4}(0.2)^2 = 0.0314 \text{ m}^2$$

ดังนั้น

$$\dot{m} = \frac{(0.0314)(0.1)}{0.5705} = 0.0055 \text{ kg/s} \quad \underline{\text{ตอบ}}$$

และจาก

$$\dot{V} = \dot{m}v = (0.0055 \text{ kg/s})(0.5705 \text{ m}^3/\text{kg})$$

$$\dot{V} = \dot{m}v = 0.00314 \text{ m}^3/\text{s} \quad \underline{\text{ตอบ}}$$

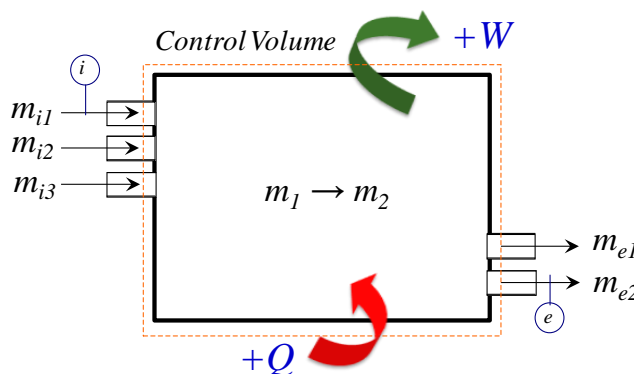
หรือคำนวณจาก

$$\dot{V} = AV = (0.0314 \text{ m}^2)(0.1 \text{ m/s}) = 0.00314 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.2 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิด

(The First Law of Thermodynamics for a Control Volume)

การพิจารณาในหัวข้อนี้จะยกเอารูปแบบของระบบเปิดดังแสดงในรูปที่ 5.5 ในการอธิบายระบบดังกล่าวมีของไหลไหลเข้าและออกหลายทาง มีการส่งถ่ายความร้อนให้แก่ระบบและระบบให้งานออกมา โดยที่ตัวระบบอยู่กับที่



รูปที่ 5.5 ภาพแสดงการใช้กฎข้อที่หนึ่งวิเคราะห์ระบบเปิด

เมื่อคิดปริมาตรควบคุมรอบระบบ จากกฎทรงของพลังงาน เขียนได้ว่า

$$Q_{c.v.} + E_{in \text{ flow}} = W_{c.v.} + E_{out \text{ flow}} + \Delta E_{sys} \quad (5.5)$$

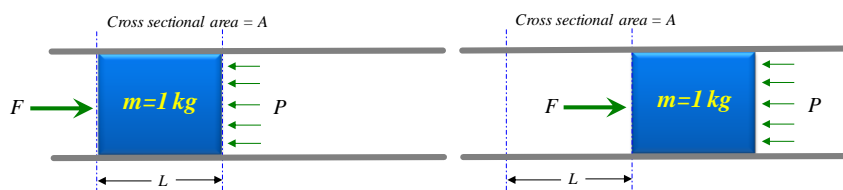
เมื่อ $Q_{c.v.}$ หมายถึงผลรวมของพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ผ่านเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม โดยพิจารณาเครื่องหมายทิศทาง เข้าเป็นบวก และออกเป็นลบ

$W_{c.v.}$ หมายถึงผลรวมของงานทั้งหมดที่ผ่านเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม โดยพิจารณาเครื่องหมายทิศทางออกเป็นบวก และเข้าเป็นลบ

E_{flow} เป็นพลังงานของตัวของไหลประกอบไปด้วย พลังงานภายในพลังงานของการไหล(flow energy or flow work) พลังงานศักย์ และพลังงานจลน์

5.3 พลังงานของการไหล (Flow Energy)

พลังงานของการไหล เป็นพลังงานรูปหนึ่งของของไหลที่มีการไหลภายใต้ความดัน เพื่อความเข้าใจในพลังงานรูปนี้ พิจารณารูปที่ 5.6 ซึ่งมีของไหลในท่อขนาดหน้าตัดคงที่ A ภายใต้ความดัน P เมื่อพิจารณาเฉพาะมวล 1 kg ของของไหลซึ่งจะมีความยาวที่อยู่ในท่อเป็น L กำหนดระนาบสมมติขึ้นกัน ถ้าหากเราจะให้ของไหลจำนวนนี้ไหลผ่านพื้นระนาบสมมติจะต้องผลักดันมันด้วยงานจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะความดันที่ดันอยู่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า จะต้องออกแรง F ซึ่งเท่ากับ $P \times A$ ผลักดันไปเป็นระยะทาง L นั่นคือต้องใช้งานจำนวนหนึ่งคือ $W = F \times L = P \times A \times L = PV$ แต่ในกรณีที่ของไหลไหลไปด้วยตัวของมันเองโดยที่เราไม่ได้เพิ่มพลังงานให้แก่มัน ก็แสดงว่าภายในตัวมันมีพลังงานรูปหนึ่งที่ทำให้มันสามารถไหลไปภายใต้ความดันได้



รูปที่ 5.6 รูปประกอบการอธิบายพลังงานของการไหล

เราให้ชื่อพลังงานรูปนี้ว่า พลังงานของการไหล ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความดันของของไหลคูณด้วยปริมาตรของมัน

$$\text{พลังงานของการไหล (flow energy)} = PV$$

$$\text{ดังนั้น พลังงานรวมของของไหล} = U + PV + KE + PE$$

ทั้ง U , P และ V ต่างก็เป็นคุณสมบัติ ซึ่งปริมาณของมันขึ้นกับสถานะ ดังนั้น $U + PV$ ก็เป็นปริมาณที่ขึ้นกับสถานะด้วย ดังนั้นมันจึงเป็นคุณสมบัติตัวหนึ่งด้วย เนื่องจากของไหลเมื่อไหลภายใต้ความดันก็จะมีความดันกลุ่มนี้อยู่เสมอเพื่อความสะดวกในการใช้จึงกำหนดให้เป็นคุณสมบัติ และให้ชื่อว่า เอนทัลปี (Enthalpy, h) นั่นคือ

$$\text{จาก } h = u + Pv$$

เมื่อ v คือปริมาตรจำเพาะนั่นเอง ดังนั้นพลังงานของสารที่ไหลเขียนได้ว่า

$$E_{\text{flow}} = m \left(h + \frac{v^2}{2} + Zg \right) \quad (5.6)$$

5.4 กระบวนการไหลคงที่และสถานะคงที่ (The Steady – State, Steady – Flow Process)

ในการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น กังหัน , เครื่องอัดแก๊ส หัวฉีด หม้อน้ำ เครื่องควบแน่น ฯ เรามักจะวิเคราะห์ในช่วงการทำงานที่สถานะต่าง ๆ คงที่แล้วกระบวนการไหลคงที่และสถานะคงที่มีสมมติฐานดังนี้

- ปริมาตรควบคุม ไม่เคลื่อนที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิง
- สถานะของของไหลที่จุดใด ๆ ภายในปริมาตรควบคุมไม่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา
- อัตราการไหลของมวลผ่านผิวควบคุมคงที่ตลอดเวลา อัตราการส่งถ่ายงานและความร้อนผ่านผิวควบคุมคงที่

จากสมมติฐานนี้เราจะได้ว่า

$$\sum m_i = \sum m_e$$

$$\Delta E_{\text{sys}} = 0$$

ดังนั้น สมการที่ (5.5) จึงเหลือเพียง

$$Q_{\text{c.v.}} + E_{\text{in flow}} = W_{\text{c.v.}} + E_{\text{out flow}}$$

นั่นคือ

$$Q_{\text{c.v.}} + \sum m_i \left(h + \frac{v_i^2}{2} + Zg \right)_i = W_{\text{c.v.}} + \sum m_e \left(h + \frac{v_e^2}{2} + Zg \right)_e \quad J \quad (5.7)$$

เนื่องจากอัตราการไหล อัตราการส่งผ่านความร้อนและงาน และสถานะของของไหล ช่วง ขาเข้าและขาออกไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา ดังนั้นเราสามารถคิดสมการ (5.7) ต่อหน่วยเวลา โดยจะได้ปริมาณต่าง ๆ เป็นอัตราต่อหน่วยเวลา

$$\dot{Q}_{\text{c.v.}} + \sum \dot{m}_i \left(h + \frac{v_i^2}{2} + Zg \right)_i = \dot{W}_{\text{c.v.}} + \sum \dot{m}_e \left(h + \frac{v_e^2}{2} + Zg \right)_e \quad w \quad (5.8)$$

สำหรับระบบที่มีการไหลเข้าทางเดียวและออกทางเดียว สมการ (5.8) ก็จะเป็น

$$\dot{Q}_{\text{c.v.}} + \dot{m}_i \left(h + \frac{v_i^2}{2} + Zg \right)_i = \dot{W}_{\text{c.v.}} + \dot{m}_e \left(h + \frac{v_e^2}{2} + Zg \right)_e$$

แต่ $\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$; เอา \dot{m} หารตลอดจะได้

$$q + h_i + \frac{v_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{v_e^2}{2} + Z_e g \quad J/kg \quad (5.9)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านต่อมวลของของไหล $= \frac{\dot{Q}_{\text{c.v.}}}{\dot{m}} = \frac{J/s}{kg/s} = \frac{J}{kg}$

$$w \text{ คือ ปริมาณงานต่อหน่วยมวลของของไหล} = \frac{\dot{W}_{c.v.}}{\dot{m}} = \frac{J/s}{kg/s} = \frac{J}{kg}$$

ข้อควรระวังเรื่องหน่วยที่ใช้ในสมการข้างต้น หน่วยของพลังงานจลน์ และหน่วยของพลังงานศักย์ จะเป็น J/kg ดังนี้

$$\text{หน่วยของพลังงานจลน์} \quad \frac{V_c^2}{2} = (m/s)^2 = \frac{m^2}{s^2} \times \frac{kg}{kg} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \times \frac{m}{kg} = \frac{N \cdot m}{kg} = \frac{J}{kg}$$

$$\text{หน่วยของพลังงานศักย์} \quad zg = m \left(\frac{m}{s^2} \right) = m \left(\frac{m}{s^2} \right) \times \frac{kg}{kg} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \times \frac{m}{kg} = \frac{N \cdot m}{kg} = \frac{J}{kg}$$

เนื่องจากปริมาณในหน่วยจูล (Joule, J) นั้นน้อยมากสำหรับระบบทางความร้อน ดังนั้นในการคำนวณโดยทั่วไปนิยมใช้หน่วยเป็น kJ เช่น ข้อมูลที่ได้จากตารางค่าเอนทัลปี h ปกติจะให้ เป็น kJ/kg รวมทั้งพลังงานความร้อนและงานที่กำหนดให้มักเป็น kJ หรือ MJ ดังนั้นเวลาแทนค่าในสมการ 5.7 - 5.9 มักนิยมใช้หน่วยเป็น kJ ดังนั้นค่าของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ จึงต้องหารด้วย 1,000 เสียก่อนเพื่อเปลี่ยนหน่วยให้ถูกต้อง

5.5 แนวทางการพิจารณาวิเคราะห์กระบวนการในอุปกรณ์ทางวิศวกรรมบางอย่าง

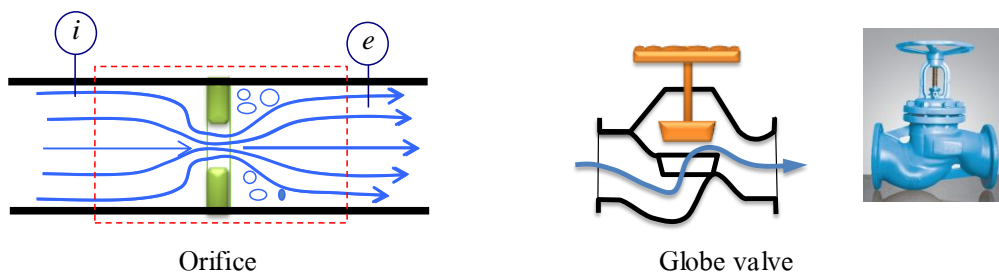
ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึง หลักการทำงาน และแนวทางการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ ที่เกี่ยวข้องกับระบบทางความร้อนในงานวิศวกรรมที่มักพบบ่อยๆ บางอย่าง ดังนี้กระบวนการที่เกินในอุปกรณ์ที่เช่น *Throttling Valve, Nozzle Diffuser, Compressor, Turbine, Pump, Boiler, Condenser and Heat Exchanger*

ขบวนการรอกทลิ่ง (Throttling)

เป็นกระบวนการที่เกิดเมื่อของไหล ไหลผ่านช่องเล็กๆ เช่น ออร์ฟิซหรือวาล์วที่มีการหรี่ การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นในช่วงสั้น ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนในช่อง นี้จึงน้อยมาก โดยปกติมักสมมติว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น (adiabatic process) เมื่อของไหลไหลผ่านช่องแคบดังกล่าวความดันจะลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง โดยทั่วไปความดันลดไม่สูงมากนัก แต่ไม่มีการเกิดขึ้น ถ้าท่อวางอยู่ในแนวระดับก็ไม่มีเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ ถ้าของไหลเป็นของเหลวก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ เพราะปริมาตรจำเพาะจะไม่เปลี่ยน แต่ถ้าเป็น ก๊าซจะมีปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น แต่ถ้าออกแบบให้ท่อด้านท้ายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าพอเหมาะ ก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์

1. Throttling Valve

ตัวอย่างการใช้งาน วาล์วใช้ปรับอัตราการไหลของของไหลในท่อ แผ่นออริฟิซ (Orifice plate) เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของการไหลในท่อ วาล์วขยายตัว (Expansion valve) ใช้ลดความดันของสารทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิอัดตัวให้ต่ำลง ทำให้มันสามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำในคอยล์เย็น



รูปที่ 5.7 Orifice และ Globe valve

สมมุติฐานทั่วไป เป็นกระบวนการไหลแบบ SSSF

ไม่มีความร้อนและงานผ่านเข้าออก

ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

กฎข้อที่หนึ่ง ปริมาตรควบคุมรอบอุปกรณ์และท่อห่างจากอุปกรณ์ระยะหนึ่ง

$$q + h_i + \frac{v_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{v_e^2}{2} + Z_e g$$

$$h_i = h_e$$

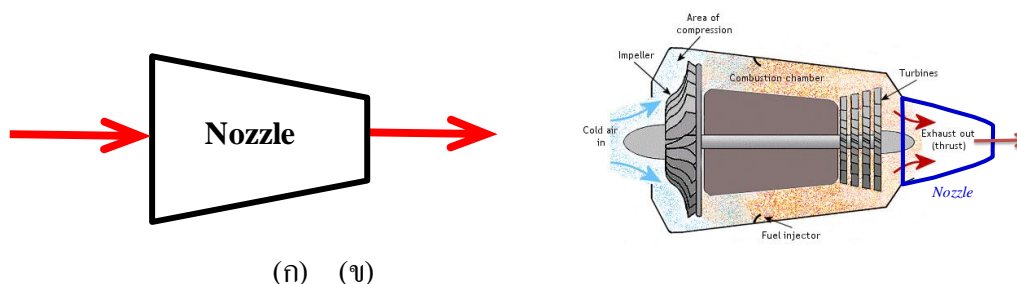
2. หัวฉีด (Nozzle)

หน้าที่ เป็นอุปกรณ์เพิ่มพลังงานจลน์ (เพิ่มความเร็ว) ให้ของไหล โดยการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ซึ่งเป็นผลรวมของพลังงานภายในและพลังงานของการไหล) ส่งผลให้ความดันของของไหลลดลง

ลักษณะ เป็นท่อที่พื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ สำหรับการไหลที่ความเร็วต่ำกว่าเสียงจะมีลักษณะลู่เข้าตามทิศทางของการไหล

สัญลักษณ์ เป็นท่อลู่เข้าตามทิศทางของการไหล มีของไหล ไหลเข้าและออก ดังแสดงในรูปที่ 5.8 (ก)

ตัวอย่างการใช้งาน ใช้เร่งความเร็วของก๊าซร้อนของเครื่องยนต์เจ็ท เพื่อให้เกิดแรงผลัก ดังแสดงในรูปที่ 5.8 (ข)



(ก) (ข)

รูปที่ 5.8 (ก) สัญลักษณ์ของ Nozzle (ข) Nozzle ของเครื่องยนต์เจ็ท

สมมุติฐานทั่วไป เป็นกระบวนการไหลแบบ *SSSF*

ไม่มีความร้อนและงานผ่านเข้าออก

ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์

กฎข้อที่หนึ่ง ปริมาตรควบคุมรอบ *Nozzle*

$$q + h_i + \frac{v_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{v_e^2}{2} + Z_e g$$

$$h_i + \frac{v_i^2}{2} = h_e + \frac{v_e^2}{2} \quad \text{J/kg}$$

สมการการไหล

$$\dot{m} = \frac{AV}{v} = \dot{V} = \rho AV$$

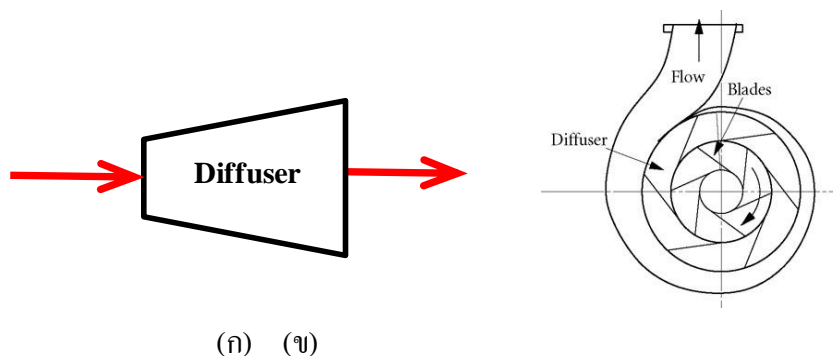
3. Diffuser

หน้าที่ เป็นอุปกรณ์เพิ่มความดันให้กับของไหล โดยการลดความเร็ว (พลังงานจลน์) ของของไหลแล้วเปลี่ยนให้เป็นเอนทัลปี ซึ่งจะส่งผลให้ความดันเพิ่มขึ้น

ลักษณะ เป็นท่อที่พื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ สำหรับการไหลที่ความเร็วต่ำกว่าเสียงจะมีลักษณะลู่ออกตามทิศทางของการไหล

สัญลักษณ์เป็นท่อ ลู่ออกตามทิศทางของการไหล มีของไหล ไหลเข้าและออก ดังแสดงในรูปที่ 5.9 (ก)

ตัวอย่างการใช้งาน ใช้เพิ่มความดันของของเหลวที่ออกจากปั๊มแบบหอยโข่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.9 (ข)



รูปที่ 5.9 (ก) สัญลักษณ์ของ *Diffuser* (ข) *Diffuser* ของปั๊มหอยโข่ง

สมมุติฐานทั่วไป เป็นกระบวนการไหลแบบ *SSSF*

ไม่มีความร้อนและงานผ่านเข้าออก

ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์

กฎข้อที่หนึ่ง ปริมาตรควบคุมรอบ *Diffuser*

$$q + h_i + \frac{v_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{v_e^2}{2} + Z_e g$$

$$h_i + \frac{v_i^2}{2} = h_e + \frac{v_e^2}{2} \quad \text{J/kg}$$

สมการการไหล

$$\dot{m} = \frac{AV}{v} = \dot{V} = \rho AV$$

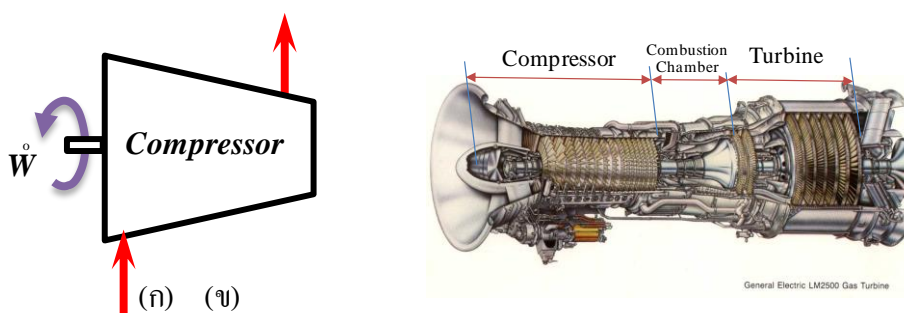
4. เครื่องอัด (Compressor)

หน้าที่ เป็นอุปกรณ์เพิ่มความดันให้ของไหล โดยมีการใส่กำลังงานเข้าไปขับเคลื่อนปั๊มส่งผลให้ความดันของของไหลเพิ่มขึ้น

ลักษณะ เครื่องอัดมีหลายชนิด เช่นแบบลูกสูบ แบบไหลเหวี่ยง และแบบไหลแนวแกน เป็นต้น

สัญลักษณ์ รูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมูของไหลไหลเข้าด้านป้านและออกด้านแคบ และมีงานขับเพลาดังแสดงในรูปที่ 5.10 (ก)

ตัวอย่างการใช้งาน เครื่องอัดอากาศของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 (ข)



รูปที่ 5.10 (ก) สัญลักษณ์ของ Compressor (ข) Compressor ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

สมมุติฐานทั่วไป เป็นกระบวนการไหลแบบ SSSF

ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

กฎข้อที่หนึ่ง ปริมาตรควบคุมรอบ Compressor

$$q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

$$w = h_i - h_e$$

$$\dot{W} = \dot{m}w$$

ผลการคำนวณต้องได้เครื่องหมายของงานเป็นลบ เพราะต้องใส่งานเข้าไปขับเคลื่อน

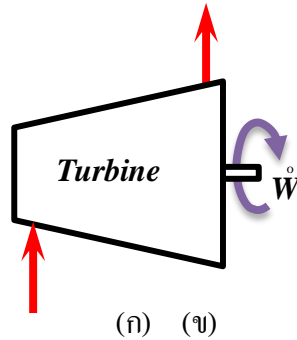
5. กังหัน (Turbine)

หน้าที่ เป็นอุปกรณ์ผลิตงานกลโดยมีของไหลที่มีความดันสูงไหลเข้าไปขับเคลื่อนปั๊มส่งผลให้ได้กำลังงานออกมาที่เพล

ลักษณะ กังหันมีหลายชนิด เช่น กังหันน้ำ กังหันก๊าซ กังหันไอน้ำ เป็นต้น

สัญลักษณ์ รูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมูของไหลไหลเข้าด้านแคบ และออกด้านป้านและมีงานได้ออกมาที่เพลาดังแสดงในรูปที่ 5.11 (ก)

ตัวอย่างการใช้งาน ชุดกังหันไอน้ำของโรงจักรไฟฟ้า ในรูปที่ 5.11 (ข) แสดงชุดขับเคลื่อนกังหันของกังหันไอน้ำ



รูปที่ 5.11 (ก) สัญลักษณ์ของ Turbine (ข) Turbine ของเครื่องยนต์กังหันไอน้ำ
สมมุติฐานทั่วไป เป็นกระบวนการไหลแบบ SSSF

ไม่มีความร้อนผ่านเข้าออก

ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

กฎข้อที่หนึ่ง ปริมาตรควบคุมรอบ Compressor

$$q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

$$q + h_i = w + h_e$$

$$\dot{W} = \dot{m}w \text{ และ } \dot{Q} = \dot{m}q$$

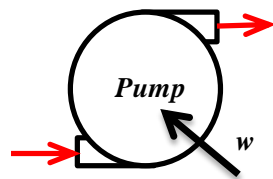
ผลการคำนวณต้องได้เครื่องหมายของงานเป็นบวก เพราะของไหลขับเคลื่อนกังหัน ได้งานออกมา

6. ปั๊ม (Pump)

หน้าที่ เป็นอุปกรณ์เพิ่มความดันให้ของเหลว โดยมีการใส่กำลังงานเข้าไปขับเคลื่อนปั๊มส่งผลให้ความดันของของไหลเพิ่มขึ้น

ลักษณะ ปั๊มมีหลายชนิด เช่นแบบลูกสูบ แบบไหลเหวี่ยง และแบบสกรูเป็นต้น

สัญลักษณ์ รูปร่างวงกลมของไหลไหลเข้าและออกที่ขอบ และมีงานขับเพลาดังแสดงในรูปที่ 5.12 (ก)
ในรูปที่ 5.12 (ข) แสดงภาพของปั๊มน้ำแบบหอยโข่ง



(ก) สัญลักษณ์ของปั๊ม (ข)



ปั๊มหอยโข่ง

รูปที่ 5.12 (ก) สัญลักษณ์ของ Pump (ข) ปั๊มน้ำแบบหอยโข่ง

สมมุติฐานทั่วไป เป็นกระบวนการไหลแบบ SSSF

ไม่มีความร้อนผ่านเข้าออก

ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

ปริมาตรและอุณหภูมิของของเหลวไม่เปลี่ยนแปลง

กฎข้อที่หนึ่ง ปริมาตรควบคุมรอบ *pump*

$$q + h_i + \frac{v_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{v_e^2}{2} + Z_e g$$

$$w = h_i - h_e$$

จาก $h = u + Pv$ ดังนั้น

$$w = (u_i + P_i v_i) - (u_e + P_e v_e)$$

$$w = (u_i - u_e) + (P_i v_i - P_e v_e)$$

สสารเป็นของเหลวและ v คงที่

$$w = C_v(T_i - T_e) + v(P_i - P_e)$$

เพราะ T คงที่จึงเหลือเพียง

$$w = v(P_i - P_e)$$

ผลการคำนวณต้องได้เครื่องหมายของงานเป็นลบ เพราะต้องใส่งานเข้าไปขับเคลื่อน ($P_e > P_i$)

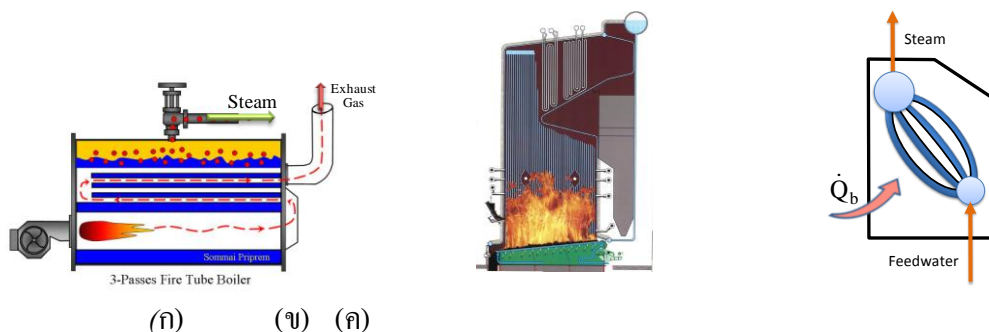
แต่นิยมเขียนในรูปงานที่ต้องใช้ได้ว่า $w_p = v\Delta P$

สมการนี้ใช้ในการหาค่าโดยประมาณของงานที่ใช้ในการปั๊ม ที่คำนวณง่ายและให้ค่าที่ใกล้เคียง

$$\dot{W} = \dot{m}w$$

7. หม้อไอน้ำ (Boiler)

หน้าที่ เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนของเหลวความดันสูงให้เป็นไอน้ำความดันสูง โดยมีการใส่ความร้อนเข้าไป ไอน้ำที่ผลิตได้ อาจเป็นไอน้ำอิ่มตัวหรือไอน้ำแห้งแต่ชนิดของหม้อไอน้ำ ไอน้ำถูกนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานต่อไป เช่น ใช้ในการขับเคลื่อนกังหันในเครื่องจักรกังหันไอน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 5.13 (ก) หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (ข) หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (ค) สัญลักษณ์หม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำมีสองแบบคือ หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (*Fire tube boiler*) และหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (*Water tube boiler*) ในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟนั้นก๊าซร้อนจากการเผาเชื้อเพลิงจะถูกบังคับให้ไหลในท่อ ซึ่งสอดอยู่ในถัง ส่วนน้ำจะเต็มในถัง ดังแสดงในรูปที่ 5.13 (ก) ไอน้ำที่ผลิตได้จะเป็นเพียงไอน้ำอิ่มตัว หม้อไอน้ำแบบนี้มีขนาดเล็ก และมักมีขายเป็นแบบสำเร็จรูป จึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม สำหรับหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 (ข) น้ำจะไหลในท่อก๊าซร้อนอยู่ภายนอก หม้อไอน้ำแบบนี้สามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่มากได้ อีกทั้งสามารถออกแบบให้ผลิตไอน้ำได้ ดังนั้นคำว่าหม้อไอน้ำจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เรียก คำที่นิยมใช้คือ *Steam generator* ในโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำใช้หม้อไอน้ำแบบนี้ ส่วนรูปที่ 5.13 (ค) เป็นภาพสัญลักษณ์หม้อไอน้ำ

สมมุติฐานทั่วไป เป็นกระบวนการไหลแบบ *SSSF*
 ไม่มีงานผ่านเข้าออก
 ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

กฎข้อที่หนึ่ง ปริมาตรควบคุมรอบ *Boiler*

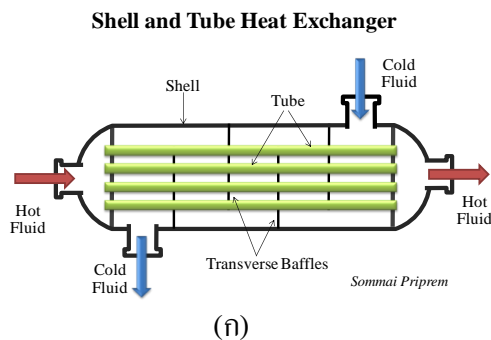
$$q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

$$q = h_e - h_i$$

$$\dot{Q} = \dot{m}q$$

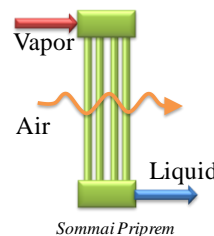
8. เครื่องควบแน่น (*Condenser*) และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (*Heat Exchanger*)

หน้าที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากของไหลที่มีอุณหภูมิสูงไปยังของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนเครื่องควบแน่นเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อควบแน่นไอให้เป็นของเหลว โดยใช้สารหล่อเย็น เช่น เครื่องควบแน่นไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำ ของโรงไฟฟ้ามักใช้น้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นสารหล่อเย็น ในขณะที่เครื่องควบแน่นไอของสารทำความเย็นของตู้เย็นหรือเครื่องปรับอากาศนั้นจะใช้อากาศรอบๆ เป็นสารหล่อเย็น เครื่องควบแน่นก็เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งนั่นเอง



(ก)

Air-cooled condenser



(ข)

รูปที่ 5.14 (ก) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (ข) เครื่องควบแน่น

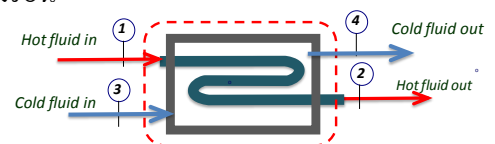
ระบบ ปริมาตรควบคุมรอบ หน้าที่ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

สมมุติฐานทั่วไป เป็นกระบวนการไหลแบบ *SSSF*
 ไม่มีงานและความร้อนผ่านเข้าออก
 ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

กฎข้อที่หนึ่ง

$$\dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + Zg \right)_i = \dot{W}_{c.v.} + \sum \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + Zg \right)_e$$

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e$$



$$\dot{m}_{hot}h_1 + \dot{m}_{cold}h_3 = \dot{m}_{hot}h_2 + \dot{m}_{cold}h_4$$

$$\dot{m}_{hot}(h_1 - h_2) = \dot{m}_{cold}(h_4 - h_3)$$

หรืออาจพิจารณาแยกพิจารณาของไหลแต่ละตัว

อัตราความร้อนที่ของไหลร้อนคายออก $(-Q_{hot})$ = อัตราความร้อนที่ของไหลเย็นได้รับ (Q_{cold})
 ด้านของไหลร้อน กำหนดปริมาตรควบคุมรอบมวลของไหลร้อน

กฎข้อที่ 1

$$\dot{Q}_{hot} + \dot{m}_{hot}h_1 = \dot{m}_{hot}h_2$$

$$\dot{Q}_{hot} = \dot{m}_{hot}(h_2 - h_1)$$

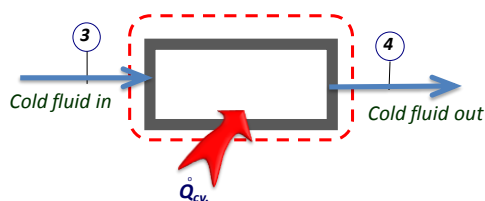


ด้านของไหลเย็น กำหนดปริมาตรควบคุมรอบมวลของไหลเย็น

กฎข้อที่ 1

$$\dot{Q}_{cold} + \dot{m}_{cold}h_3 = \dot{m}_{cold}h_4$$

$$\dot{Q}_{cold} = \dot{m}_{cold}(h_4 - h_3)$$



จาก

$$(-Q_{hot}) = (Q_{cold})$$

$$-\dot{m}_s(h_2 - h_1) = \dot{m}_{cold}(h_4 - h_3)$$

ดังนั้น

$$\dot{m}_{hot}(h_1 - h_2) = \dot{m}_{cold}(h_4 - h_3)$$

จะได้คำตอบเดียวกับวิธีก่อนหน้านี้

ตัวอย่างที่ 5.2 ไอน้ำที่ 800 kPa, 300 °C ถูก throttling 200 kPa ถ้าไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ จงหาอุณหภูมิสุดท้ายของไอและสัมประสิทธิ์จูล์-ทอมสันเฉลี่ย

วิธีทำ เนื่องจาก

$$h_e = h_i = 3056.5 \text{ kJ/kg}$$

และ

$$P_e = 200 \text{ kPa}$$

จากคุณสมบัติสองค่านี้เราสามารถหาอุณหภูมิได้จากตารางไอน้ำ

$$T_e = 292.4 \text{ °C}$$

$$\mu_{J(av)} = \left(\frac{\Delta T}{\Delta P} \right)_h = \frac{-7.6}{-600} = 0.0127 \text{ K/kPa}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 5.3 ในเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ แอมโมเนียไหลผ่านลิ้นลดความดันที่ความดัน 1.5

MPa และอุณหภูมิ 32 °C ความดันขาออกเท่ากับ 268 kPa จงคำนวณหาคุณภาพของไอของแอมโมเนีย ที่ออกจากลิ้นลดความดัน

วิธีทำ จากตารางแอมโมเนีย พบว่าที่สภาวะขาเข้าแอมโมเนียเป็นของเหลวไม่อิ่มตัว ในที่นี้จะถือว่า h_i ใกล้เคียงกับ h_f ที่ 32°C

$$h_i = 332.6 \text{ kJ/kg}$$

$$h_e = h_i$$

$$332.6 = 126.0 + x_e(1303.5)$$

$$x_e = 0.1585 = 15.85 \%$$

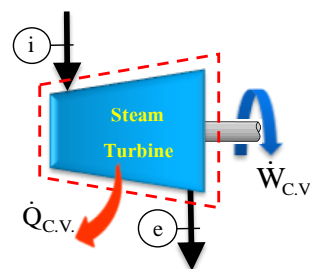
ตอบ

ตัวอย่าง 5.4 ไอน้ำไหลเข้ากังหันไอน้ำ (steam turbine) ด้วยอัตรา 1.5 kg/s ความร้อนที่ออกจากตัวกังหัน เป็น 8.5 kW ตารางข้างล่างนี้ เป็นข้อมูลของไอน้ำที่เข้าและออกจากกังหัน จงหาคำลังงาน (power) ที่ได้จากกังหัน

วิธีทำ กำหนดพื้นผิวสมมติล้อมรอบกังหันดังรูป จากข้อมูลที่กำหนดเราสามารถว่าเป็นขบวนการ SSSF ได้และมีการไหลเข้าทางเดียว – ออกทางเดียว ดังนั้นกฎข้อที่ 1 เขียนได้ว่า

$$q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

$$q = \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{\dot{m}} = \frac{-8.5 \text{ kW}}{1.5 \text{ kg/s}} = -5.67 \text{ kJ/kg}$$



จากตารางไอน้ำพบว่าเป็นไอน้ำที่ $2.0 \text{ MPa}, 350^\circ\text{C}$;

$$h_i = 3137.0 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{V_i^2}{2} = \frac{(50)^2}{2} = 1250 \text{ J/kg} = 1.25 \text{ kJ/kg}$$

$$Z_i g = \frac{(6 \text{ m})(9.8066 \text{ m/s}^2)}{1000 \text{ J/kJ}} = 0.059 \text{ kJ/kg}$$

h_e เป็นไอน้ำอิ่มตัว ($x = 100 \%$) จากตารางไอน้ำที่ 0.1 MPa ;

$$h_e = 2675.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{V_e^2}{2} = \frac{200 \times 200}{2 \times 1000} = 20.0 \text{ kJ/kg}$$

$$Z_e g = \frac{3 \times 9.8066}{1000} = 0.029 \text{ kJ/kg}$$

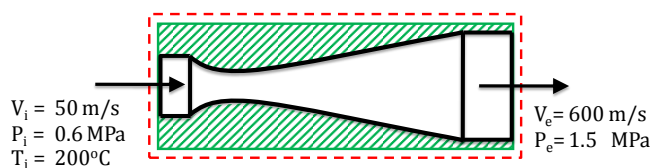
แทนค่า ; $-5.67 + 313.70 + 1.25 + 0.059 = w + 2675.5 + 20.0 + 0.029$

$$w = 437.11 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{c.v.} &= \dot{m}w &= (1.5 \text{ kg/s})(437.11 \text{ kJ/kg}) \\
 &= 655.7 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\
 &= 655.7 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

ตอบ

ตัวอย่าง 5.5 ไอน้ำที่สภาวะ 0.6 MPa, 200°C ไหลเข้าหัวฉีดซึ่งหุ้มฉนวนด้วยความเร็ว 50 m/s และด้านทางออกจากหัวฉีดมีความดัน 0.15 MPa และความเร็วเป็น 600 m/s ถ้าไอน้ำด้านทางออกเป็นไอคง จงหาอุณหภูมิ หรือถ้าเป็นไอชื้น ให้หาคุณภาพของไอ



วิธีทำ กำหนด Control surface ล้อมรอบหัวฉีด สมมติเป็นขบวนการ SSSF, $\dot{Q}_{c.v.}$ และ $\dot{W}_{c.v.}$ ในที่นี้เป็นศูนย์ และความแตกต่างของพลังงานศักย์ของขาเข้าและขาออกน้อยมาก จึงจะไม่นำมาคิด ดังนั้นกฎข้อที่ 1 จึงเหลือ

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

จากตารางไอน้ำพบว่า เป็นไอคงที่ขาเข้า ; $h_i = 2850.1 \text{ kJ/kg}$

$$\begin{aligned}
 h_e &= 2850.1 + \frac{(50)^2}{2 \times 1000} - \frac{(600)^2}{2 \times 1000} \\
 &= 2671.4 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

ไอที่ขาออกตอนนี้เรารู้คุณสมบัติ 2 ตัวแล้วนั่นคือเราสามารถกำหนดสถานะของมันได้ เนื่องจาก h_e มีค่าน้อยกว่า h_g และมากกว่า h_f ที่ความดัน 0.15 MPa แสดงว่าเป็นไอชื้น

จาก
$$h = h_f + xh_{fg} ; x = \frac{h - h_f}{h_{fg}}$$

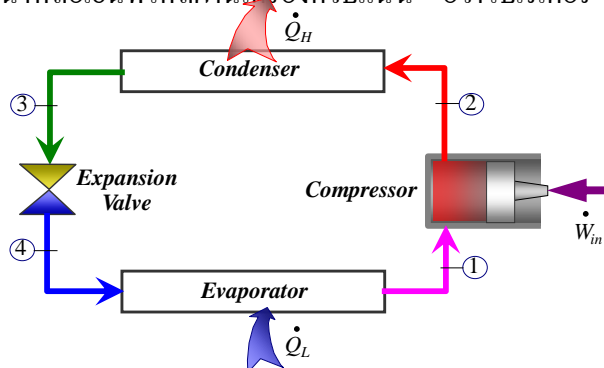
$$x = \frac{2671.4 - 467.11}{2226.5} = 0.99$$

ตอบ

ตัวอย่าง 5.6 ในระบบทำความเย็นซึ่งใช้ฟรอน -12 เป็นสารทำความเย็น ฟรอน -12 ผ่านเข้าเครื่องอัดไอ (Compressor) ที่ 150 kPa, -10°C และขาออกเป็น 1.0 MPa, 90°C อัตราการไหลเป็น 0.016 kg/s กำลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องอัดไอเป็น 1 kW เมื่อออกจากเครื่องอัดไอ ฟรอน -12 ผ่านต่อไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) ซึ่งใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็น ขาเข้าฟรอน -12 มีความดัน 1.0 MPa และ 80°C ขาออกเป็นของเหลวที่ 0.95 MPa , 35°C น้ำหล่อเย็นเข้าเครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิ 10°C และขาออกเป็น 20°C

จงหา ปริมาณความร้อนที่ถ่ายออกจากเครื่องอัดไอ

อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ไหลผ่านเครื่องควบแน่น อีวาโปเรเตอร์



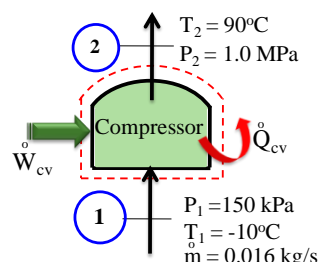
วิธีทำ

1) หาปริมาณความร้อนที่ออกจากเครื่องอัดไอ

Control volume รอบ compressor การไหลเป็นแบบ SSSF และไม่คิดการเปลี่ยนแปลง KE, PE, กฎข้อที่ 1 เขียนได้ดังนี้

$$q + h_1 = w + h_2$$

$$w = \frac{\dot{W}_{c.v.}}{\dot{m}_r} = \frac{-1\text{ kJ/s}}{0.016\text{ kg/s}} = -62.5\text{ kJ/kg}$$



จากตาราง Sat. Freon - 12 (Table A.3.1) ที่ -10°C $P_s = 0.2191\text{ MPa}$ ซึ่งมากกว่า P_1 (150 kPa) แสดงว่าเป็นไอคง สภาวะ 2 ก็เช่นเดียวกัน จากตาราง Superheated Freon - 12 (Table A.3.2)

$$h_1 = 184.619\text{ kJ/kg}; h_2 = 240.101\text{ kJ/kg}$$

$$q = (-62.5) + (240.10) - (184.62) = -7.02\text{ kJ/kg}$$

แทนค่า $\dot{Q}_{c.v.} = \dot{m}_r q = 0.016\text{ kg/s} \times (-7.02\text{ kJ/kg}) = -0.1123\text{ kW}$

ตอบ

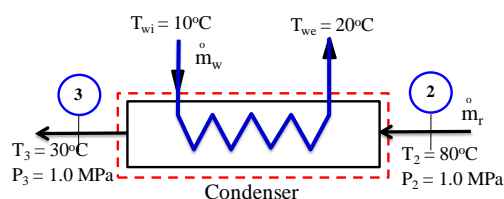
2) หาอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น

Control Volume รอบ Condenser

ตั้งสมมติฐานเช่นเดียวกับข้อแรก

และในที่นี้ w และ $q = 0$ และ

มีการไหลเข้าสองทางและออกสองทาง



ดังนั้นกฎข้อที่ 1 คือ

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e$$

$$\dot{m}_r h_{ri} + \dot{m}_w h_{wi} = \dot{m}_r h_{re} + \dot{m}_w h_{we}$$

ให้สัญลักษณ์ r แทน refrigerant , w แทน water

เราไม่ทราบสถานะของน้ำหล่อเย็น แต่โดยทั่วไปจะเป็นของเหลวไม่อัดตัว (compressed liquid) โดยประมาณแล้วเราสามารถหาค่า h_f ที่อุณหภูมินั้นๆ ได้โดยไม่ผิดพลาดมากนัก

$$h_{wi} = h_f \text{ at } 10^\circ\text{C} = 42.01 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{we} = h_f \text{ at } 20^\circ\text{C} = 83.96 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{ri} = h_3 \text{ เป็นไอคง, จากตารางได้} = 232.74 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{re} = h_4 \text{ เป็นของเหลวไม่อัดตัว ใช้ค่า } h_f \text{ ที่ } 35^\circ\text{C} = 69.49 \text{ kJ/kg}$$

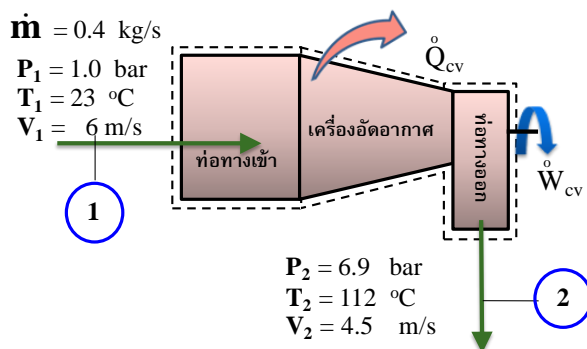
$$\dot{m}_w = \dot{m}_r \frac{(h_i - h_e)_r}{(h_e - h_i)_w}$$

$$\dot{m}_w = 0.016 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \frac{(232.74 - 69.49) \text{ kJ/kg}}{(83.96 - 42.01) \text{ kJ/kg}} = 0.0623 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ตอบ

ตัวอย่าง 5.7 อากาศไหลเข้าเครื่องอัดอากาศด้วยอัตราคงที่ 0.4 kg/s ที่เข้ามีความดัน 1 bar 23°C และความเร็ว 6 m/s ที่ขาออกมีความดัน 6.9 bar 112°C ความเร็ว 4.5 m/s ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกสู่บรรยากาศเท่ากับ 60 kW จงคำนวณหาการใช้ในการอัดอากาศ (w) และพื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้า (A_1) และทางออกของอากาศ (A_2)

วิธีทำ กำหนดปริมาตรควบคุมรอบเครื่องอัดอากาศ สมมติเป็นขบวนการ SSSF และไม่คิดการเปลี่ยนแปลง PE



กฎข้อที่ 1 :

$$q + h_1 + \frac{V_1^2}{2} = w + h_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

$$q = \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{\dot{m}} = \frac{-60 \text{ kJ/s}}{0.4 \text{ kJ/s}} = -150 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{v_1^2}{2} = \frac{(6 \text{ m})^2}{2 \times 1000} = 0.018 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{v_2^2}{2} = \frac{(4.5)^2}{2 \times 1000} = 0.010 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 - h_2 = C_{p0}(T_1 - T_2) = 1.0035 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} (23 - 112) \text{ K} = -89.31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\therefore w = (-150) + (-89.31) + (0.018) - (0.010) = -239.3 \text{ kJ/kg} \quad \underline{\text{ตอบ}}$$

$$\dot{W}_{c.v.} = \dot{m}w = (0.4 \text{ kg/s})(-239.3) = -95.72 \text{ kW}$$

จากสมการ (5.4) $\dot{m} = \frac{AV}{v}$

$$A = \frac{\dot{m}v}{V}$$

สมมติเป็นแก๊สจินตภาพ สมการกำหนดสภาวะ $Pv = RT$

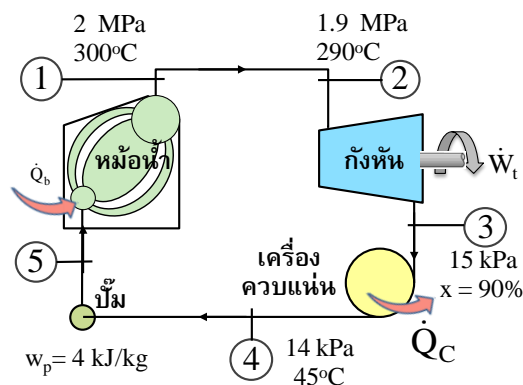
$$v_1 = \frac{(0.287 \text{ kJ/kg K})(23 + 273) \text{ K}}{100 \text{ kPa}} = 0.84952 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$A_1 = \frac{(0.4 \text{ kg/s})(0.84952 \text{ m}^3/\text{kg})}{6 \text{ m/s}} = 0.05664 \text{ m}^2$$

$$v_2 = \frac{(0.287 \text{ kJ/kg K})(112 + 273) \text{ K}}{690 \text{ kPa}} = 0.1601 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$A_2 = \frac{(0.4 \text{ kg/s})(0.1601 \text{ m}^3/\text{kg})}{4.5 \text{ m/s}} = 0.01423 \text{ m}^2$$

ตัวอย่างที่ 5.8 พิจารณาโรงจักรไอน้ำดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ ข้อมูลของโรงจักรมีดังนี้



จงหาปริมาณดังต่อไปนี้ต่อกิโลกรัมที่ไหลผ่าน

- ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านจากท่อส่งระหว่างหม้อน้ำกับกังหัน
- งานของกังหัน

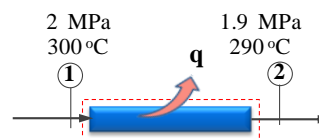
- ความร้อนที่ถ่ายเทในเครื่องควบแน่น
- ความร้อนที่ถ่ายเทในหม้อน้ำ

วิธีทำ สมมติให้การไหลเป็นขบวนการ SSSF และไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลง KE และ PE

1) C.V. รอบท่อส่งไอระหว่างหม้อน้ำและกังหัน กฎข้อที่ 1 ($w = 0$)

$$q + h_1 = h_2$$

$$q = h_2 - h_1$$



ตรวจสอบจากตาราง สภาวะที่ 1 และ 2 เป็นไอดี

$h_1 = 3023.5 \text{ kJ/kg}$ และจากการ Interpolate $h_2 = 3002.5 \text{ kJ/kg}$

$$q = 3002.5 -$$

$$3023.5 = -$$

21.0 kJ/kg

ตอบ

2) C.V. รอบกังหัน ($q = 0$) $h_2 = w + h_3$

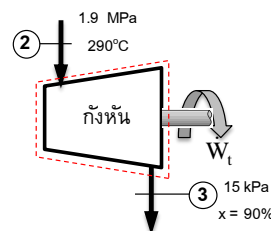
$$w = h_2 - h_3$$

$$h_3 = h_f + x_3 h_{fg}$$

$$= 225.94 + (0.9 \times 2373.1) = 2361.73 \text{ kJ/kg}$$

$$w_t = 3002.5 - 2361.73 = 640.77 \text{ kJ/kg}$$

ตอบ



3) C.V. รอบ Condenser ($w = 0$)

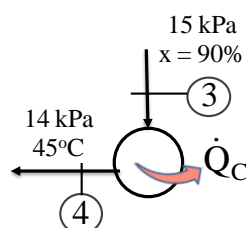
$$q + h_3 = h_4 ; \quad q = h_4 - h_3$$

ที่ 14 kPa, $T_s = 50^\circ\text{C} > T_4$; Compressed liquid

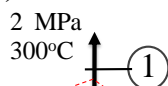
แต่ไม่มีในตาราง อนุโลมใช้ h_f ที่ $45^\circ\text{C} = 188.5 \text{ kJ/kg}$

$$q = 188.5 - 2361.73 = -2173.3 \text{ kJ/kg}$$

ตอบ



4) C.V. รอบ boiler ($w = 0$) $q + h_5 = h_1 ; \quad q = h_1 - h_5$



$$h_5 \text{ จะหาได้โดย C.V. pump} \quad h_4 = w + h_5$$

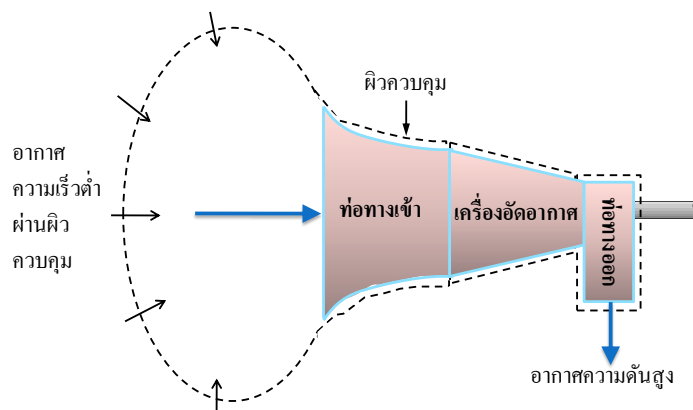
$$h_5 = h_4 - w = 188.5 - (-4) = 192.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore q_{\text{boiler}} = 3023.5 - 192.5 = 2831 \text{ kJ/kg}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 5.9 เครื่องอัดอากาศแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal air Compressor) ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ดูดอากาศจากบรรยากาศ ซึ่งมีความดัน 1 bar และอุณหภูมิ 300 K ที่ขาออกอากาศมีความดัน 4 bar อุณหภูมิ 480 K และความเร็ว 100 m/s อัตราการไหลของอากาศเป็น 15 kg/s จงคำนวณหางานที่ใช้ในการขับเครื่องอัดอากาศ

วิธีทำ เนื่องจากเราไม่รู้สภาวะของอากาศที่ทางเข้าเครื่องอัดอากาศ จึงหลีกเลี่ยงโดยกำหนดปริมาตรควบคุม ให้ห่างจากช่องทางเข้าออกไป ดังนั้นความเร็วของอากาศที่ผ่านผิวควบคุมจะน้อยมาก และสภาวะจะใกล้เคียงกับสภาวะบรรยากาศ สมมติขบวนการเป็น Adiabatic SSSF process; $KE_i = 0$ และไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์



กฎข้อที่ 1 จะเหลือ

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

$$-w = h_e - h_i + \frac{V_e^2}{2} = C_{po}(T_e - T_i) + \frac{V_e^2}{2}$$

จากตาราง A.8;

$$-w = 1.0035(480 - 300) + \frac{100^2}{2 \times 1000} = 185.6 \text{ kJ/kg}$$

$$-\dot{W}_{c.v.} = \dot{m}w$$

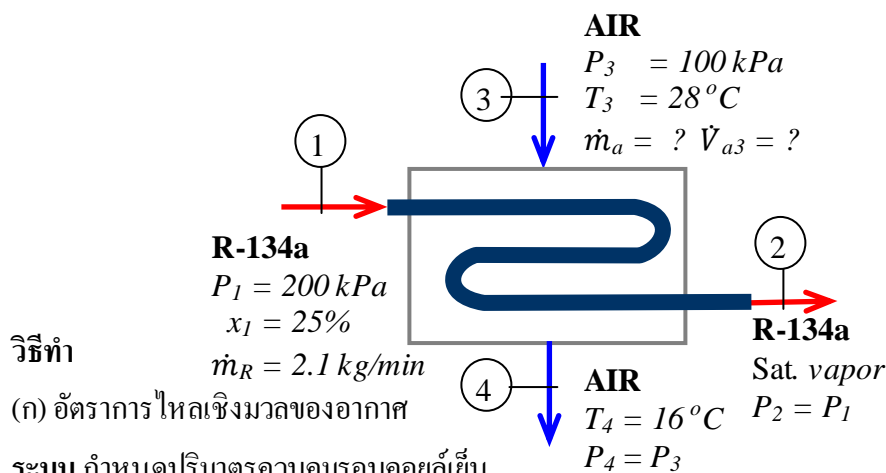
$$= (15 \text{ kg/s})(185.6 \text{ kJ/kg}) = 2784 \text{ kW}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 5.10 ในคอยล์เย็นของเครื่องปรับอากาศสารทำความเย็น R-134a ไหลเข้าที่ 200 kPa โดยมีคุณภาพของไอ $x = 25\%$ ในอัตรา 2.1 kg/min และไหลออกเป็นไออิ่มตัวที่ความดันเดียวกัน ส่วนอากาศไหลเข้าที่ 100 kPa และ 28°C. ถ้าต้องการให้อากาศขาออกมีอุณหภูมิ 16°C สมมติให้อากาศเป็นก๊าซจินตภาพ และใช้ค่าความร้อนจำเพาะคงที่ที่อุณหภูมิห้องในการคำนวณ จงหา

(ก) อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

(ข) อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ทางเข้า



สมมุติฐาน เป็นกระบวนการ SSSF ไม่คิด ΔKE , ΔPE ไม่คิดงานของพัดลม ไม่มีการถ่ายความร้อน
 เข้า-ออกจากคอยล์เย็น และ ไม่คิดความจุความร้อนของคอยล์เย็นและ

ดังนั้น 1st Law SSSF เข้า-ออก หลายทาง ลดรูปเหลือ

$$\begin{aligned}\sum \dot{m}_i h_i &= \sum \dot{m}_e h_e \\ \dot{m}_R h_1 + \dot{m}_a h_3 &= \dot{m}_R h_2 + \dot{m}_a h_4 \\ \dot{m}_a (h_3 - h_4) &= \dot{m}_R (h_2 - h_1) \\ \dot{m}_a C_{pa} (T_3 - T_4) &= \dot{m}_R (h_2 - h_1) \\ \dot{m}_a &= \frac{\dot{m}_R (h_2 - h_1)}{C_{pa} (T_3 - T_4)}\end{aligned}$$

ด้านสารทำความเย็น **R-134a**

สถานะที่ 1 เป็นของผสมที่ความดัน 200 kPa, $x = 25\%$

จากตารางที่ .. ได้ค่า $h_f = 36.84 \text{ kJ/kg}$, $h_g = 241.30 \text{ kJ/kg}$

$$h_1 = h_f + x h_g = 36.84 \text{ kJ/kg} + 0.25(241.30 \text{ kJ/kg}) = 91.17 \text{ kJ/kg}$$

สถานะที่ 2 เป็นของเหลวอิ่มตัวที่ความดัน 200 kPa $h_2 = h_g = 241.30 \text{ kJ/kg}$

$$\dot{m}_R (h_2 - h_1) = (2.1 \text{ kg/min})(241.30 - 91.17) \text{ kJ/kg} = 320.68 \text{ kJ/min}$$

ด้านอากาศ

จากตารางที่ 2 ที่ 300 K $C_p = 1.005 \text{ kJ/kgK}$

$$C_{pa} (T_3 - T_4) = 1.005 \text{ kJ/kgK}(28 - 16) \text{ K} = 12.06 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{แทนค่าได้} \quad \dot{m}_a = \frac{\dot{m}_R (h_2 - h_1)}{C_{pa} (T_3 - T_4)} = \frac{320.68 \frac{\text{kJ}}{\text{min}}}{12.06 \text{ kJ/kg}} = 25.10 \text{ kg/min} \quad \text{ตอบ}$$

(ข) พิจารณาอากาศที่ทางเข้า อยู่ที่สถานะ 100 kPa และ 28°C จากตารางที่ 1 ได้ $R = 0.287 \text{ kJ/kgK}$

$$\text{ปริมาตรจำเพาะ,} \quad v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{(0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}})(28 + 273) \text{ K}}{100 \text{ kPa}} = 0.86387 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ ทางเข้า} \quad \dot{V} = v_1 \dot{m}_a$$

$$\dot{V}_1 = (0.86387 \text{ m}^3/\text{kg})(25.10 \text{ kg/min}) = 21.68 \text{ m}^3/\text{min} \quad \text{ตอบ}$$

ตัวอย่างที่ 5.11 ในหม้ออุ่น (Heater) น้ำอ้อยของโรงงานน้ำตาลใช้ไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 25 kPa ที่ได้จากไอหัวหม้อเกลือ (Evaporator) เป็นแหล่งความร้อน โดยขาออกจากหม้ออุ่นน้ำจะมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวที่ความดันเดียวกัน น้ำอ้อยที่ความเข้มข้น 25 %Brix ที่อุณหภูมิ 30 °C ถูกนำเข้ามาอุ่นเพื่อเพิ่ม

อุณหภูมิให้เป็น 45 °C จงคำนวณปริมาณไอน้ำที่ต้องใช้ต่อตันของน้ำอ้อย ให้ใช้ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยเท่ากับ 3.67 kJ/kgK

วิธีทำ

ระบบ กำหนดปริมาตรควบคุมรอบหม้ออุ่น

สมมุติฐาน เป็นกระบวนการ SSSF ไม่คิด $\Delta KE, \Delta PE$

ไม่คิดความจุความร้อนของหม้ออุ่น และ

ไม่มีการสูญเสียความร้อนจากหม้ออุ่น

ไม่มีงานเข้า-ออกจากระบบ ดังนั้น

1st Law SSSF เข้า-ออก หลายทาง ลดรูปเหลือ

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e$$

$$\dot{m}_s h_1 + \dot{m}_j h_3 = \dot{m}_s h_2 + \dot{m}_j h_4$$

$$\dot{m}_s (h_1 - h_2) = \dot{m}_j (h_4 - h_3) = \dot{m}_j C_{pj} (T_4 - T_3)$$

เนื่องจากน้ำอ้อยเป็นของเหลวและสมมุติให้ค่าความร้อนจำเพาะคงที่ ดังนั้น $\Delta h = C_p \Delta T$

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_j C_{pj} (T_4 - T_3)}{(h_1 - h_2)}$$

$$\begin{aligned} \text{ด้านน้ำอ้อย} \quad \dot{m}_j C_{pj} (T_4 - T_3) &= [(1 \text{ ton/h})(1,000 \text{ kg/ton})](3.67 \text{ kJ/kgK})(45-30)\text{K} \\ &= 55,050 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

ด้านไอน้ำ

สถานะที่ 1 เป็นไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 25 kPa จากตารางที่ 5 ได้ค่า $h_1 = h_g = 2,617.4 \text{ kJ/kg}$

สถานะที่ 2 เป็นของเหลวอิ่มตัวที่ความดัน 25 kPa จากตารางที่ 5 ได้ค่า $h_2 = h_f = 271.9 \text{ kJ/kg}$

ดังนั้น

$$h_1 - h_2 = (2,617.4 - 271.9) \text{ kJ/kg} = 2,345.5 \text{ kJ/kg}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= \frac{55,050 \text{ kJ/h}}{2,345.5 \text{ kJ/kg}} = 23.47 \text{ kg/h} \\ \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_j} &= \frac{23.47 \text{ kg steam/h}}{1 \text{ ton juice/h}} = 23.47 \text{ kg} \frac{\text{steam}}{\text{ton juice}} \end{aligned}$$

ปริมาณไอน้ำที่ต้องใช้เท่ากับ 23.47 kg/ton juice

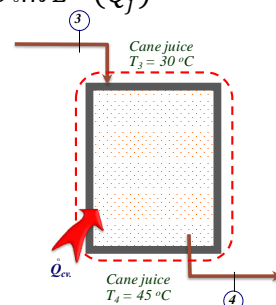
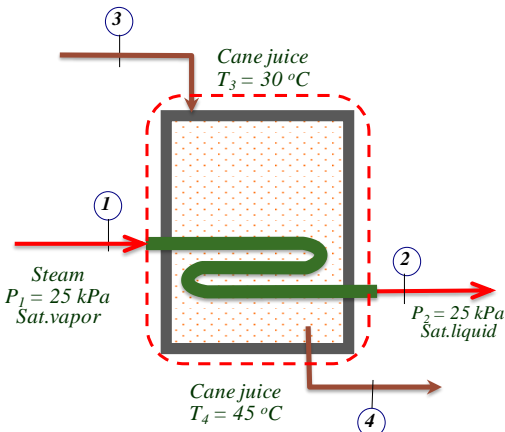
ตอบ

หรืออาจใช้วิธีแยกวิเคราะห์ตามของไหล และเชื่อมโยงด้วยความร้อนที่ส่งถ่ายดังนี้

อัตราความร้อนที่ไอน้ำคายออก $(-Q_s) =$ อัตราความร้อนที่น้ำอ้อยได้รับ (Q_j)

ด้านน้ำอ้อย กำหนดปริมาตรควบคุมมวลน้ำอ้อยในถัง กฎข้อที่ 1

$$\dot{Q}_j + \dot{m}_j h_3 = \dot{m}_j h_4$$



$$\dot{Q}_j = \dot{m}_j(h_4 - h_3)$$

ด้านไอน้ำ กำหนดปริมาณความร้อนรอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน กฎข้อที่ 1

$$\dot{Q}_s + \dot{m}_s h_1 = \dot{m}_s h_2$$

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_s (h_2 - h_1)$$

จาก

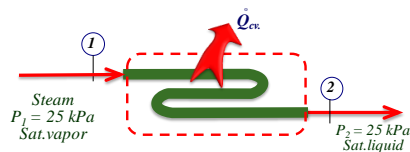
$$(-\dot{Q}_s) = (\dot{Q}_j)$$

$$-\dot{m}_s (h_2 - h_1) = \dot{m}_j (h_4 - h_3)$$

ดังนั้น

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_j C_{pj} (T_4 - T_3)}{(h_1 - h_2)}$$

จะได้คำตอบเดียวกับวิธีก่อนหน้านี้

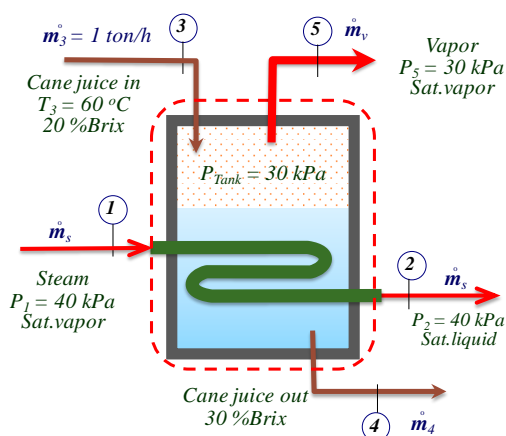


ตัวอย่างที่ 5.12 ในการเตรียมน้ำอ้อยในหม้อเคี่ยวแบบต่อเนื่อง (Continuous Evaporator) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นก่อนนำไปตกผลึก น้ำอ้อยจากหม้ออุ่นชุดสุดท้ายเข้าสู่หม้อเคี่ยวชุดแรก มีอุณหภูมิ 60 °C ความเข้มข้น 20 %Brix และต้องการเคี่ยวให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 30 %Brix ในการเคี่ยวใช้ไอน้ำที่ได้จากการระเหยในหม้อเคี่ยวชุดถัดไปซึ่งเป็นไอน้ำที่ความดัน 40 kPa ไอน้ำจะคายความร้อนให้น้ำอ้อยและควบแน่นที่ขาออกจะควบคุมให้มีสภาวะเป็นของเหลวอิ่มตัวที่ความดันเดียวกัน ภายในหม้อเคี่ยวความดันถูกควบคุมให้คงที่ที่ 30 kPa ดังแสดงในรูป ใช้ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยเท่ากับ 3.14 kJ/kgK คำนวณหา

(ก) ปริมาณไอน้ำที่ระเหยออกจากน้ำอ้อยต่อตันของน้ำอ้อยขาเข้า

(ข) ปริมาณไอน้ำที่ต้องใช้ต่อตันของน้ำอ้อยขาเข้า

หมายเหตุ %Brix เป็นหน่วยวัดความเข้มข้นของน้ำเชื่อมคำนวณได้ดังนี้ $\%Brix = \frac{m_{solid\ sugar}}{m_{juice}} \times 100\%$



วิธีทำ

(ก) ปริมาณไอน้ำที่ระเหยออกจากน้ำอ้อยต่อตันของน้ำอ้อยขาเข้า

มวลของน้ำอ้อยทั้งหมด = มวลของน้ำตาล + มวลของน้ำ

มวลของน้ำอ้อยที่ความเข้มข้น A%Bx, $m_{solid\ sugar} = \left(\frac{A\%Bx}{100}\right)(m_{juice})$

ที่ทางเข้าน้ำอ้อยมีความเข้มข้น 20 %Bx ดังนั้น $m_{solid\ sugar} = \left(\frac{20}{100} \times 1\text{kg}\right) = 0.2\text{ kg sugar/kg juice}$

ปริมาณไอน้ำที่ระเหยออกจากน้ำอ้อย , $m_v = m_{juice\ 3} - m_{juice\ 4}$

$$m_{juice} = \frac{m_{solid\ sugar}}{A\%Bx} \times 100$$

$$m_v = m_{solid\ sugar} \left(\frac{100}{\%Bx@3} - \frac{100}{\%Bx@4} \right) = 0.2 \frac{kg\ sugar}{kg\ juice} \left(\frac{100}{20} - \frac{100}{30} \right) = \frac{1}{3} \frac{kg\ sugar}{kg\ juice}$$

ดังนั้นปริมาณไอน้ำที่ระเหยออกจากน้ำอ้อยต่อตันของน้ำอ้อยขาเข้าเท่ากับ 0.3333 ton/ton Juice **ตอบ**
(ข) ปริมาณไอน้ำที่ต้องใช้ต่อตันของน้ำอ้อยขาเข้า

ระบบ กำหนดปริมาตรควบคุมรอบหม้อเคี้ยว

สมมุติฐาน เป็นกระบวนการ SSSF ไม่เกิด ΔKE , ΔPE ไม่เกิดความร้อนของหม้อเคี้ยวและไม่มี
การสูญเสียความร้อนจากหม้อเคี้ยว

ไม่มีงานเข้า-ออกจากระบบ ดังนั้น 1st Law SSSF เข้า-ออก หลายทาง ลดรูปเหลือ

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e$$

$$\dot{m}_s h_1 + \dot{m}_{j3} h_3 = \dot{m}_s h_2 + \dot{m}_{j4} h_4 + \dot{m}_v h_5$$

$$\dot{m}_s (h_1 - h_2) = \dot{m}_{j4} h_4 - \dot{m}_{j3} h_3 + \dot{m}_v h_5$$

สำหรับค่า h น้ำอ้อยซึ่งเป็นของเหลว หากสมมุติให้ค่าความร้อนจำเพาะจะหาได้จาก $\Delta h = C_p \Delta T$ เนื่องจากมวลของน้ำอ้อยไม่คงที่มีน้ำบางส่วนระเหยออกไปในระหว่างกระบวนการ ดังนั้นจึงจะ
หาค่าเอนทาลปี โดยการกำหนดสภาวะอ้างอิงที่สอดคล้องกับ สภาวะอ้างอิงของไอน้ำคือ $u_f = 0$ ที่ อุณหภูมิ 0.01 °C แต่สำหรับของเหลวที่ความดันไม่สูงเช่นกรณีนี้สามารถ ประมาณได้ว่า u กับ h มีค่า
ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงกำหนดสภาวะอ้างอิงว่า $h_0 = 0$ ที่ $T_0 = 0.0$ °C

$$\text{ดังนั้นสำหรับน้ำอ้อย} \quad (h - h_0) = C_{pj} (T - T_0) \quad \text{ได้ว่า} \quad h = C_{pj} T$$

ข้อต้องระวังในการใช้คือค่าอุณหภูมิที่นำมาแทนต้องเป็นหน่วย K แต่สามารถใช้ค่าปริมาณที่ป็น °C
เพราะ ตัวเลข 273 จะหักล้างกันไป และสมการ $h = C_{pj} T$ ได้มาจากการใช้ค่า $T_0 = 0.0$ (คือลบ 273 ออก
แล้ว) ดังนั้นค่า T ที่จะใช้แทนค่าต้องเป็น K-273 ด้วย นั่นคือใช้ค่าตัวเลขที่หน่วยเป็น °C นั้นเองแต่หน่วย
จะเป็น K

$$\text{ดังนั้น} \quad \dot{m}_s (h_1 - h_2) = \dot{m}_{j4} C_{pj} T_4 - \dot{m}_{j3} C_{pj} T_3 + \dot{m}_v h_5$$

ด้านน้ำอ้อย กำหนดให้อัตราการไหลของน้ำอ้อยขาเข้า $\dot{m}_{j3} = 1 \frac{ton}{h} = 1,000 \frac{kg}{h}$

$$\text{ดังนั้น} \quad \dot{m}_{j3} C_{pj} T_3 = \left(1,000 \frac{kg}{h} \right) \left(3.14 \frac{kJ}{kgK} \right) (60K) = 188,400 \text{ kJ/h}$$

จากข้อ (ก) จะได้อัตราการไหลของน้ำอ้อยขาออก $\dot{m}_{j4} = \left(\frac{2}{3} 1,000 \right) \frac{kg}{h} = 666.67 \frac{kg}{h}$

อุณหภูมิ น้ำอ้อยขาออกเท่ากับอุณหภูมิสมดุลในหม้อเคี้ยวที่ความดัน 30 kPa นั่นคือ $T_{sat} @ P_{tank} = 69.1$
°C

$$\dot{m}_{j4} C_{pj} T_4 = \left(666.67 \frac{kg}{h} \right) \left(3.14 \frac{kJ}{kgK} \right) (69.1K) = 144,650 \text{ kJ/h}$$

ไอหั่วหั่ว จากข้อ (ก) จะได้ว่าอัตราการไหลของไอน้ำที่ระเหย $\dot{m}_v = \left(\frac{1}{3} 1,000\right) \frac{kg}{h} = 333.33 \text{ kg/h}$

และ $h_s = h_g @ 30 \text{ kPa} = 2,624.6 \text{ kJ/kg}$

$$\dot{m}_v h_s = \left(333.33 \frac{kg}{h}\right) (2,624.6 \frac{kJ}{kg}) = 874,858 \text{ kJ/h}$$

ด้านไอน้ำ

สถานะที่ 1 เป็นไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 40 kPa จากตารางที่ 5 ได้ค่า $h_1 = h_g = 2,636.1 \text{ kJ/kg}$

สถานะที่ 2 เป็นของเหลวอิ่มตัวที่ความดัน 40 kPa จากตารางที่ 5 ได้ค่า $h_2 = h_f = 317.57 \text{ kJ/kg}$

ดังนั้น $h_1 - h_2 = (2,636.1 - 317.57) \text{ kJ/kg} = 2,318.5 \text{ kJ/kg}$

$$\text{แทนค่าได้ } \dot{m}_s = \frac{(144,650 - 188,400 + 874,858) \text{ kJ/h}}{2,318.5 \frac{kJ}{kg \text{ steam}}} = 358.5 \text{ kg steam/h}$$

$$\frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_j} = \frac{358.5 \text{ kg steam/h}}{1 \text{ ton juice/h}} = 358.5 \text{ kg} \frac{\text{steam}}{\text{ton juice}}$$

ปริมาณไอน้ำที่ต้องใช้เท่ากับ 358.5 kg/ton juice ตอบ

5.6 กระบวนการไหลและสถานะสม่ำเสมอ (The Uniform-State, Uniform-Flow Process)

ในหัวข้อ 5.4 กล่าวถึงกระบวนการไหลคงที่และสถานะคงที่ แต่กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์จำนวนไม่น้อยเป็นกระบวนการที่ไม่คงที่ เช่น การเติมของเหลวหรือแก๊สเข้าในถังปิด หรือถ่ายออก กระบวนการเหล่านี้จะสามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ยากนัก ถ้าสามารถตั้งสมมติฐานว่าเป็นกระบวนการไหลและสถานะสม่ำเสมอ (Uniform-State, Uniform-Flow Process, USUF) ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

- ปริมาตรควบคุมไม่เคลื่อนที่
- สถานะของมวลสารภายในปริมาตรควบคุม อาจเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา แต่ที่เวลาใด ๆ หนึ่ง สถานะต้องสม่ำเสมอทั่วปริมาตรควบคุม
- สถานะของมวลที่ผ่านผิวควบคุมต้องคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่อัตราการไหลของมวล อาจเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้

$$\text{จากสมการ (5.5)} \quad Q_{c.v.} + E_{in \text{ flow}} = W_{c.v.} + E_{out \text{ flow}} + \Delta E_{sys}$$

เมื่อพิจารณาระบบภายในช่วงเวลาหนึ่ง โดยกำหนดให้สถานะ 1 แทนสถานะภายในระบบเมื่อเริ่มพิจารณาและสถานะ 2 แทนสถานะสุดท้าย ดังนั้น

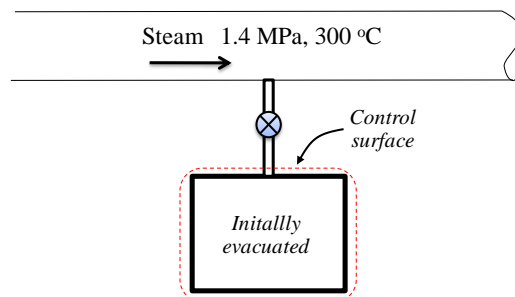
$$\Delta E_{sys} = E_2 - E_1 = (U + KE + PE)_2 - (U + KE + PE)_1$$

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

ดังนั้น จากสมการ (5.5) จะได้เป็น

$$Q_{c.v.} + \sum m_i \left(h + \frac{v^2}{2} + Zg \right)_i = W_{c.v.} + \sum m_e \left(h + \frac{v^2}{2} + Zg \right)_e + \sum \left[m_2 \left(u + \frac{v^2}{2} + Zg \right)_2 - m_1 \left(u + \frac{v^2}{2} + Zg \right)_1 \right]$$

ตัวอย่างที่ 5.13 ในท่อส่งมีไอน้ำที่ความดัน 1.4 MPa 300 °C ไหลอยู่ระหว่างท่อมีถึงซึ่งถูกทำให้เป็นสุญญากาศต่ออยู่โดยมีลิ้นปิดไว้ เมื่อเปิดลิ้นไอน้ำในท่อส่งจะไหลเข้าไปในถังจนกระทั่งความดันในถังเป็น 1.4 MPa จึงปิดลิ้น ในระหว่างขบวนการนี้ไม่มีการส่งผ่านความร้อนและไม่คำนึงถึงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ จงหาอุณหภูมิสุดท้ายภายในถัง



วิธีทำ เราต้องการ ทราบการเปลี่ยนแปลงภายในถัง ดังนั้น C.V. รอบถัง จากกฎข้อที่ 1

$$Q_{c.v.} + \sum m_i \left(h + \frac{v^2}{2} + Zg \right)_i = W_{c.v.} + \sum m_e \left(h + \frac{v^2}{2} + Zg \right)_e + \sum \left[m_2 \left(u + \frac{v^2}{2} + Zg \right)_2 - m_1 \left(u + \frac{v^2}{2} + Zg \right)_1 \right]$$

พิจารณาตัดส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องออกจะเหลือ

$$m_i h_i = m_2 u_2$$

เนื่องจาก

$$m_2 = m_i$$

ดังนั้น

$$h_i = u_2$$

h_i คือ h ที่ 1.4 MPa 300 °C (Superheated) = 3040.4 kJ/kg

แต่ความดันสุดท้ายภายในถังเป็น 1.4 MPa

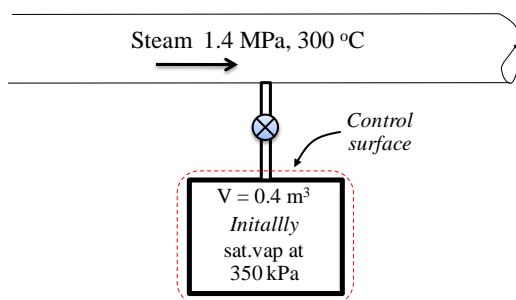
ดังนั้นสถานะในถังคือ $P = 1.4 \text{ MPa}$, $u = 3040.4 \text{ kJ/kg}$

จากตารางไอน้ำตัว $P = 1.4 \text{ MPa}$, $u_g = 2592.8 \text{ kJ/kg} < u_2$ แสดงว่ามีสถานะเป็น Superheated

Interpolate จากตารางไอน้ำจะได้อุณหภูมิ สุดท้ายภายในถังเป็น 452 °C

ตอบ

ตัวอย่างที่ 5.14 จากตัวอย่างที่แล้วถ้าถังปริมาตร 0.4 m³ และเดิมบรรจุไอน้ำตัวที่ 350 kPa จากนั้นจึงเปิดลิ้นให้ไอน้ำในท่อไหลเข้าสู่ถังจนกระทั่งความดันเป็น 1.4 MPa จงคำนวณหามวลของไอน้ำที่ไหลเข้าสู่ถัง



วิธีทำ C.V. รอบถัง แต่กรณีนี้ใน C.V. เริ่มแรกจะมีมวล m_1 และพลังงานภายใน $m_1 u_1$

ดังนั้น กฎข้อที่ 1 จะเหลือ

$$m_i h_i = m_2 u_2 - m_1 u_1$$

จากกฎทรงมวล

$$m_i = m_2 - m_1$$

ดังนั้น

$$(m_2 - m_1) h_i = m_2 u_2 - m_1 u_1$$

$$m_2 (h_i - u_2) = m_1 (h_i - u_1) \quad (a)$$

$$m_1 = \frac{V}{v_{g1}} = \frac{0.4 \text{ m}^3}{0.5243 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0.763 \text{ kg}$$

$$u_1 = u_g \text{ ที่ } 350 \text{ kPa} = 2548.9 \text{ kJ/kg}$$

$$h_i = h \text{ ที่ } 1.4 \text{ MPa, } 300^\circ\text{C} = 3040.4 \text{ kJ/kg}$$

จะเห็นว่า มี 2 ตัวที่ยังไม่ทราบค่า (m_2, u_2) แต่มีเพียงสมการเดียว

แต่เนื่องจาก $m_2 = \frac{V}{v_2}$ แทนใน (a) จะได้ว่า

$$\frac{V}{v_2} (h_i - u_2) = m_1 (h_i - u_1)$$

$$\frac{0.4}{v_2} (3040.4 - u_2) = 0.763 (3040.4 - 2548.9) = 375.015$$

$$\text{จัดรูปใหม่} \quad (3040.4) - (u_2) - (937.54 v_2) = 0 \quad (b)$$

ที่ความดันหนึ่งๆ ($P_2 = 1.4 \text{ MPa}$) u_2 และ v_2 ซึ่งเป็นคุณสมบัติจะขึ้นกับค่า T_2 เท่านั้น นั่นคือถ้ารู้ T_2 ตัวเดียว u_2 และ v_2 ก็จะหาได้ด้วย ดังนั้นในการแก้สมการ (b) จะทำได้โดยการลองผิดลองถูก โดยสมมติค่า T_2

$$\text{สมมติ } T_2 = 250^\circ\text{C}; \text{ จะได้ } v_2 = 0.1635 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad u_2 = 2698.3 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{แทนค่าในสมการ (b); } 3040.4 - 2698.3 - (937.54 \times 0.1635) = 188.81 \neq 0$$

$$\text{สมมติ } T_2 = 350^\circ\text{C}; \text{ จะได้ } v_2 = 0.2003 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad u_2 = 2869.2 \text{ kJ/kg}$$

แทนค่าในสมการ (b); $3040.4 - 2698.3 - (937.54 \times 0.2003) = -16.59 \neq 0$

ค่า T_2 จะถูกต้องเมื่อค่าทางซ้ายมือ (LHS) ของสมการ (b) เป็น 0 แต่เป็นการยากมากที่จะลองให้ได้ค่าที่ถูกต้องพอดี จากการลองสองค่าที่แล้วเราพอจะใช้การเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ก็จะได้ค่าที่ใกล้เคียงพอสมควร

$$T_2 = 250 + \frac{350 - 250}{-16.59 - 188.81} \times (0 - 188.81) = 342 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Interpolate ที่ $P = 1.4 \text{ MPa}$, $T = 342 \text{ } ^\circ\text{C}$ จะได้ $v_2 = 0.1974 \text{ m}^3/\text{kg}$, $u_2 = 2855.8 \text{ kJ/kg}$

แทนค่าใน (b); $3040.4 - 2855.8 - (937.54 \times 0.1974) = -0.47 \neq 0$

$$\therefore m_2 = \frac{0.4}{0.1974} = 2.026 \text{ kg}$$

ดังนั้น มวลของไอน้ำที่ไหลเข้าสู่ถัง $m_1 = m_2 - m_1 = 2.026 - 0.763 = 1.263 \text{ kg}$ ตอบ

ตัวอย่างที่ 5.15 ถังปริมาตร 2 m^3 เดิมบรรจุแอมโมเนียที่ $40 \text{ } ^\circ\text{C}$ โดยมีส่วนที่เป็นของเหลวและไอครึ่งต่อครึ่งโดยปริมาตร จากนั้นไอถูกดูดออกทางด้านบนของถัง (สมมติว่ามีแต่ไอเท่านั้นที่ถูกดูดออก) จนกระทั่งอุณหภูมิเป็น $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ ในขบวนการนี้ไม่มีการถ่ายเทความร้อน จงคำนวณหามวลของไอน้ำแอมโมเนียที่ถูกดูดออกไป

วิธีทำ

ระบบ C.V. รอบถัง เป็นระบบเปิด

สมมุติฐาน กระบวนการ USUF $Q_{c.v.} = 0$, $W_{c.v.} = 0$,

และไม่คิดการเปลี่ยนแปลง KE และ PE

ดังนั้น กฎข้อที่ 1 เหลือ

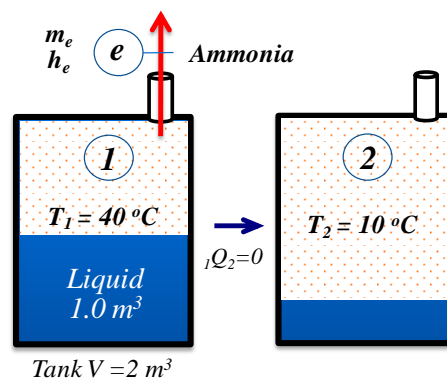
$$0 = m_e h_e + m_2 u_2 - m_1 u_1$$

สมดุลมวล $m_e = m_1 - m_2$

แทนค่า $(m_1 - m_2)(h_e) = m_1 u_1 - m_2 u_2$

$$m_2(h_2 - u_2) = m_1 h_e - m_1 u_1 \quad (a)$$

$$m_1 = m_{fl} + m_{gl} = \frac{V_{fl}}{v_{fl}} + \frac{V_{gl}}{v_{gl}} = \frac{1 \text{ m}^3}{0.001726 \text{ m}^3/\text{kg}} + \frac{1 \text{ m}^3}{0.0833 \text{ m}^3/\text{kg}}$$



$$= 579.4 + 12.0 = 591.4 \text{ kg}$$

$$m_1 u_1 = (mu)_{f1} + (mu)_{g1}$$

จาก

$$u = h - Pv$$

$$u_{f1} = 371.7 - (1554.33 \times 0.001726) = 369.0 \text{ kJ/kg}$$

$$u_{g1} = 1472.2 - (1554.33 \times 0.0833) = 1342.7 \text{ kJ/kg}$$

$$m_1 u_1 = (579.4 \times 369.0) + (12.0 \times 1342.7) = 229.9 \text{ kJ}$$

พิจารณาค่า h_c ; h_c จะไม่คงที่โดยจะเปลี่ยนแปลงจาก h_c ที่ 40°C ไปเป็น h ที่ 10°C แต่สถานะสุดท้ายนี้เรายังไม่รู้ ในขั้นนี้จะสมมติว่าสถานะสุดท้ายยังคงประกอบด้วยไอและของเหลวอยู่ ดังนั้นไอ

จำนวนสุดท้ายที่ออกจากถังก็จะเป็ไออิ่มตัวที่ 10°C ; ที่ 40°C $h_g = 1472.2 \text{ kJ/kg}$ และที่ 10°C $h_g = 1453.3 \text{ kJ/kg}$ ซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้น h_c จะใช้ค่าเฉลี่ยระหว่างสองค่านี้

$$(h_c)_{av} = 1462.8 \text{ kJ/kg}$$

พิจารณาสมการ (a) จะเห็นว่าขณะนี้ มี unknown อยู่ 2 ตัวคือ m_2 และ u_2 และจากสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าสถานะสุดท้ายประกอบด้วยไอและของเหลว เราจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ unknown ตัวเดียวได้ดังนี้

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{V}{v_{f2} + x_2 v_{fg2}} = \frac{2.0}{0.001601 + x_2 (0.2040)}$$

$$u_2 = u_{f2} + x_2 u_{fg2} = 226.6 + x_2 (1100.3)$$

แทนค่าในสมการ (a)

$$\frac{2.0}{0.001601 + x_2 (0.2040)} \times (1462.8 - 226.6 - 1100.3x_2) = (591.4 \times 1472.2) - 229.910$$

แก้สมการได้ $x_2 = 0.01104$ ($x < 1$ แสดงว่าสมมติฐาน ที่ตั้งไว้ว่าสถานะสุดท้ายประกอบด้วยไอและของเหลว ถูกต้อง)

$$\therefore v_2 = 0.001601 + (0.01104 \times 0.2040) = 0.003854 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$m_2 = \frac{2}{0.003854} = 518.9 \text{ kg}$$

\therefore มวลของไอแอมโมเนียที่ถูกดูดออก $m_e = m_1 - m_2 = 591.4 - 518.9 = 72.5 \text{ kg}$ ตอบ

Concussion : สรุปท้ายบทที่ 5

ในบทนี้จะบรรยายการใช้กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในระบบเปิด ซึ่งแบ่งหัวข้อย่อย ดังต่อไปนี้

1. ปริมาตรควบคุมและกฎทรงมวล (Control Volume and Conservation of mass)

ปริมาตรควบคุม คือ ปริมาตรใดๆที่เรากำหนดขึ้นเองเพื่อศึกษาหรือวิเคราะห์ และเมื่อพิจารณา

ถึงกฎทรงมวลในความสัมพันธ์กับปริมาตรควบคุม จะได้ว่า $\sum m_e - \sum m_i = (m_2 - m_1)$

ถ้าลองพิจารณาของไหลในท่อที่ไหลอย่างสม่ำเสมอจะได้ว่า $\dot{m} = \rho AV$

และถ้าลองพิจารณาการไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลเชิงมวลคงที่ในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่จะได้ว่า

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \rho_3 A_3 V_3 = \rho_4 A_4 V_4$$

2. กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิด

จากกฎทรงของพลังงานจะได้ว่า $Q_{c.v.} + E_{in\ flow} = W_{c.v.} + E_{out\ flow} + \Delta E_{sys}$

3. พลังงานของการไหล (Flow Energy) คือ พลังงานรูปหนึ่งของของไหลที่มีการไหลภายใต้ความดัน

โดย $W = PV$ ดังนั้น พลังงานรวมของของไหล มีค่าเท่ากับ $U + PV + KE + PE$ และจากเอนทัลปี

$$h = U + PV \text{ สรุปได้ว่า } E_{flow} = m \left(h + \frac{V^2}{2} + Zg \right)$$

4. กระบวนการไหลคงที่และสถานะคงที่ (Steady State- Steady Flow Process, SSSF) ในการวิเคราะห์

อุปกรณ์ต่างๆ เรามักกำหนดให้สถานะต่างๆและกระบวนการไหลคงที่ และสำหรับระบบที่การไหลเข้า

ทางเดียวและออกทางเดียว สมการจะเป็น $q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g \quad J/kg$

5. วิเคราะห์กระบวนการในอุปกรณ์ทางวิศวกรรมที่มักพบบ่อย

5.1 Throttling Valve คือ วาล์วที่ใช้ปรับการไหลของของไหลในท่อ

$$\text{กฎข้อที่หนึ่ง} : \quad q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

$$h_i = h_e$$

5.2 หัวฉีด (Nozzle) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เพิ่มพลังงานจลน์ (ความเร็ว) ให้กับของไหล

$$\text{กฎข้อที่หนึ่ง} : \quad q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

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

5.3 Diffuser คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เพิ่มความดันให้กับของไหล โดยลดความเร็วและเปลี่ยนเป็นเอนทัลปี

$$\text{กฎข้อที่หนึ่ง} : \quad q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

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

5.4 เครื่องอัด (Compressor) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เพิ่มความดันให้กับของไหล โดยใส่กำลังงานเข้าไป

$$\text{กฎข้อที่หนึ่ง} : \quad q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

$$w = h_i - h_e$$

$$\dot{W} = \dot{m}w$$

5.5 กังหัน (Turbine) คือ อุปกรณ์ผลิตงาน โดยของไหลที่มีความดันสูงไหลเข้า ทำให้ใบพัดหมุนได้งาน

$$\text{กฎข้อที่หนึ่ง} : q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

$$q + h_i = w + h_e$$

$$\dot{W} = \dot{m}w \text{ และ } \dot{Q} = \dot{m}q$$

5.6 ปั๊ม (Pump) คือ อุปกรณ์เพิ่มความดันโดยใส่งานเข้าไปทำให้ใบพัดหมุนของเหลวความดันเพิ่มขึ้น

$$\text{กฎข้อที่หนึ่ง} : q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

$$w = h_i - h_e$$

$$w = (u_i + P_i v_i) - (u_e + P_e v_e)$$

$$w = (u_i - u_e) + (P_i v_i - P_e v_e)$$

$$w = C_v(T_i - T_e) + v(P_i - P_e)$$

$$w = v(P_i - P_e)$$

5.7 หม้อไอน้ำ (Boiler) คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนของเหลวความดันสูงให้เป็นไอน้ำความดันสูงโดยการใส่ความร้อนเข้าไป และไอน้ำนี้จะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานต่อไป

$$\text{กฎข้อที่หนึ่ง} : q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + Z_i g = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g$$

$$q = h_e - h_i$$

$$\dot{Q} = \dot{m}q$$

5.8 เครื่องควบแน่น และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Condenser and Heat Exchanger) โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากของไหลที่อุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ ส่วนเครื่องควบแน่น จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ไอควบแน่นเป็นของเหลว

$$\text{กฎข้อที่หนึ่ง} : \dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + Zg \right)_i = \dot{W}_{c.v.} + \sum \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + Zg \right)_e$$

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e$$

$$\dot{m}_{hot} h_1 + \dot{m}_{cold} h_3 = \dot{m}_{hot} h_2 + \dot{m}_{cold} h_4$$

$$\dot{m}_{hot} (h_1 - h_2) = \dot{m}_{cold} (h_4 - h_3)$$

6. กระบวนการไหลและสถานะสม่ำเสมอ (Uniform State-Uniform Flow Process, USUF)

กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์จำนวนไม่น้อยที่เป็นกระบวนการไม่คงที่เราได้ตั้งสมมุติฐานว่าเป็นกระบวนการไหลและสถานะสม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาตามกฎข้อที่หนึ่งจะได้ว่า

$$\dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + Zg \right)_i = \dot{W}_{c.v.} + \sum \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + Zg \right)_e + \sum \left[\dot{m}_2 \left(u + \frac{V^2}{2} + Zg \right)_2 - \dot{m}_1 \left(u + \frac{V^2}{2} + Zg \right)_1 \right]$$

Exercises : แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5

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.

5-33 Air at 600 kPa and 500 K enters an adiabatic nozzle that has an inlet -to-exit area ratio of 2: 1 with a velocity of 120 m/s and leaves with a velocity of 380 m/s. Determine (a) the exit temperature and (b) the exit pressure of the air. *Answers: (a) 436.5 K, (b) 330.8 kPa*

5-41 Refrigerant-134a enters a diffuser steadily as saturated vapor at 800 kPa with a velocity of 120 m/s, and it leaves at 900 kPa and 40°C. The refrigerant is gaining heat at a rate of 2 kJ/s as it passes through the diffuser. If the exit area is 80 percent greater than the inlet area, determine (a) the exit velocity and (b) the mass flow rate of the refrigerant. *Answers: (a) 60.8 m/s, (b) 1.308 kg/s*

5-42 Steam enters a nozzle at 400°C and 800 kPa with a velocity of 10 m/s, and leaves at 300°C and 200 kPa while losing heat at a rate of 25 kW. For an inlet area of 800 cm², determine the velocity and the volume flow rate of the steam at the nozzle exit. *Answers: 606 m/s, 2.74 m³/s*

5-47 Steam flows steadily through an adiabatic turbine. The inlet conditions of the steam are 10 MPa, 450°C, and 80 m/s, and the exit conditions are 10 kPa, 92 percent quality, and 50 m/s. The mass flow rate of the steam is 12 kg/s. Determine (a) the change in kinetic energy, (b) the power output, and (c) the turbine inlet area. *Answers: (a) -1.95 kJ/kg, (b) 10.2 MW, (c) 0.00447 m²*

5-50 Steam flows steadily through a turbine at a rate of 20,000 kg/h, entering at 7 MPa and 500°C and leaving at 40 kPa as saturated vapor. If the power generated by the turbine is 4 MW, determine the rate of heat loss from the steam.

5-51 Steam enters an adiabatic turbine at 8 MPa and 500 °C at a rate of 3 kg/s and leaves at 20 kPa. If the power output of the turbine is 2.5 MW, determine the temperature of the steam at the turbine exit. Neglect kinetic energy changes. *Answer: 60.1 C*

5-52 Argon gas enters an adiabatic turbine steadily at 900 kPa and 450°C with a velocity of 80 m/s and leaves at 150 kPa with a velocity of 150 m/s. The inlet area of the turbine is 60 cm². If the power output of the turbine is 250 kW, determine the exit temperature of the argon.

5-55 Air enters the compressor of a gas-turbine plant at ambient conditions of 100 kPa and 25°C with a low velocity and exits at 1 MPa and 347°C with a velocity of 90 m/s. The compressor is cooled at a rate of 1500 kJ/min, and the power input to the compressor is 250 kW. Determine the mass flow rate of air through the compressor.

5-73 In steam power plants, open feedwater heaters are frequently utilized to heat the feedwater by mixing it with steam bled off the turbine at some intermediate stage. Consider an open feed water heater that operates at a pressure of 1000 kPa. Feedwater at 50°C and 1000 kPa is to be heated with superheated steam at 200°C and 1000 kPa. In an ideal feedwater heater, the mixture leaves the heater as saturated liquid at the feedwater pressure. Determine the ratio of the mass flow rates of the feedwater and the superheated vapor for this case. *Answer: 3.73*

5-76 Refrigerant-134a at 1 MPa and 90°C is to be cooled to 1 MPa and 30°C in a condenser by air. The air enters at 100 kPa and 27°C with a volume flow rate of 600

m³/min and leaves at 95 kPa and 60°C. Determine the mass flow rate of the refrigerant.
Answer: 100 kg/min

5-77 Air enters the evaporator section of a window air conditioner at 100 kPa and 32°C with a volume flow rate of 6 m³/min. Refrigerant-134a at 140 kPa with a quality of 30 percent enters the evaporator at a rate of 1.8 kg/min and leaves as saturated vapor at the same pressure. Determine (a) the exit temperature of the air and (b) the rate of heat transfer from the air.

5-78 Refrigerant-134a at 700 kPa, 70°C, and 8 kg/min is cooled by water in a condenser until it exists as a saturated liquid at the same pressure. The cooling water enters the condenser at 300 kPa and 15°C and leaves at 25°C at the same pressure. Determine the mass flow rate of the cooling water required to cool the refrigerant. *Answer:* 42.0 kg/min

5-80 Steam enters the condenser of a steam power plant at 20 kPa and a quality of 95 percent with a mass flow rate of 20,000 kg/h. It is to be cooled by water from a nearby river by circulating the water through the tubes within the condenser. To prevent thermal pollution, the river water is not allowed to experience a temperature rise above 10°C. If the steam is to leave the condenser as saturated liquid at 20 kPa, determine the mass flow rate of the cooling water required. *Answer:* 297.7 kg/s
