

Thermodynamics I

Assoc.Prof.Somma Pripem, Ph.D.

Chapter 7 : Entropy



บทที่ 7

เอนโทรปี

(Entropy)

ในการศึกษาข้อที่หนึ่งเราเริ่มโดยการกล่าวถึง ข้อที่หนึ่งกับวัฏจักร แล้วก็บัญญัติคุณสมบัติขึ้นมาหนึ่งตัวคือ พลังงานภายใน ซึ่งทำให้สามารถพิจารณาเปลี่ยนแปลงของกระบวนการในเชิงปริมาณโดยใช้ข้อที่หนึ่งได้ ในทำนองเดียวกันเราได้กล่าวถึงข้อที่สองสำหรับวัฏจักร และจากนี้เราจะพบว่าข้อที่สอง จะนำไปสู่การบัญญัติคุณสมบัติตัวใหม่ คือ เอนโทรปี ซึ่งจะใช้ข้อนี้ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในเชิงปริมาณของการเปลี่ยนแปลงได้

7.1 ความไม่เท่ากันของเคลาสีอุส (Inequality of Clausius)

ก่อนที่จะพิจารณาถึง เอนโทรปี ขั้นแรกต้องทำความเข้าใจกับที่มาของ ความไม่เท่ากันของเคลาสีอุส ซึ่งกล่าวว่า วัฏจักรใดๆ ผลรวมของอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนต่ออุณหภูมิสัมบูรณ์ มีค่าไม่เกินศูนย์ เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

เนื่องจากวัฏจักรคืนสภาพ (Reversible cycle) ใดๆ สามารถแทนได้ด้วยวัฏจักรคาร์โน ดังนั้นในการวิเคราะห์ เราจึงสามารถพิจารณาเฉพาะวัฏจักรคาร์โนแทนได้

พิจารณาวัฏจักรเครื่องยนต์ความร้อนคาร์โน ซึ่งทำงานระหว่างแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ T_H และ T_L ดังแสดงในรูปที่ 7.1 อุณหภูมิทั้งสองจะต้องคงที่ ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา และถ้าใช้สเกลอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิเคลวิน จะได้ว่า

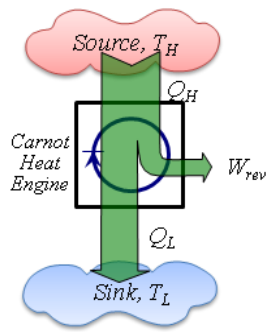
$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

นั่นคือ

$$\frac{Q_H}{Q_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

ดังนั้น

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{Q_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0$$



รูปที่ 7.1 เครื่องยนต์ความร้อนคาร์โน

คราวนี้พิจารณาวัฏจักรไม่คืนสภาพ (irreversible Cycle) ซึ่งทำงานระหว่าง T_H และ T_L เหมือนกัน และได้รับปริมาณความร้อน Q_H เท่าเดิม เมื่อเปรียบเทียบกับวัฏจักรคืนสภาพได้จากกฎข้อที่สอง เราสรุปได้ว่า

$$W_{irr} < W_{rev}$$

เนื่องจาก $Q_H - Q_L = W$ จึงเขียนได้ว่า

$$Q_H - Q_{L_{irr}} < Q_H - Q_{L_{rev}}$$

$$Q_{L_{irr}} < -Q_{L_{rev}}$$

ดังนั้น

$$\int \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} < 0$$

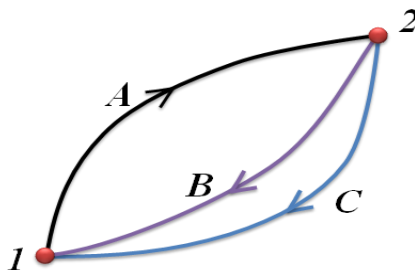
สำหรับปริมาณความร้อนก็พิสูจน์ได้ทำนองเดียวกัน จึงสรุปได้ว่า สำหรับวัฏจักรใดๆ

$$\int \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (7.1)$$

อสมการนี้มีชื่อเรียกว่า ความไม่เท่ากันของเคลาเซียส (Inequality of Clausius) ซึ่งจะเป็นสมการที่ใช้ตรวจสอบวัฏจักรได้ว่าเป็น วัฏจักรคืนสภาพ (Reversible Cycle) หาก $\int \frac{\delta Q}{T} = 0$ หรือเป็นวัฏจักรไม่คืนสภาพ (irreversible Cycle) หาก $\int \frac{\delta Q}{T} < 0$ และจะเป็นวัฏจักรที่ไม่สามารถเกิดขึ้นจริงได้หาก $\int \frac{\delta Q}{T} > 0$

7.2 เอนโทรปี (Entropy)

จากสมการ (7.1) และรูปที่ (7.2) เราจะพบคุณสมบัติตัวใหม่ที่เรียกว่า เอนโทรปี โดยเมื่อพิจารณาระบบหนึ่งซึ่งเปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการคืนสภาพได้ A จากสถานะ 1 ไปเป็นสถานะ 2 และย้อนกลับจนครบวัฏจักร โดยทาง B ซึ่งเป็นกระบวนการคืนสภาพได้เช่นกัน



รูปที่ 7.2 รูปประกอบการแสดงว่าเอนโทรปีเป็นคุณสมบัติของสสารเนื่องจากเป็นวัฏจักรคืนสภาพ จึงเขียนได้ว่า

$$\int \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_{1A}^{2A} \frac{\delta Q}{T} + \int_{2B}^{1B} \frac{\delta Q}{T}$$

จากนั้นพิจารณาวัฏจักรคืนสภาพได้อีกวัฏจักรหนึ่ง ซึ่งเปลี่ยนแปลงครั้งแรกเหมือนเดิมแต่ได้ย้อนกลับทาง C จะได้ว่า

$$\int \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_{1A}^{2A} \frac{\delta Q}{T} + \int_{2C}^{1C} \frac{\delta Q}{T}$$

จากสมการ (1) - (2) จะได้

$$\int_{2B}^{1B} \frac{\delta Q}{T} = \int_{2C}^{1C} \frac{\delta Q}{T}$$

เนื่องจาก $\frac{\delta Q}{T}$ เท่ากันสำหรับกระบวนการคืนสภาพได้ การเปลี่ยนแปลงระหว่างสภาวะ 2 และ 1 เราจึงสรุปได้ว่า ปริมาณนี้ไม่ขึ้นอยู่กับกระบวนการ แต่ขึ้นกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะสุดท้ายเท่านั้น ดังนั้น มันจึงเป็นคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ คุณสมบัตินี้เรียกว่า เอนโทรปี ให้สัญลักษณ์เป็น S เขียนได้ว่า

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} \quad (7.2)$$

เอนโทรปีเป็นคุณสมบัติอิงมวล และเอนโทรปีต่อหน่วยน้ำหนักให้สัญลักษณ์เป็น s การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีของระบบ จะหาได้จากการอินทิเกรตสมการ (7.2)

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} \quad (7.3)$$

การที่จะอินทิเกรตสมการนี้ได้ต้องรู้ความสัมพันธ์ระหว่าง T และ Q สิ่งสำคัญคือเอนโทรปีเป็นคุณสมบัติ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจากสถานะหนึ่งไปสู่อีกสถานะหนึ่ง มีค่าเท่ากันทุกๆ กระบวนการ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการคืนสภาพหรือกระบวนการไม่คืนสภาพ แม้ว่าสมการ (7.3) เป็นการหาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของกระบวนการคืนสภาพ แต่ปริมาณอันนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีทุกๆ กระบวนการระหว่างสถานะทั้งสอง

สมการ (7.3) สามารถหาได้เฉพาะกระบวนการคืนสภาพเอนโทรปี แต่ไม่สามารถบอกค่าเอนโทรปีสมบูรณ์ได้เลย กฎข้อที่สามของไดนามิกส์บอกว่า เอนโทรปีของสารบริสุทธิ์มีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ อย่างไรก็ตามค่าเอนโทรปีสมบูรณ์จะมีค่าสำคัญก็ต่อเมื่อวิเคราะห์เกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมี แต่ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีแล้ว การคิดปริมาณเอนโทรปีเทียบกับสถานะอ้างอิงหนึ่งๆ ก็จะทำให้ผลเหมือนกัน อย่างที่ใช้ในตารางเทอร์โมไดนามิกส์ต่างๆ เช่น ตารางไอน้ำ ตารางแอมโมเนีย เป็นต้น

7.3 เอนโทรปีของสารบริสุทธิ์ (The Entropy of a Pure Substance)

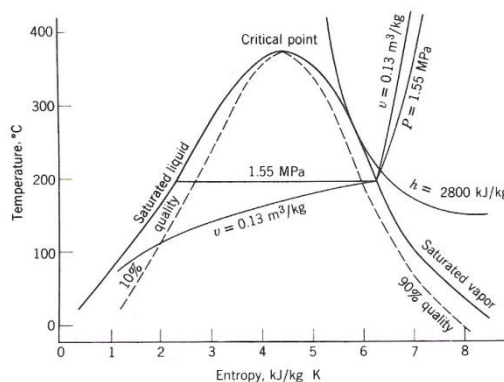
เอนโทรปีเป็นคุณสมบัติอิงมวล ปริมาณเอนโทรปีจำเพาะ (เอนโทรปีต่อหน่วยมวล) มีแสดงในตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่นเดียวกับปริมาณจำเพาะหรือเอนทัลปีจำเพาะ หน่วยของเอนโทรปีจำเพาะเป็น kJ/kg K ค่าที่ปรากฏในตารางเป็นค่าเปรียบเทียบกับสถานะอ้างอิง ในตารางไอน้ำ เอนโทรปีของของเหลวอิ่มตัวที่ 0.01°C มีค่าเป็นศูนย์ และสำหรับสารทำความเย็นโดยทั่วไป เช่น ฟรีออน-12 และแอมโมเนีย มักจะกำหนดให้เอนโทรปีของของเหลวอิ่มตัวที่ -40°C เป็นศูนย์ ในสถานะที่เป็นของผสม ปริมาณเอนโทรปีก็จะหาได้เช่นเดียวกับคุณสมบัติอื่น ๆ โดยคำนวณหาจาก

$$s = (1 - x) s_f + x s_g$$

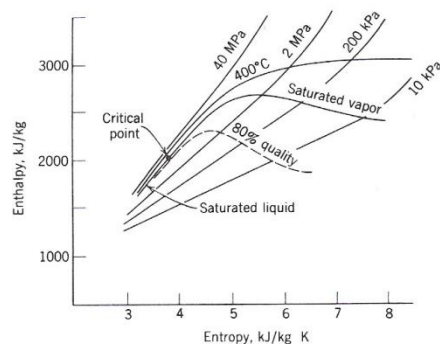
$$s = s_f + s_{fg}$$

$$s = s_g - (1 - x) s_{fg} \quad (7.4)$$

คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารมักจะแสดงด้วยแผนภาพอุณหภูมิ - เอนโทรปีและแผนภาพเอนทัลปี - เอนโทรปี ซึ่งมักเรียกว่า Mollier diagram มีลักษณะดังรูป 7.3 และ 7.4 แผนภาพทั้งสองนี้มีประโยชน์มากทั้งในการแสดงข้อมูล และแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของกระบวนการต่างๆ นักศึกษาต้องพยายามทำความเข้าใจให้ดีเพราะจะต้องได้ใช้ต่อไป



รูปที่ 7.3 แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปี



รูปที่ 7.4 แผนภาพเอนทาลปี-เอนโทรปี

7.4 การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในกระบวนการคืนสภาพ (Entropy Change in Reversible Processes)

หลังจากที่แสดงให้เห็นแล้วว่าเอนโทรปีเป็นคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างหนึ่ง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความสำคัญของมันในกระบวนการต่าง ๆ แต่จะจำกัดขอบเขต โดยกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการคืนสภาพเท่านั้น ด้วยการพิจารณาถึงวัฏจักรคาร์โน ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการถ่ายเทความร้อนคืนสภาพ และกระบวนการไม่ส่งถ่ายความร้อนคืนสภาพ

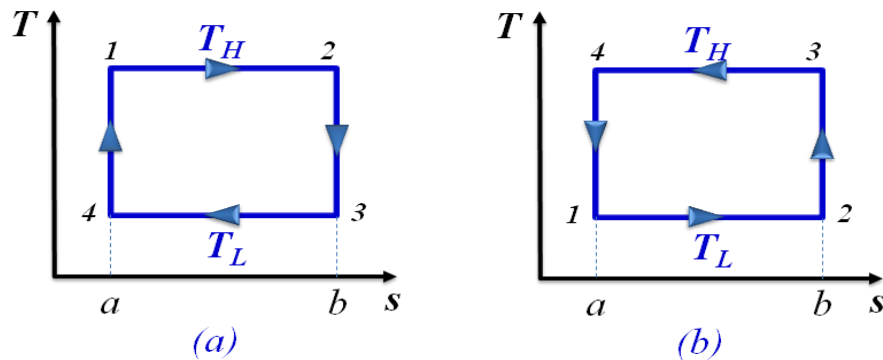
ถ้ากำหนดให้ของไหลทำงาน (Working Fluid) ของเครื่องยนต์ความร้อนดำเนินไปตามวัฏจักรคาร์โนเป็นระบบ กระบวนการแรกก็จะเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อน โดยอุณหภูมิคงที่ให้แก่ของไหลจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ซึ่งเขียนได้ว่า

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

เนื่องจากนี้เป็นกระบวนการคืนสภาพ ดังนั้นอุณหภูมิของของไหลจะคงที่ เมื่ออินทิเกรตจะได้

$$S_2 - S_1 = \frac{1}{T_H} \int_1^2 \delta Q = \frac{Q_2}{T_H}$$

กระบวนการนี้แสดงในรูปที่ 7.5(a) และพื้นที่ใต้เส้น 1-2 (1-2-b-a-1) แทนปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างกระบวนการนี้



รูปที่ 7.5 วัฏจักรคาร์โนเขียนบนแผนภาพ อุณหภูมิ - เอนโทรปี

กระบวนการที่สองของวัฏจักรคาร์โนเป็นการไม่ส่งถ่ายความร้อนคืนสภาพจากนิยามของเอนโทรปี

$$ds \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

จะเห็นว่าเอนโทรปีจะคงที่ในกระบวนการไม่ส่งถ่ายความร้อนคืนสภาพ โดยกระบวนการเอนโทรปีคงที่เรียกว่า กระบวนการไอเซนโทรปิก (Isentropic Process) โดยเส้น 2-3 แทนกระบวนการนี้ และกระบวนการจะสิ้นสุดลงที่สถานะ 3 คือ อุณหภูมิเท่ากับ T_L กระบวนการที่สามก็จะเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อน โดยอุณหภูมิคงที่ จากของไหลไปสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ เขียนได้ว่า

$$S_4 - S_3 = \frac{Q_4}{T_L}$$

เนื่องจากกระบวนการนี้ปริมาณความร้อนเป็นลบ ดังนั้น เอนโทรปีของของไหลจึงลดลง และกระบวนการ 4-1 ซึ่งเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกจะทำให้ครบวัฏจักร ดังนั้นปริมาณเอนโทรปีที่ลดลงในกระบวนการ 3-4 จะต้องเท่ากับปริมาณที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการ 1-2 ส่วนพื้นที่ใต้เส้น 3-4 (3-4-a-b-3) แทนปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากของไหลสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

เนื่องจากงานสุทธิของวัฏจักรเท่ากับความร้อนสุทธิ จะเห็นว่าพื้นที่สุทธิ (1-2-3-4-1) เท่ากับงานสุทธิ ดังนั้นประสิทธิภาพของวัฏจักรสามารถเขียนได้ในรูปของพื้นที่

$$n_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H} = \text{พื้นที่ } \frac{1-2-3-4-1}{1-2-b-a-1}$$

จากนี้จะเห็นได้ว่า ถ้าเพิ่ม T_H โดยที่ T_L คงที่หรือลด T_L โดย T_H คงที่ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของ วัฏจักรเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพจะใกล้ 100 % เมื่อ T_L เข้าใกล้ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ถ้าวัฏจักรย้อนกลับจะกลายเป็นเครื่องทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 7.5 (b)

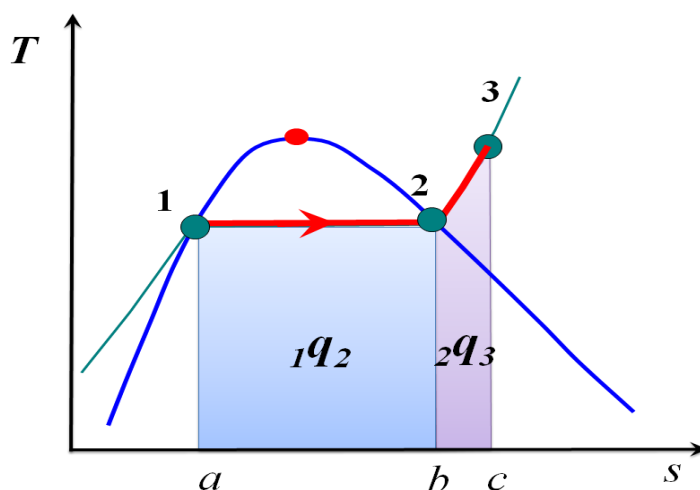
ต่อไปจะพิจารณาถึงกระบวนการส่งถ่ายความร้อนคืนสภาพ ซึ่งจะสามารถเขียนลงบนแผนภาพ อุณหภูมิ - เอนโทรปีได้ ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวอิ่มตัวไปเป็นไออิ่มตัวโดยความดันคงที่ จะแสดงได้ด้วยกระบวนการ ในรูปที่ 7.6 พื้นที่ 1-2- b-a-1 แทนปริมาณความร้อน เนื่องจากความดันคงที่ ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหน่วยมวลเท่ากับ h_{fg} ดังนั้น

$$s_2 - s_1 = s_{fg} = \frac{1}{m} \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = \frac{1}{mT} \int_1^2 \delta Q = \frac{1^q_2}{T} = \frac{h_{fg}}{T}$$

ความสัมพันธ์อันนี้เป็นที่มาของค่า s_{fg} ในตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ ถ้าเราให้ความร้อนแก่ไออิ่มตัวโดยความดันคงที่มันจะกลายเป็นไอลงตามเส้น สำหรับกระบวนการนี้เราเขียนได้ว่า

$$2^q_3 = \frac{1}{m} \int_2^3 \delta Q = \int_2^3 T ds$$

เนื่องจาก T ไม่คงที่ เราจึงอินทิเกรตสมการนี้ไม่ได้ถ้าไม่รู้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเอนโทรปี อย่างไรก็ตามเราก็คงทราบว่า พื้นที่ใต้เส้น 2-3 นั้นแทนด้วย $\int_2^3 T ds$ และนั่นคือแทนปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในกระบวนการ



รูปที่ 7.6 แผนภาพ อุณหภูมิ - เอนโทรปี แสดงพื้นที่แทนปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในกระบวนการคืนสภาพ

ตัวอย่าง 7.1 กระบอกสูบและลูกสูบบรรจุไออิ่มตัวของฟรอน-12 ที่ -10°C จากนั้นไอถูกอัดโดย reversible adiabatic process จนกระทั่งความดันเป็น 1.6 MPa จงหางานต่อกิโลกรัมของฟรอน-12 ในขบวนการนี้

วิธีทำ จากข้อที่ 1 เราสรุปได้ว่า

$$\begin{aligned} 1^q2 &= u_2 - u_1 + 1^w2 \\ \text{adiabatic, } 1^q2 &= 0 \\ 1^w2 &= u_2 - u_1 \end{aligned}$$

สถานะ เป็นไออิ่มตัวที่อุณหภูมิ -10°C ; $u_1 = h_1 - P_1 v_1$

จากตารางไอฟรอน-12 ;

$$u_1 = 183.058 - 219.1 \times 0.076646 = 166.265 \text{ kJ/kg}$$

กระบวนการ 1-2 เป็น reversible adiabatic process

$$\therefore S_2 = S_1 = 0.7014 \text{ kJ/kgK}$$

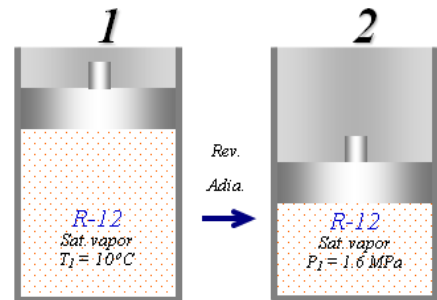
และ $P_2 = 1.6 \text{ MPa}$

จากตารางไอฟรอน-12

$$T_2 = 72.2^{\circ}\text{C}, h_2 = 218.564; v_2 = 0.011382$$

$$\therefore u_2 = 218.564 - 1600 \times 0.011382 = 200.352 \text{ kJ/kg}$$

$$1^w2 = u_1 - u_2 = 166.265 - 200.352 = -34.087 \text{ kJ/kg}$$



7.5 ความสัมพันธ์ของเทอร์โมไดนามิกส์ที่สำคัญสองประการ

(Two Important Thermodynamic Relations)

$$TdS = dU + PdV$$

$$TdS = dH + VdP$$

ความสัมพันธ์อันแรกหาได้จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารอุณหพลศาสตร์ในระบบปิด จากข้อที่ 1

$$\delta Q = dU + \delta W$$

จาก $\delta Q = TdS$ และ

$$\delta W = PdV$$

แทนค่า

$$TdS = dU + PdV \quad (7.5)$$

จาก

$$dH = dU + PdV + VdP$$

แทนค่าในสมการ (7.5)

$$TdS = dH - VdP \quad (7.6)$$

ถ้าเขียนเป็นหน่วยต่อมวลจะได้

$$TdS = du - Pd v$$

$$TdS = dh - v dP \quad (7.7)$$

7.6 การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบระหว่างกระบวนการไม่คืนสภาพ

(Entropy Change of System During an Irreversible Process)

พิจารณาระบบซึ่งดำเนินไปเป็นวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 7.7 ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการคืนสภาพ A และ B ดังนั้นเราเขียนได้ว่า

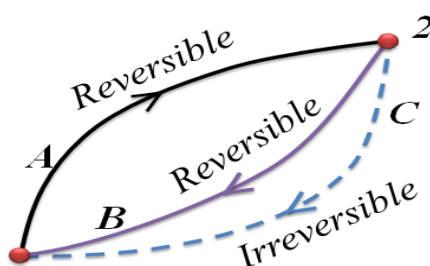
$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

และถ้าวัฏจักรประกอบด้วยกระบวนการคืนสภาพ A และกระบวนการไม่คืนสภาพ C

$$\int \frac{\delta Q}{T} + \int \frac{\delta Q}{T} = 0$$

ลบออกจากสมการแรกได้

$$\int \frac{\delta Q}{T} > \int \frac{\delta Q}{T}$$



รูปที่ 7.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีระหว่างกระบวนการไม่คืนสภาพ

เนื่องจาก B เป็นกระบวนการคืนสภาพได้ และเอนโทรปีเป็นคุณสมบัติ

$$\int \frac{\delta Q}{T} = \int dS = \int dS$$

ดังนั้น

$$\int dS = \int \frac{\delta Q}{T}$$

ในรูปทั่วไปจึงเขียนได้ว่า

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (7.8)$$

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

สมการนี้จะมีค่าเท่ากับในกรณีที่เป็นการผันการคืนสภาพได้ดังสมการ (7.3) และมากกว่าเมื่อเป็นการผันการไม่คืนสภาพดังสมการที่ (7.8) เราจึงสามารถสรุปลักษณะของเอนโทรปีได้ดังนี้

-เอนโทรปีของระบบเพิ่มได้ 2 ทางด้วยกัน คือ การให้ความร้อนแก่ระบบหรือโดยการให้ระบบเปลี่ยนแปลงด้วยกระบวนการไม่คืนสภาพ

-การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบสามารถแยกได้เป็น 2 อย่างคือ เอนโทรปีเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน และเนื่องจากความไม่คืนสภาพของระบบ (Irreversibility)

-สำหรับกระบวนการไม่ส่งถ่ายความร้อน ถ้าเอนโทรปีเพิ่มก็ต้องเนื่องมาจากความไม่คืนสภาพ

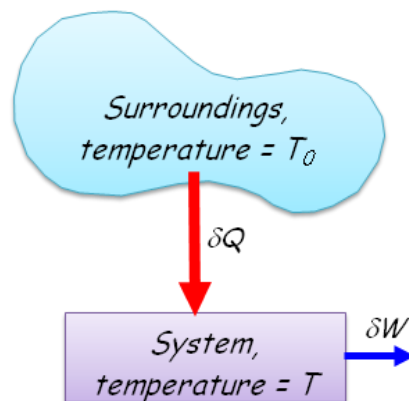
7.7 หลักการของการเพิ่มเอนโทรปี (Principle of the Increase of Entropy)

พิจารณารูปที่ 7.8 จากสมการ(7.8) สำหรับระบบเขียนได้ว่า

$$ds_{\text{ระบบ}} \geq \frac{\delta Q}{T}$$

สำหรับสิ่งแวดล้อม δQ เป็นลบ เขียนได้ว่า

$$ds_{\text{สิ่งแวดล้อม}} \geq -\frac{\delta Q}{T_0}$$



รูปที่ 7.8 การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีสำหรับระบบกับสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีทั้งหมดคือ

$$\begin{aligned} ds_{\text{ระบบ}} + ds_{\text{สิ่งแวดล้อม}} &\geq \frac{\delta Q}{T} - \frac{\delta Q}{T_0} \\ &\geq \delta Q \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \end{aligned} \quad (7.9)$$

เนื่องจาก $T_0 > T$ ดังนั้น $\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$ เป็นบวกเสมอ สรุปได้ว่า

$$ds_{\text{ระบบ}} + ds_{\text{สิ่งแวดล้อม}} \geq 0 \quad (7.10)$$

ถ้า $T_0 > T$ ความร้อนจะถ่ายเทจากระบบสู่สิ่งแวดล้อม ก็จะได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกัน สมการที่ (7.10) นี้คือหลักการเพิ่มของเอนโทรปี ซึ่งกล่าวได้ว่า กระบวนการจะเกิดขึ้นได้จริง ก็ต่อเมื่อผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีทั้งของระบบและสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น (หรืออย่างน้อยที่สุดก็เท่าเดิมในกรณีเป็นกระบวนการคืนสภาพได้)

ถ้าระบบเป็นระบบโดด ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม ก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของสิ่งแวดล้อม จึงเขียนได้ว่า

$$ds_{\text{ระบบโดด}} \geq 0 \quad (7.11)$$

ตัวอย่าง 7.2 ไอ้ร้อนตัวที่ 100°C จำนวน 1 kg ควบแน่นกลายเป็นของเหลวร้อนตัวที่ 100°C โดยขบวนการความดันคงที่ โดยการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งมีอุณหภูมิ 25°C จงหาผลรวมของการเพิ่มของการเอนโทรปี

วิธีทำ

$$\Delta S_{\text{ระบบ}} = m(s_2 - s_1) = m(s_f - s_g) = -ms_{fg}$$

จากตารางไอน้ำที่ 100°C $s_{fg} = 6.0480\text{ kJ/kg K}$

∴ พิมพ์สมการที่นี้ $\Delta S_{\text{ระบบ}} = (1\text{ kg})(6.0480\text{ kJ/kg K}) = -6.0480\text{ kJ/K}$

พิจารณาสิ่งแวดล้อม $\Delta S_{\text{สิ่งแวดล้อม}} = \frac{SQ}{T_0} = -\frac{1^Q_2}{T_0}$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อม $1^Q_2 = -m(h_2 - h_1) = mh_{fg}$
 $= (1\text{ kg})(2257.0\text{ kJ/kg}) = 2,257\text{ kJ}$

$$\Delta S_{\text{สิ่งแวดล้อม}} = \frac{2257}{298.15} = 7.5700\text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{\text{รวม}} = \Delta S_{\text{ระบบ}} + \Delta S_{\text{สิ่งแวดล้อม}} = -6.0480 + 7.5700 = 1.5220\text{ kJ/K}$$

การเพิ่มของเอนโทรปีเป็นไปตามหลักการ ดังนั้นสรุปได้ว่าขบวนการนี้สามารถทำให้เกิดขึ้นได้จริงและขบวนการนี้เป็นขบวนการไม่คืนสภาพ เพราะ $\Delta S_{\text{รวม}} > 0$

7.8 การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของของเหลวหรือของแข็ง (Entropy Change of a Solid or Liquid)

เราสามารถหาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของสารได้โดยการอินทิเกรตสมการ (7.7) ในกรณีที่สารอยู่ในสภาพของแข็งหรือของเหลว เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ ปริมาณจำเพาะของมันเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก ดังนั้นแทนในสมการ (7.7) จะเขียนได้ว่า

$$dS = \frac{du}{T} \stackrel{C}{=} \frac{C}{T} dT \quad (7.12)$$

ถ้าสมมติให้ค่าความร้อนจำเพาะ (C) คงที่ ก็จะสามารถอินทิเกรตสมการ (7.12) ได้เป็น

$$s_2 - s_1 = C \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (7.13)$$

ถ้าค่าความร้อนจำเพาะไม่คงที่ ก็จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์ของมันกับอุณหภูมิ จึงจะสามารถอินทิเกรตสมการ (7.12) ได้

ตัวอย่าง 7.3 น้ำในสภาพของเหลวจำนวน 1 กก. ได้รับความร้อนจาก 20 °C เป็น 90 °C จงคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี โดยสมมติว่าปริมาตรจำเพาะเปลี่ยนแปลงน้อยมากและเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าจากตารางไอน้ำ

วิธีทำ จากสมการ (7.13)

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= C \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \\ s_2 - s_1 &= 4.187 \ln \left(\frac{363.2}{293.2} \right) = 0.895 \text{ kJ/kg K} \end{aligned}$$

เปรียบเทียบค่านี้กับค่าที่ได้จากตาราง

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= s_{90^\circ\text{C}} - s_{20^\circ\text{C}} = 1.1925 - 0.2966 \text{ kJ/kgK} \\ &= 0.8959 \text{ kJ/kg K} \end{aligned}$$

7.9 การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของแก๊สจินตภาพ (Entropy Change of an Ideal Gas)

การคำนวณหาปริมาณเอนโทรปีเปลี่ยนแปลงของแก๊สจินตภาพ ทำได้โดยใช้สมการ (7.7)

จาก $Tds = du + Pd v$
 สำหรับแก๊สจินตภาพ $du = C_{vo}dT$ และ $P/T = R/v$

$$dS = C_{vo} \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

$$s_1 - s_2 = \int_1^2 C_{vo} \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (7.14)$$

ทำนองเดียวกัน $Tds = dh - v dP$
 สำหรับแก๊สจินตภาพ $dh = C_{po}dT$ และ $v/T = T/P$

$$ds = C_{po} \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

$$s_1 - s_2 = \int_1^2 C_{po} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (7.15)$$

ในการอินทิเกรตสมการ (7.14) และ (7.15) ได้ ต้องรู้ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิ แต่ถ้าสมมติให้ C_{vo} และ C_{po} คงที่ก็จะได้

$$s_1 - s_2 = C_{vo} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \quad (7.16)$$

$$s_1 - s_2 = C_{po} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (7.17)$$

ตัวอย่าง 7.4 ออกซิเจนถูกทำให้ร้อนจาก 300 K ไปเป็น 1500 K ระหว่างกระบวนการนี้ ความดันลดลงจาก 200 kPa เป็น 150 kPa จงคำนวณหาเอนโทรปีที่เปลี่ยนไปต่อกิโลกรัม

วิธีทำ จากสมการ (7.15) และคิดเป็นต่อ kmol โดยเอา M คูณตลอดจะได้

$$\bar{s}_1 - \bar{s}_2 = \int_{T_1}^{T_2} \bar{C}_{po} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

จากตาราง A.9 $(\bar{C}_{po}) = 37.432 + 0.2010\theta^{1.5} - 178.57\theta^{1.5} + 236.88\theta^{-2}$

อินทิเกรต

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} \left[37.4321 \ln \theta - \frac{0.020102}{1.5} \theta^{1.5} + \frac{178.57}{1.5} \theta^{0.5} - \frac{236.88}{2} \theta^{-2} \right] \bigg|_{\theta=13}^{\theta=15}$$

$$= 52.726 \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1} = 8.3143 \ln \left(\frac{150}{200} \right) = -2.392$$

แทนค่า,

$$\begin{aligned}\bar{s}_1 - \bar{s}_2 &= 52.726 + 2.392 \\ &= 55.118 \quad \text{kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ \bar{s}_1 - \bar{s}_2 &= \frac{\bar{s} - \bar{s}^0}{M} = \frac{55.118}{32} \quad \text{kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ &= 1.7224 \quad \text{kJ/kmol} \cdot \text{K}\end{aligned}$$

ถ้าสมมติว่าความร้อนจำเพาะคงที่ จากตาราง A.8

$$\begin{aligned}C_{p0} &= 0.9216 \text{ kJ/kgK}; \quad R = 0.25983 \text{ kJ/kgK} \\ \bar{s}_1 - \bar{s}_2 &= 0.9216 \ln \frac{1500}{300} - 0.25983 \ln \frac{150}{200} \\ &= 1.4833 + 0.0747 = 1.558 \text{ kJ/kgK}\end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าค่าต่ำกว่าประมาณ 10.53 %

ตัวอย่าง 7.5 จงหาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีต่อกิโลกรัม เมื่ออากาศได้รับความร้อนจาก 300 K เป็น 600 K และความดันลดลงจาก 400 kPa เป็น 300 kPa โดยความร้อนจำเพาะคงที่และไม่คงที่

วิธีทำ 1) จากตาราง A.8 สำหรับอากาศ $C_{p0} = 1.0035 \text{ kJ/kgK}$ และ $R = 0.287 \text{ kJ/kgK}$

$$\begin{aligned}\bar{s}_1 - \bar{s}_2 &= C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = 1.0035 \ln \frac{600}{300} - 0.287 \ln \frac{300}{400} \\ &= 0.7781 \text{ kJ/kgK}\end{aligned}$$

$$2) \quad \bar{s} - \bar{s}_2 = C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = (\bar{s} - \bar{s}^0) - R \ln \frac{P}{P^0}$$

$$\text{จากตาราง A.10 } \bar{s}^0 \text{ (ที่ 300 K)} = 2.5053; \quad \bar{s}^0 \text{ (ที่ 600 K)} = 3.2223$$

$$\bar{s} - \bar{s}_2 = (3.223 - 2.5153) - 0.287 \ln \left(\frac{300}{400} \right) = 0.7896 \text{ kJ/kgK}$$

7.10 กระบวนการไอเซนโทรปิกสำหรับแก๊สจินตภาพ (The Isentropic Process for Ideal Gas)

ในหัวข้อที่ 4.7 ได้ให้คำจำกัดความของดัชนีไอเซนโทรปิก (k) เอาไว้ตอนนี้ถึงเวลาอันเหมาะสมที่จะพิสูจน์ถึงความสำคัญของมันต่อกระบวนการไม่ส่งผ่านความร้อนก่ินสภาพได้ ซึ่งเราเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กระบวนการไอเซนโทรปิก (Isentropic Process) เนื่องจากเอนโทรปีคงที่

จากความสัมพันธ์ $Tds = du + PdV$

และ $ds = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)$

แต่กระบวนการนี้เป็นกระบวนการก่ินสภาพ และ $\delta Q = 0$ ดังนั้น $ds = 0$

$$\begin{aligned}
 du + Pd v &= 0 \\
 \text{สำหรับแก๊สจินตภาพ} \quad C_{vo} dT + Pd v &= 0 \quad (*) \\
 \text{จากสมการสถานะของแก๊สจินตภาพ} \quad P v &= RT \\
 d(P v) &= d(RT) = R dT \\
 dT &= \frac{1}{R} d(P v) = \frac{1}{R} (P d v + v dP) \\
 \text{แทนค่าใน (*)} \quad \frac{C_{vo}}{R} (P d v + v dP) + P d v &= 0 \quad (**) \\
 \text{จาก} \quad C_{po} - C_{vo} = R; \quad \frac{C_{vo}}{R} &= \frac{C_{vo}}{C_{po} - C_{vo}} = \frac{1}{C_{po}/C_{vo} - 1} = \frac{1}{k-1} \\
 \text{แทนค่าใน (**)} \quad \frac{1}{k-1} (P d v + v dP) + P d v &= 0 \\
 (P d v + v dP) + k P d v - P d v &= 0 \\
 \text{เอา } P v \text{ หารตลอด} \quad \frac{dP}{P} + k \frac{d v}{v} &= 0 \\
 \text{อินทิเกรต} \quad \ln P + k \ln v &= C \\
 \text{หรือ} \quad \ln P v^k &= C \\
 P v^k &= \text{ค่าคงที่} \quad (7.18)
 \end{aligned}$$

สมการ (7.18) เป็นความสัมพันธ์ที่สำคัญมากในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสถานะในกระบวนการไม่ส่งถ่ายความร้อนกับสภาพได้ของแก๊สจินตภาพ โดยการเขียนค่าให้อยู่ในรูปของสถานะเริ่มต้นและสุดท้าย

$$P v^k = P_1 v_1^k = P_2 v_2^k = \text{ค่าคงที่}$$

จากความสัมพันธ์นี้จะทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติตัวอื่น โดยอาศัยสมการสถานะของแก๊สจินตภาพ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad P v^k &= C = P \left(\frac{RT}{P} \right)^k = R^k T^k / P^{k-1} \\
 \text{หรือ} \quad \frac{T}{P^{k-1/k}} &= \text{ค่าคงที่} = \frac{T}{P^{k-1/k}} = \frac{T}{P^{k-1/k}} \quad (7.19) \\
 \text{และจาก} \quad P v^k &= C = \frac{RT}{P} v^k = R T v^{k-1} \\
 \text{หรือ} \quad T v^{k-1} &= \text{ค่าคงที่} = T_1 v_1^{k-1} = T_2 v_2^{k-1} \quad (7.20)
 \end{aligned}$$

7.11 กระบวนการโพลีโทรปิกของแก๊สจินตภาพ (The Polytropic Process for Ideal Gas)

เมื่อแก๊สเกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการคืนสภาพที่มีการถ่ายเทความร้อน การเปลี่ยนแปลงมักเกิดขึ้นโดยที่มีความสัมพันธ์ของ $P v^n$ คงที่ โดยที่ n เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับกระบวนการนั้น ๆ นั่นคือมีความสัมพันธ์เป็น

$Pv^n = \text{ค่าคงที่}$

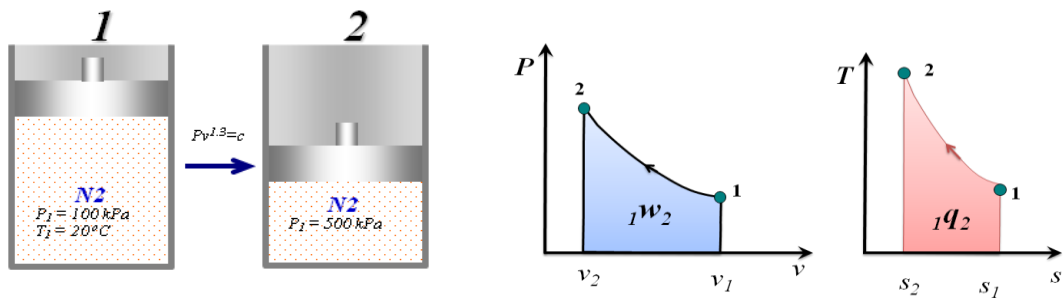
$$P_1 v_1^n = P_2 v_2^n \quad (7.21)$$

ทำนองเดียวกับหัวข้อที่แล้วเราจะหาได้ว่า

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1} \quad (7.22)$$

ตัวอย่าง 7.6 ไนโตรเจนถูกอัดใน กระบวนการคืนสภาพในกระบอกสูบจาก 100 kPa 20°C ไปเป็น 500 kPa ในระหว่างการอัดนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และปริมาตรเป็น $PV^{1.3} = \text{ค่าคงที่}$ จงคำนวณงานและปริมาณความร้อนที่ส่งถ่ายต่อกิโลกรัมของไนโตรเจน และแสดง กระบวนการบนแผนภาพ P-v และ T-s



ระบบ N_2 ในกระบอกสูบ

สมมติฐาน N_2 เป็น ideal gas และค่า specific heat คงที่โดยใช้ค่าที่ 300 K

การวิเคราะห์

งานในระบบปิด สำหรับกระบวนการ $PV^n = \text{ค่าคงที่}$

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dv = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n} \quad (1)$$

จากกฎข้อที่หนึ่งสำหรับระบบปิด ${}_1q_2 = u_2 - u_1 + {}_1W_2 \quad (2)$

ideal gas และค่า specific heat คงที่ $u_2 - u_1 = C_{v0}(T_2 - T_1) \quad (3)$

วิธีทำ

กระบวนการ 1-2: $PV^{1.3} = \text{ค่าคงที่}$ ดังนั้น

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(n-1)/n} = \left(\frac{500 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}}\right)^{(1.3-1)/1.3} = 1.4498$$

$$T_2 = 1.4498 T_1 = 1.4498 \times (20 + 273) \text{ K} = 425 \text{ K}$$

แทนค่าในสมการที่ (1)

$${}_1W_2 = \frac{(0.2968 \text{ kJ/kgK})(425 - 293) \text{ K}}{(1 - 1.3)} = -130.59 \text{ kJ/kg}$$

ปริมาณงานจำเพาะที่ส่งถ่ายให้ไนโตรเจน เท่ากับ 130.59 kJ/kg

ตอบ

จากตาราง A-2(a) $C_{v0} = 0.7448 \text{ kJ/kgK}$

$$\begin{aligned} u_2 - u_1 &= C_{v0} (T_2 - T_1) \\ &= (0.7448 \text{ kJ/kgK})(425 - 293)\text{K} = 98.31 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนในสมการที่ (2)} \quad {}_1q_2 &= u_2 - u_1 + {}_1w_2 \\ &= 98.31 \text{ kJ/kg} + (-130.4 \text{ kJ/kg}) = -32.028 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

ปริมาณความร้อนที่ในโตรเจนถ่ายเทออกมาเท่ากับ 130.59 kJ/kg **ตอบ**

Concussion : สรุปท้ายบทที่ 7

จากกฎข้อที่ 1 มีการบัญญัติพลังงานภายในขึ้นมา และในกฎข้อที่สองได้บัญญัติเอนโทรปีขึ้นมาด้วย

1. ความไม่เท่ากันของเคลาสีอุส (Inequality of Clausius) มีเนื้อหาว่า “ในวัฏจักรใดๆ ผลรวมของอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนต่ออุณหภูมิสัมบูรณ์ มีค่าไม่เกินศูนย์” สรุปได้ว่า

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

เรานำสมการความไม่เท่ากันของเคลาสีอุส มาตรวจสอบวัฏจักร ว่าวัฏจักรนั้นเป็นวัฏจักรใด โดย

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad \text{แสดงว่าเป็นวัฏจักรคืนสภาพได้}$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0 \quad \text{แสดงว่าเป็นวัฏจักรไม่คืนสภาพ}$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} > 0 \quad \text{แสดงว่าเป็นวัฏจักรที่ไม่เกิดขึ้นจริง}$$

2. เอนโทรปี (Entropy) จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 2 สถานะ เราสรุปได้ว่า มีปริมาณหนึ่งที่ไม่ขึ้นกับกระบวนการ แต่ขึ้นอยู่กับสถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้ายเท่านั้น เราเรียกคุณสมบัตินี้ว่า เอนโทรปี และเนื่องจากเอนโทรปีเป็นคุณสมบัติ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง จะมีค่าเท่ากัน

3. เอนโทรปีของสารบริสุทธิ์ (The Entropy of a Pure Substance) สามารถเปิดในตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้เลย ส่วนในสถานะที่เป็นของผสมก็หาได้จาก $s = s_f + x s_{fg}$

4. การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในกระบวนการคืนสภาพ จะได้ว่า เอนโทรปีจะคงที่ในกระบวนการไม่ส่งถ่ายความร้อนคืนสภาพ โดยกระบวนการที่เอนโทรปีคงที่นี้เรียกว่า กระบวนการไอเซนโทรปิก

5. ความสัมพันธ์ของเทอร์โมไดนามิกส์ที่สำคัญ 2 ประการ $TdS = dU + PdV$ และ $TdS = dH + VdP$

6. การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบระหว่างกระบวนการไม่คืนสภาพ

-เอนโทรปีของระบบเพิ่มได้ 2 ทางด้วยกัน คือการให้ความร้อนแก่ระบบหรือโดยการให้ระบบเปลี่ยนแปลงด้วยกระบวนการไม่คืนสภาพ

-การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบสามารถแยกได้เป็น 2 อย่างคือ เอนโทรปีเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน และเนื่องจากความไม่คืนสภาพของระบบ (Irreversibility)

-สำหรับกระบวนการไม่ส่งถ่ายความร้อน ดังนั้นถ้าเอนโทรปีเพิ่มก็ต่อเนื่องมาจากความไม่คืนสภาพ

7. หลักการของการเพิ่มเอนโทรปี กระบวนการจะสามารถเกิดขึ้นได้จริง ก็ต่อเมื่อผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีทั้งของระบบและสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น (หรืออย่างน้อยที่สุดก็เท่าเดิม ในกรณีเป็นกระบวนการคืนสภาพได้) ถ้าระบบเป็นระบบโดด ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม ก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของสิ่งแวดล้อม จึงเขียนได้ว่า

$$ds_{\text{ระบบโดด}} \geq 0$$

8. การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของของเหลวหรือของแข็ง เนื่องจากเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ

ปริมาตรจำเพาะของมันเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงได้ว่า $s_2 - s_1 = C \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$

9. การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของก๊าซจินตภาพ ถ้าสมมติให้ C_{v0} และ C_{p0} คงที่ ก็จะได้

$$s_1 - s_2 C_{v0} \ln = \left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$s_1 - s_2 C_{v0} \ln = \left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

10. กระบวนการไอเซนโทรปิกสำหรับก๊าซจินตภาพ กระบวนการไม่ส่งผ่านความร้อนคืนสภาพได้

หรือกระบวนการไอเซนโทรปิกซึ่งเอนโทรปีคงที่ จะได้ว่า $p v^k = \text{ค่าคงที่}$

11. กระบวนการโพลิโทรปิกของก๊าซจินตภาพ เมื่อแก๊สจินตภาพเกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการคืนสภาพที่มีการถ่ายเทความร้อน จะได้ว่า $P_1 v_1^n = P_2 v_2^n$ โดย $n = \text{ค่าคงที่}$

Exercises : แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7

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.

Clausius Inequality :

6-1C Does the temperature in the Clausius inequality relation have to be absolute temperature? Why?

6-2C Does a cycle for which $\oint \delta Q > 0$ violate the Clausius inequality? Why?

6-3 A heat engine receives 700 kJ of heat from a high-temperature source at 1100 K and rejects 500 kJ of it to a low-temperature sink at 310 K. Determine if this heat engine violates the second law of thermodynamics on the basis of (a) the Clausius inequality and (b) the Carnot principle. Also determine the entropy generation for this process.

6-4 A heat engine receives heat at a rate of 75 MJ/h from a furnace at 1300 K, rejects the waste heat to river water at 290 K, and has a power output of 8 kW. Determine if this heat engine violates the second law of thermodynamics on the basis of the Clausius inequality, and calculate the rate of entropy generation.

6-5 A refrigerator removes heat from the refrigerated space at 2°C at a rate of 300 kJ /min and rejects heat to the kitchen air at 26°C at a rate of 345 kJ/min. Determine if this refrigerator violates the second law of thermodynamics on the basis of (a) the Clausius inequality and (b) the Carnot principle. *Answers: (a) No, (b) no*

6-6 An air-based heat pump supplies heat to a house maintained at 21°C at a rate of 75,000 kJ /h while consuming 8 kW of power. If the outside air temperature is -2°C, determine if this heat pump violates the second law of thermodynamics on the basis of the Clausius inequality.

6-43 A frictionless piston-cylinder device contains saturated liquid water at 200-kPa pressure. Now 450 kJ of heat is transferred to water from a source at 500°C, and part of the liquid vaporizes at constant pressure. Determine the total entropy change for this process, in kJ /K. Is this process reversible, irreversible, or impossible? *Answers: 0.562 kJ /K, irreversible*

6-44 During the isothermal heat addition process of a Carnot cycle, 900 kJ of heat is added to the working fluid from a source at 400°C. Determine (a) the entropy change of the working fluid, (b) the entropy change of the source, and (c) the total entropy change for the process.

6-45 During the isothermal heat rejection process of a Carnot cycle, the working fluid experiences an entropy change of -0.6 kJ /K. If the temperature of the energy sink is 30°C, determine (a) the amount of heat transfer to the sink, (b) the entropy change of the sink, and (c) the total entropy change for this process.

Answers: (a) 181.8 kJ, (b) 0.6 kJ/K, (c) 0

6-46 Refrigerant-12 enters the coils of the evaporator of a refrigeration system as a saturated liquid-vapor mixture at a pressure of 200 kPa. The refrigerant absorbs 120 kJ of heat from the cooled space which is maintained at -5°C, and leaves as saturated vapor at the

same pressure. Determine (a) the entropy change of the refrigerant, (b) the entropy change of the cooled space, and (c) the total entropy change for this process.

Entropy:

7-26 During the isothermal heat addition process of a Carnot cycle, 900 kJ of heat is added to the working fluid from a source at 400°C. Determine (a) the entropy change of the working fluid, (b) the entropy change of the source, and (c) the total entropy change for the process.

7-28 Refrigerant-134a enters the coils of the evaporator of a refrigeration system as a saturated liquid-vapor mixture at a pressure of 160 kPa. The refrigerant absorbs 180 kJ of heat from the cooled space, which is maintained at -5°C, and leaves as saturated vapor at the same pressure. Determine (a) the entropy change of the refrigerant, (b) the entropy change of the cooled space, and (c) the total entropy change for this process.

7-31 A 0.5-m³ rigid tank contains refrigerant-R-134a initially at 200 kPa and 40 percent quality. Heat is transferred now to the refrigerant from a source at 35°C until the pressure rises to 400 kPa. Determine (a) the entropy change of the refrigerant, (b) the entropy change of the heat source, and (c) the total entropy change for this process. (answer (a) 3.880 kJ/K, (b) -3.439 kJ/K, (c) 0.441 kJ/K)

7-33 A well-insulated rigid tank contains 2 kg of a saturated liquid-vapor mixture of water at 100 kPa. Initially, three-quarters of the mass is in the liquid phase. An electric resistance heater placed in the tank is now turned on and kept on until all the liquid in the tank is vaporized. Determine the entropy change of the steam during this process. Answer 8.1 kJ/K

6-105 Nitrogen gas is compressed from 80 kPa and 27°C to 480 kPa by a 10 kW compressor. Determine the mass flow rate of nitrogen through the compressor, assuming the compression process to be (a) isentropic, (b) polytropic with $n = 1.3$, (c) isothermal. Answers: (a) 0.048 kg/s, (b) 0.05 kg/s, (c) 0.063 kg/s,

Adiabatic Efficiencies of Steady-Flow Devices :

6-106C Describe the ideal process for an (a) adiabatic turbine, (b) adiabatic compressor, and (c) adiabatic nozzle, and define the adiabatic efficiency for each device.

6-107C Is the isentropic process a suitable model for compressors that are cooled intentionally? Explain.

6-108C On a T-s diagram, does the actual exit state (state 2) of an adiabatic turbine have to be on the right-hand side of the isentropic exit state (state 2s)? Why?

6-109 Steam enters an adiabatic turbine at 8 MPa and 500°C with a mass flow rate of 3 kg/s and leaves at 30 kPa. The adiabatic efficiency of the turbine is 0.90. Neglecting the kinetic energy change of the steam, determine (a) the temperature at the turbine exit and (b) the power output of the turbine. Answers: (a) 69.1 °C, (b) 3052 kW

6-110 Steam enters an adiabatic turbine at 6 MPa, 600°C, and 80 m/s and leaves at 50 kPa, 100°C, and 140 m/s. If the power output of the turbine is 5 MW, determine (a) the mass flow rate of the steam flowing through the turbine and (b) the adiabatic efficiency of the turbine. Answers: (a) 5.16 kg/s, (b) 83.7 percent

6-111 Argon gas enters an adiabatic turbine at 800°C and 1.5 MPa at a rate of 80 kg/min and exhausts at 200 kPa . If the power output of the turbine is 370 kW , determine the adiabatic efficiency of the turbine.

6-113 Refrigerant-12 enters an adiabatic compressor as saturated vapor at 120 kPa at a rate of $0.3\text{ m}^3/\text{min}$ and exits at 1-MPa pressure. If the adiabatic efficiency of the compressor is 80 percent, determine (a) the temperature of the refrigerant at the exit of the compressor and (b) the power input, in kW . Also show the process on a T - s diagram with respect to saturation lines. Answers: (a) 67.1°C , (b) 1.75 kW

6-114 Air enters an adiabatic compressor at 100 kPa and 17°C at a rate of $1.2\text{ m}^3/\text{s}$, and it exits at 257°C . The compressor has an adiabatic efficiency of 84 percent. Neglecting the changes in kinetic and potential energies, determine (a) the exit pressure of air and (b) the power required to drive the compressor.

6-115 Air is compressed by an adiabatic compressor from 95 kPa and 27°C to 600 kPa and 277°C . Assuming variable specific heats and neglecting the changes in kinetic and potential energies, determine (a) the adiabatic efficiency of the compressor and (b) the exit temperature of air if the process were reversible. Answers: (a) 81.9 percent, (b) 505.5 K

6-116 Argon gas enters an adiabatic compressor at 120 kPa and 30°C with a velocity of 20 m/s , and it exits at 1.2 MPa and 80 m/s . If the adiabatic efficiency of the compressor is 85 percent, determine (a) the exit temperature of the argon and (b) the work input to the compressor.
