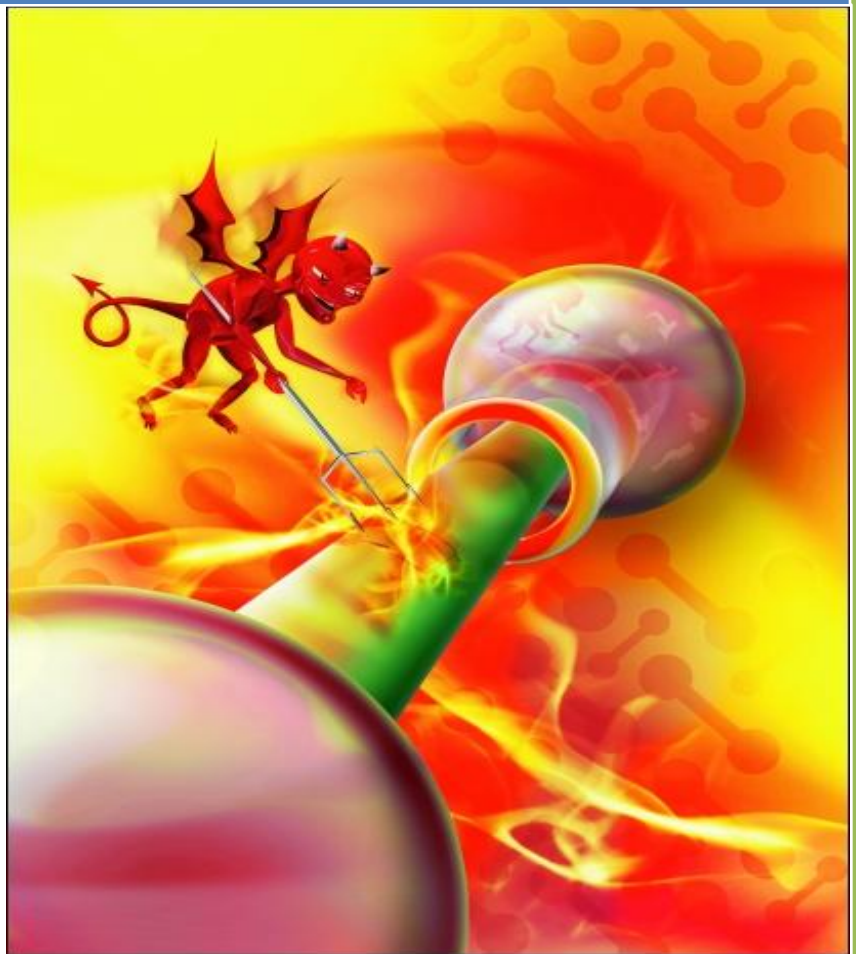


Thermodynamics I

Assoc.Prof.Sommai Pripem, Ph.D.

Chapter 6 : The Second Law of Thermodynamics



บทที่ 6

กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ (The Second Law of Thermodynamics)

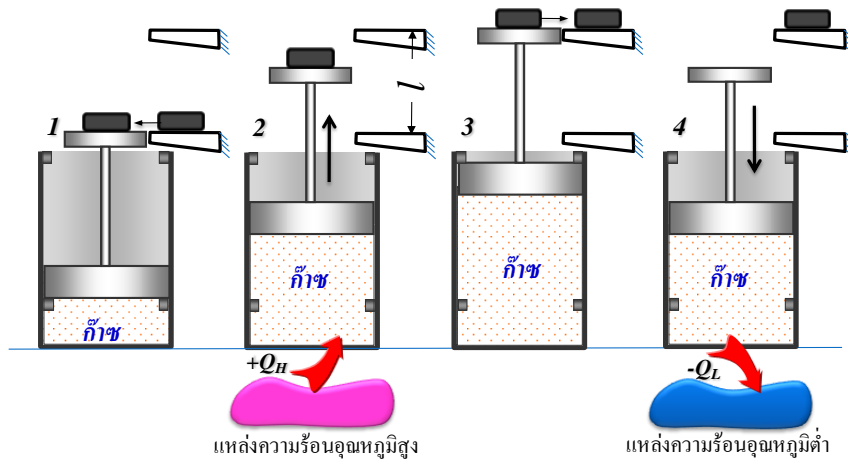
กฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์นั้นกล่าวถึงการคงอยู่ของพลังงาน โดยพิจารณาถึงเฉพาะปริมาณและรูปแบบของพลังงาน แต่ในการพิจารณาที่ครบถ้วนนั้นยังต้องมองในมิติของคุณภาพประกอบด้วย ดังนั้นเพื่อเสริมให้สมบูรณ์จึงได้กำหนดกฎข้อที่สองขึ้น กฎข้อที่สองนั้นเป็นเรื่องที่เข้าใจยากกว่ากฎข้อที่หนึ่งมาก ซึ่งเป็นธรรมชาติของการอธิบายในมิติของคุณภาพซึ่งสามารถนำเสนอได้ในหลายมุมมอง นอกจากนี้ศาสตร์ด้านนี้มีวิวัฒนาการต่อเนื่องกันมากกว่า 200 ปี โดยการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร นักประดิษฐ์ จำนวนมากในหลายๆประเทศ ดังนั้นการประมวลองค์ความรู้ที่ค้นพบจึงยากที่จะรวมเป็นหนึ่งเดียว กฎข้อที่สองนี้ไม่สามารถสรุปเขียนได้เป็นความเดียว กล่าวคือมีกฎข้อที่สองดั้งเดิมที่เขียนออกมาเป็นสองเนื้อความ ได้แก่เนื้อความของเคลวินและแพรังก์ (Kelvin and Prank Statement) และเคลาเซียส (Clusius Statement) และนอกจากนั้นยังมีการประยุกต์และพัฒนาเป็นกรณีย่อยๆอีกหลายเรื่อง เช่น หลักประสิทธิภาพของคาร์โนท์ (The Carnot Efficiency Principle) หลักการเพิ่มของเอนโทรปี (Principle of Increase of Entropy) เป็นต้น

ก่อนที่จะยกคำกล่าวของกฎข้อที่สอง เรามาพิจารณาถึง “เครื่องยนต์ความร้อน” (Heat Engine) และ “ปั๊มความร้อน” (Heat Pump) เสียก่อน เพราะกฎข้อที่สองจะกล่าวถึงวัฏจักรทั้งสองพวกนี้

6.1 เครื่องยนต์ความร้อน (Heat Engine)

โดยคำจำกัดความแล้ว คือ “อุปกรณ์ใดๆ ที่ทำงานได้เป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยที่งานสุทธิและความร้อนสุทธิเป็นบวก” ตามความหมายแล้วคือเครื่องยนต์ที่กำหนดกำลังงานออกมา โดยผลจากพลังงานความร้อนที่เราใส่เข้าไปนั่นเอง เพื่อความเข้าใจจะยกตัวอย่างของเครื่องยนต์ความร้อนมาแสดงดังนี้

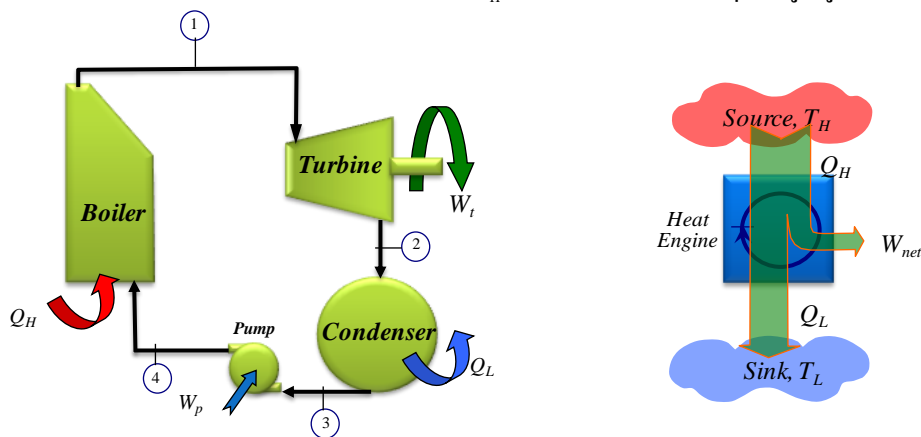
ก. เครื่องยนต์ลูกสูบ จากรูปที่ 6.1 เป็นรูปแบบพื้นฐานของเครื่องยนต์ลูกสูบ ประกอบด้วย กระบอกสูบซึ่งมีที่กั้นกับลูกสูบ ภายในบรรจุแก๊ส



รูปที่ 6.1 เครื่องยนต์ความร้อนแบบลูกสูบ

เริ่มแรกลูกสูบอยู่บนที่กั้นด้านล่าง ก้อนน้ำหนักรวมอยู่บนจาน จากนั้นให้ความร้อนกับแก๊ส โดยแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง แก๊สจะขยายตัวดันลูกสูบจนกระทั่งถึงที่กั้นด้านบนจึงย้ายก้อนน้ำหนักรออกไป เพื่อให้แก๊สกลับสู่สภาวะเริ่มแรกต้องถ่ายเทความร้อนออกจำนวนหนึ่ง โดยให้ถ่ายสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเป็นอันว่าครบวัฏจักร และในวัฏจักรได้งานออกมา เนื่องจากก้อนน้ำหนักรวมยกขึ้น

ข. โรงจักรไอน้ำ แผนภาพของโรงจักรไอน้ำอย่างง่ายแสดงไว้ในรูป 6.2 ในที่นี้ปั๊มได้รับกำลังงานโดยตรงจากกังหัน ดังนั้น งานที่ได้จากกังหันจึงเป็นงานสุทธิ เมื่อพิจารณาทั้งหมดแล้วมันคือ เครื่องยนต์ความร้อนนั่นเอง โดยได้รับความร้อน Q_H จากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง



รูปที่

6.2 โรงจักรไอน้ำอย่างง่าย

ซึ่งอาจเป็นความร้อนจากการเผาไหม้ในเตา หรือแหล่งอื่น และที่เครื่องควบแน่นต้องระบายความร้อนออกจากไอน้ำ โดยถ่ายเทความร้อน Q_L ออกไปสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วมักใช้น้ำหล่อเย็น

ในหนังสือเล่มนี้ได้กำหนดให้

Q_H แทนปริมาณความร้อนที่ส่งออกหรือเข้าสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง

Q_L แทนปริมาณความร้อนที่ส่งออกหรือเข้าสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

สำหรับเครื่องยนต์ความร้อนจะเห็นว่า Q_H เป็นบวก และ Q_L เป็นลบ

ประสิทธิภาพเป็นส่วนหนึ่งสมรรถนะของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่เราคุ้นเคยกันดี การบอกประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อนนั้นนิยามบอกด้วย “ประสิทธิภาพเชิงความร้อน” (Thermal Efficiency) เมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพ ย่อมหมายถึง สัดส่วนของคุณค่าที่เราได้จากเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่อคุณค่าที่เราต้องจ่ายไปเพื่อการนั้น ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ความร้อน จะเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน} \quad , \eta_{th} &= \frac{\text{งานสุทธิที่ได้จากเครื่องยนต์ปริมาณความร้อนที่ต้องใส่ให้เครื่องยนต์}}{\text{ปริมาณความร้อนที่ใส่ให้เครื่องยนต์}} \\ &= \frac{W_{net}}{Q_H} \end{aligned} \quad (6.1)$$

จากกฎข้อที่ 1 สำหรับวัฏจักร ; $\int \delta w = \int \delta Q$

$$W_{net} = Q_H + (-Q_L) = Q_H - Q_L$$

แทนค่าในสมการ (6.1)

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (6.2)$$

เห็นได้อย่างชัดเจนว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนน้อยกว่า 100% เสมอ เพราะเราต้องถ่ายเทความร้อนทิ้งไปจำนวนหนึ่ง (Q_L) อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ตัวอย่างที่ 6.1 เครื่องจักรกังหันไอน้ำใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิงเครื่องหนึ่ง รับความร้อนมาจากเตาเผาเกลบในอัตรา 25 MW และถ่ายเทความร้อนทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมในอัตรา 15 MW จงคำนวณหาคำลังงานสุทธิและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงจักรนี้

วิธีทำ

ระบบ เครื่องจักรกังหันไอน้ำเป็นเครื่องยนต์ความร้อน ทำงานเป็นวัฏจักร

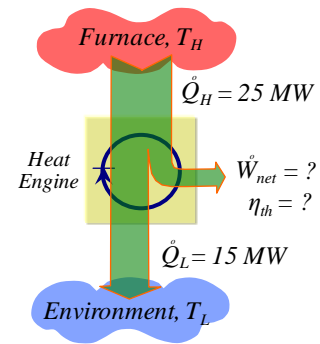
$$\text{กฎข้อที่ 1 สำหรับวัฏจักร:} \quad \dot{W}_{net} = \dot{Q}_{net} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L$$

$$\dot{W}_{net} = (25 - 15) \text{ MW} = 10 \text{ MW}$$

กำลังงานสุทธิเท่ากับ 10 MW ตอบ

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_H} = \frac{10 \text{ MW}}{25 \text{ MW}} \times 100\% = 40.0\%$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน η_{th} เท่ากับ 40.0 % ตอบ



ตัวอย่างที่ 6.2 เครื่องยนต์ของรถจักรยานยนต์มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 20% และให้กำลังงาน 10 kW หากน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าความร้อน (Heating value) เท่ากับ 40 MJ/kg จงคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

วิธีทำ

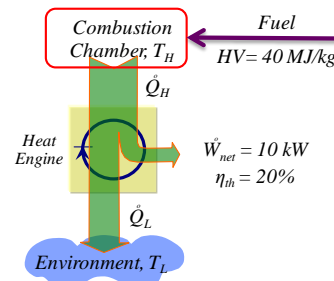
ระบบ สมมติให้เครื่องยนต์ทำงานเป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์

อัตราความร้อนที่ต้องใช้ $\dot{Q}_{required} = \dot{Q}_H$

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{W}_{net}}{\eta_{th}} = \frac{10 \text{ kW}}{0.20} = 50 \text{ kW}$$

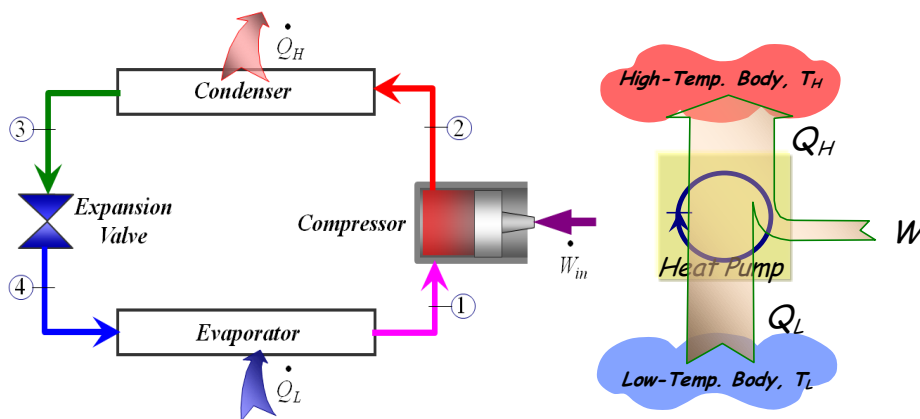
$$\begin{aligned} \text{อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง } \dot{m}_{fuel} &= \frac{\dot{Q}_{required}}{HV} \\ &= \frac{50 \text{ kW}}{40,000 \text{ kJ/kg}} \times 3,600 \text{ s/h} \end{aligned}$$

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ 4.5 kg/h ตอบ



6.2 ปั๊มความร้อน (Heat Pump)

ปั๊มความร้อน คือ วัฏจักรของเครื่องทำความเย็น และเครื่องทำความร้อนนั่นเอง คำจำกัดความของปั๊มความร้อนคือ “อุปกรณ์ใดๆ ที่ทำงานเป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์แล้ว ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน จากวัตถุที่อุณหภูมิต่ำไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า” ตัวอย่างของปั๊มความร้อน ได้แก่ เครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Refrigerator) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ของไหลที่ใช้ในระบบเรียกว่า สารทำความเย็น (Refrigerant) เช่น ฟรีออน แอมโมเนีย ฯ ความร้อนจะส่งผ่านเข้าสู่สารทำความเย็นในคอยล์เย็น (Evaporator) ซึ่งอุณหภูมิและความดันต่ำ ทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ จากนั้นไอก็จะถูกอัดในเครื่องอัดไอ (Compressor) และถ่ายเทความร้อนที่คอยล์ร้อน (Condenser) เพื่อควบแน่นให้เป็นของเหลวอีกครั้ง ความดันจะถูกลดให้ต่ำลงที่ลิ้นลดความดัน (Expansion Valve) แล้วก็ไหลเข้าสู่คอยล์เย็นอีกครั้ง ก็เป็นอันว่า ครบวัฏจักร



รูปที่ 6.3 วัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ

ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อน เราเขียนอยู่ในรูปของ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (Coefficient of Performance) มีอักษรย่อเป็น COP และสัญลักษณ์เป็น β สำหรับวัฏจักรทำความร้อนและใช้ β' สำหรับวัฏจักรทำความเย็น

สำหรับวัฏจักรทำความเย็น, $\beta = \frac{\text{ความสามารถในการทำความเย็น}}{\text{พลังงานที่ต้องใส่ให้วัฏจักร}}$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{Q_L}{W_C} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \\
 &= \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \quad (6.3)
 \end{aligned}$$

สำหรับวัฏจักรทำความร้อน $\beta' = \frac{\text{ความสามารถในการทำความร้อน}}{\text{พลังงานที่ต้องใส่ให้วัฏจักร}}$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{Q_L}{W_C} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \\
 \beta' &= \frac{1}{1 - \frac{Q_H}{Q_L}} \quad (6.4)
 \end{aligned}$$

เนื่องจาก $Q_H > Q_L$ เสมอ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เราไม่มีทางสร้างปั๊มความร้อนให้มีสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ ถึงอนันต์ได้

6.3 แหล่งความร้อน (Thermal Reservoir)

แหล่งความร้อน หมายถึงสิ่งที่มีความจุความร้อนสูงมากจนกระทั่งไม่ว่ามันจะได้รับความร้อนหรือถ่ายเทความร้อนออกไปเป็นปริมาณมากเท่าใดก็ตามก็ไม่ทำให้อุณหภูมิของตัวมันเปลี่ยนไป นั่นคืออุณหภูมิของแหล่งความร้อนจะคงที่เสมอ ตัวอย่างของแหล่งความร้อนตามธรรมชาติได้แก่ บรรยากาศ ทะเล มหาสมุทร ซึ่งเรามักใช้เป็นแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำในการระบายความร้อนสำหรับเครื่องยนต์ความร้อน ส่วนแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำมักเป็นแหล่งความร้อนที่สร้างขึ้น เช่น เตาเผา (Furnace) ในอุตสาหกรรม เป็นต้น แหล่งความร้อนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แหล่งให้ความร้อน (Heat source) และแหล่งทิ้งความร้อน (Heat sink)

ตัวอย่างที่ 6.3 ตู้เย็นตั้งอยู่ในห้องครัว ช่างแช่เย็นภายในตัวตู้เย็นถูกรักษาอุณหภูมิไว้ให้คงที่ที่ 4°C โดยการถ่ายเทความร้อนออกไปในอัตรา 360 kJ/min . หากกำลังงานที่ใส่ให้ตู้เย็นมีค่าเท่ากับ 2 kW จงคำนวณหา (ก) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ ของเครื่องทำความเย็นของตู้เย็นนี้ (ข) อัตราความร้อนที่ตู้เย็นถ่ายเทสู่ห้องครัว

วิธีทำ

ระบบ เครื่องทำความเย็นของตู้เย็น เป็นปั๊มความร้อน

$$(ก) \text{ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ } COP, \beta = \frac{Q_L}{W_{in}}$$

อัตราความร้อนที่ถ่ายเทออกจากตู้เย็น

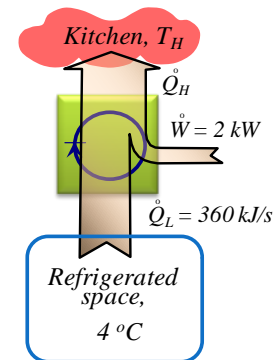
$$\dot{Q}_L = (360 \text{ kJ/min}) / (60 \text{ s/min}) = 6 \text{ kW}$$

$$\text{แทนค่า } COP, \beta = \frac{\dot{Q}_L}{W_{in}} = \frac{6 \text{ kW}}{2 \text{ kW}} = 3.0 \quad \text{ตอบ}$$

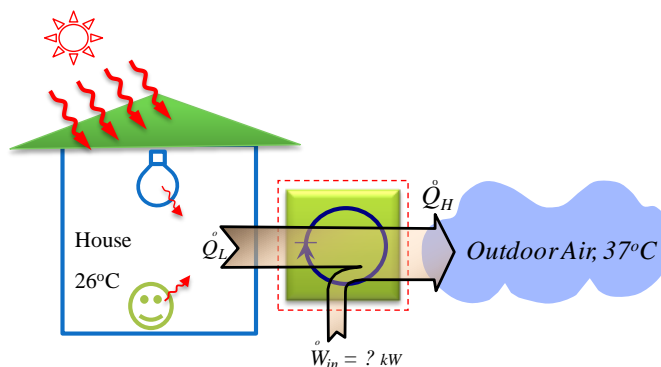
(ข) อัตราความร้อนที่ตู้เย็นถ่ายเทสู่ห้องครัว

พิจารณากฎข้อที่หนึ่งกับเครื่องทำความเย็นของตู้เย็น ซึ่งทำงานเป็นวัฏจักร จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{Q}_H - \dot{Q}_L &= \dot{W}_{net} \\ \dot{Q}_H &= \dot{W}_{net} + \dot{Q}_L \\ &= (2 \text{ kW}) + (6 \text{ kW}) = 8 \text{ kW} \quad \text{ตอบ} \end{aligned}$$



ตัวอย่างที่ 6.3 เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในบ้าน ไว้ให้คงที่ที่ 26°C ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศภายนอกสูงถึง 37°C สามารถโดยการถ่ายเทความร้อนออกไปโดยใช้เครื่องปรับอากาศ ในสถานะขณะหนึ่ง บ้านได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ในอัตรา $40,000 \text{ kJ/h}$ อัตราความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าในบ้านเท่ากับ 500 kJ/h และอัตราความร้อนที่เกิดจากผู้อยู่อาศัยเท่ากับ $2,500 \text{ kJ/h}$ หากเครื่องปรับอากาศที่ใช้มีสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเท่ากับ 3.5



จงคำนวณหา

(ก) กำลังงานที่เครื่องปรับอากาศนี้ต้องใช้ และ

(ข) อัตราความร้อนที่เครื่องปรับอากาศ

ถ่ายเทสู่อากาศภายนอก

วิธีทำ

ระบบ เครื่องทำความเย็นของตู้เย็น เป็นปั๊มความร้อน

(ก) จาก สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ $COP, \beta = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}}$

ดังนั้นกำลังงานที่เครื่องปรับอากาศต้องใช้, $\dot{W}_{in} = \frac{\dot{Q}_L}{\beta}$

อัตราความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากห้อง = อัตราความร้อนที่ห้องได้รับ

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{radiation} + \dot{Q}_{appliances} + \dot{Q}_{human}$$

$$= (40,000 \text{ kJ/h}) + (500 \text{ kJ/h}) + (2,500 \text{ kJ/h}) = 43,000 \text{ kJ/h}$$

$$= (43,000 \text{ kJ/h}) / (3600 \text{ s/h}) = 11.94 \text{ kW}$$

$$\text{ดังนั้น, } \dot{W}_{in} = \frac{\dot{Q}_L}{\beta} = \frac{11.94 \text{ kW}}{3.5} = 3.41 \text{ kW}$$

กำลังงานที่เครื่องปรับอากาศต้องใช้เท่ากับ 3.41 kW

ตอบ

(ข) อัตราความร้อนที่เครื่องปรับอากาศถ่ายเทสู่อากาศภายนอก

คิดปริมาตรควบคุมรอบเครื่องปรับอากาศ

$$\text{กฎข้อที่หนึ่งสำหรับวัฏจักร} \quad \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{W}_{in}$$

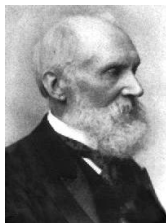
$$\text{ดังนั้น } \dot{Q}_H = \dot{W}_{in} + \dot{Q}_L = 3.41 \text{ kW} + 11.94 \text{ kW} = 15.36 \text{ kW}$$

อัตราความร้อนที่เครื่องปรับอากาศถ่ายเทสู่อากาศภายนอกเท่ากับ 15.36 kW **ตอบ**

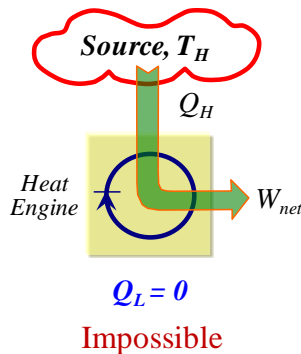
6.4 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ (The Second Law of Thermodynamics)

กฎข้อที่สองนี้มีอยู่สองเนื้อความด้วยกันคือ ข้อความของเคลวินและเพลงก์ กับข้อความของเคลาเซียส

ข้อความของ เคลวินและเพลงก์ (The Kelvin – Planck statement) : “เป็นไปได้ที่จะสร้างอุปกรณ์ซึ่งทำงานเป็นวัฏจักร แล้วให้งานสุทธิ โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนจากแหล่งความร้อนเพียงแหล่งเดียว”



Lord Kelvin
(William Thomson)
1824 - 1907



Max Planck
1858 - 1947

เนื้อความนี้ กล่าวถึงเครื่องยนต์ความร้อนที่เราได้ศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา ว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างเครื่องยนต์ความร้อนซึ่งทำงานเป็นวัฏจักรและรับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงแล้วแปลงพลังงานความร้อนนั้นเป็นงานกลทั้งหมด จากประสบการณ์และความพยายามของวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ที่พัฒนาเครื่องยนต์พบว่า จำเป็นต้องถ่ายเทความร้อนทิ้งไปจำนวนหนึ่งให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ นั่นคือ จำเป็นจะต้องมีแหล่งความร้อนสองแหล่งที่มีอุณหภูมิต่างกัน ดังนั้นโดยสรุปแล้วก็คือ เราไม่สามารถสร้างเครื่องยนต์ความร้อนให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนถึง 100 เปอร์เซ็นต์ได้นั่นเอง ในความเป็นจริงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อนที่มีใช้ในโลปัจจุบันมีประสิทธิภาพไม่เกิน 50 % เท่านั้น ตัวอย่างข้างล่างนี้บอกค่าโดยประมาณของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ความร้อนดังนี้

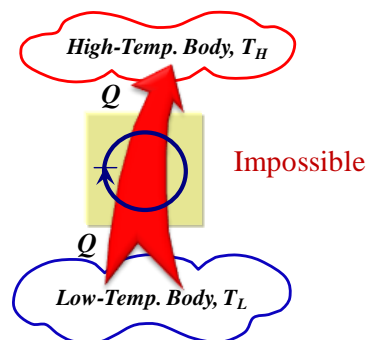
เครื่องยนต์เบนซิน	(Gasoline engine)	20%
เครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่	(Large Diesel engine)	30%
โรงจักรกังหันไอน้ำขนาดใหญ่	(Large Steam Power Plant)	40%

ข้อความของ เคลาเซียส (The Clausius statement) “เป็นไปได้ที่จะสร้างอุปกรณ์ซึ่งทำงานเป็นวัฏจักร แล้วมีการถ่ายเทความร้อนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า โดยไม่มีผลอย่างอื่น”

เนื้อความนี้กล่าวถึงปั๊มความร้อนซึ่งขยายความได้ว่า เป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างเครื่องทำความเย็น (หรือเครื่องทำความร้อน) ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า โดยไม่ต้องใช้งาน(หรือพลังงานรูปอื่น)เลย นั่นคือสรุปได้ว่า สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของปั๊มความร้อนจะน้อยกว่าอนันต์เสมอ



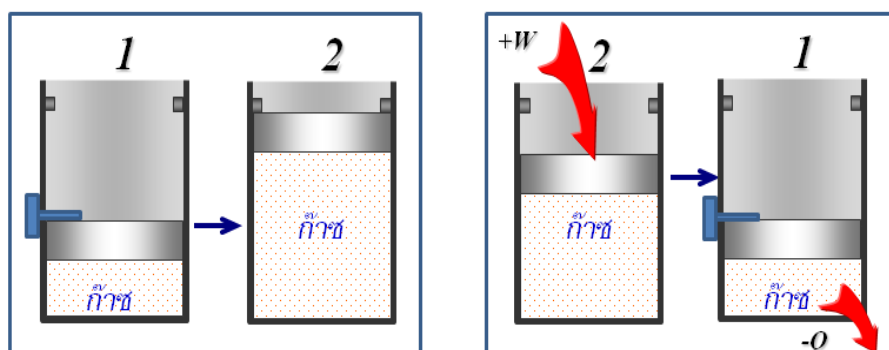
Rudolf Clausius
1822 - 1888



6.5 กระบวนการคืนสภาพ (The Reversible Process)

ในเมื่อเราไม่สามารถสร้างเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพถึง 100% ได้แล้วประสิทธิภาพสูงสุดที่จะทำได้นั้นเป็นเท่าไร เป็นคำถามที่ควรจะต้องตอบเพื่อจะได้เห็นว่า เครื่องยนต์ของเรายังมีโอกาสพัฒนาหรือปรับปรุงประสิทธิภาพได้หรือไม่ แต่ก่อนที่จะพูดถึงปัญหานี้ ต้องมาทำความรู้จักกับขบวนการในจินตนาการซึ่งเราเรียกว่า กระบวนการคืนสภาพ (Reversible process) เสียก่อน

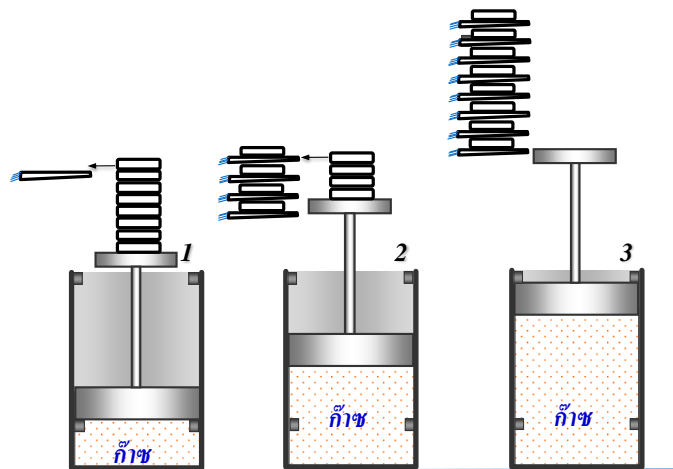
กระบวนการคืนสภาพคือ กระบวนการที่เกิดขึ้นแล้วสามารถย้อนกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ โดยไม่ทำให้ตัวระบบและสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง เพื่อความเข้าใจถึงกระบวนการคืนสภาพยิ่งขึ้น พิจารณารูปที่ 6.4 ซึ่งมีแก๊สบรรจุอยู่ในกระบอกสูบและลูกสูบ เดิมแก๊ส (ซึ่งในที่นี้เรากำหนดให้เป็นระบบ) มีความดันสูง



รูปที่ 6.4 ตัวอย่างของ กระบวนการไม่คืนสภาพ

และลูกสูบมีสลักขัดเอาไว้ เมื่อถอดสลักออกลูกสูบจะถูกดันขึ้นไปจนชนที่กั้นด้านบน ในขบวนการนี้ระบบให้งานออกมาคือการยกลูกสูบ ถ้าเราต้องการให้ระบบกลับสู่สถานะเดิม วิธีหนึ่งที่ได้ก็คือ ออกแรงกดลูกสูบจนกระทั่งลงไปถึงที่เดิม แล้วเอาสลักขัดลูกสูบไว้ แต่ในการนี้ความดันที่กระทำต่อแก๊สจะต้องมากกว่าความดันช่วงขาขึ้น ลูกสูบจึงจะถูกกดลงมาได้ นั่นคือเราต้องใช้งานมากกว่างานที่แก๊สให้ออกมาในช่วงแรก ดังนั้นอุณหภูมิของแก๊สจะสูงกว่าสถานะแรก เพื่อให้แก๊สกลับสู่สถานะเดิมจำเป็นต้องถ่ายเทความร้อนทิ้งไปจำนวนหนึ่งเป็นอันว่าระบบกลับสู่สถานะเริ่มแรกแล้ว แต่สิ่งแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากต้องมีแรงมากดลูกสูบลงและมีความร้อนส่งผ่านเข้า ดังนั้น กระบวนการเริ่มแรกนั้นเป็น กระบวนการไม่คืนสภาพ (Irreversible process)

ในรูป 6.5 กำหนดให้แก๊สในกระบอกสูบเป็นระบบ และให้ลูกสูบบรรจุทุกก้อนน้ำหนักหลาย ๆ ก้อน ซึ่งจะถูกลื่อนออกด้านข้างครั้งละก้อนทำให้แก๊สขยายตัวและให้งานโดยการยกก้อนน้ำหนักที่เหลือ ถ้าหากเราทำให้ก้อนน้ำหนักมีขนาดเล็กลงและจำนวนมากขึ้น เราจะได้ กระบวนการที่ใกล้เคียงกระบวนการคืนสภาพ เพราะในการเลื่อนก้อนน้ำหนักไปบนชั้นจะใช้งานน้อยมากจนเกือบจะเรียกได้ว่าไม่ใช้งานเลยและยังถ้าให้ก้อนน้ำหนักมีขนาดเล็กมาก ๆ การทำให้ขบวนการย้อนกลับสู่สถานะเดิมก็จะทำให้ทั้งระบบและสิ่งแวดล้อมกลับสู่สถานะเดิมเหมือนตอนเริ่มต้น กระบวนการเช่นนี้แหละคือ กระบวนการคืนสภาพ

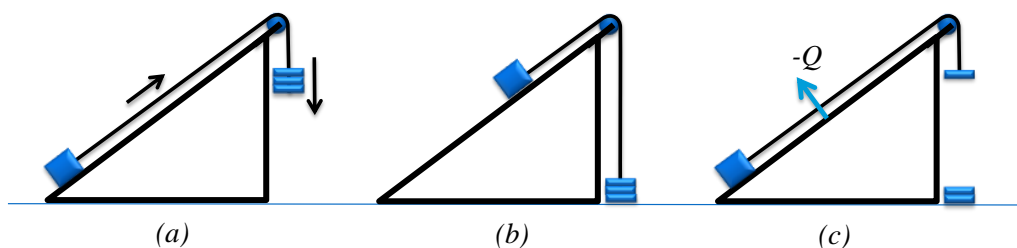


รูปที่ 6.5 ตัวอย่างขบวนการที่ใกล้เคียงขบวนการคืนสภาพ

6.6 ตัวประกอบที่ทำให้กระบวนการไม่คืนสภาพ

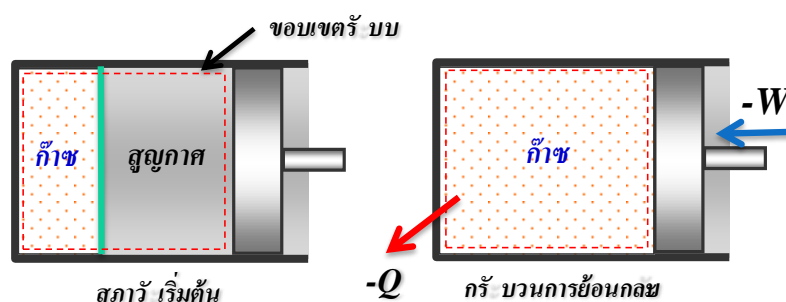
กระบวนการไม่คืนสภาพเกิดจากหลายสาเหตุด้วยกัน แต่ในที่นี้เราจะพิจารณาสาเหตุที่สำคัญเพียง 4 สาเหตุ ได้แก่

ก. แรงเสียดทาน (Friction) เป็นตัวทำให้กระบวนการไม่คืนสภาพอย่างเห็นได้ชัด แต่จะแสดงตัวอย่างให้เห็นชัดเจนขึ้นโดยกำหนดให้กล่องและพื้นเอียง ดังรูป 6.6 เป็นระบบกล่องถูกดึงขึ้นไปโดยก้อนน้ำหนัก นั่นคือต้องใช้งานจำนวนหนึ่ง ซึ่งงานส่วนหนึ่งใช้ในการเอาชนะความเสียดทานระหว่างกล่องและพื้น และอีกส่วนหนึ่งเพื่อเพิ่มพลังงานศักย์ให้แก่กล่อง กล่องจะกลับสู่ที่เดิมด้านล่างได้โดยการเอาก้อนน้ำหนักที่แขวนออกบางส่วน แต่ถ้าจะให้อุณหภูมิเท่าเดิมจะต้องระบายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ก็เป็นอันว่าระบบกลับสู่สภาวะเดิม แต่สิ่งแวดล้อมไม่กลับสู่สภาวะเดิม จึงสรุปได้ว่ากระบวนการนี้เป็นกระบวนการไม่คืนสภาพ ทั้งนี้เนื่องจากผลของความเสียดทาน



รูปที่ 6.6 ภาพแสดงว่าความเสียดทานทำให้ กระบวนการไม่คืนสภาพ

ข . การขยายตัวอย่างอิสระ (Unrestrained Expansion) ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.7 แก๊สถูกกั้นไว้ด้วยเยื่อบาง ๆ ตัวเยื่อขาดแก๊สก็จะแพร่กระจายไปเต็มปริมาตร ถ้าจะให้แก๊สกลับสู่สภาวะเดิมต้องอัดและถ่ายเทความร้อนออก จนกระทั่งถึงสภาวะเริ่มต้น เห็นได้ชัดว่าสิ่งแวดล้อมกระทบกระเทือน จึงสรุปได้ว่า การขยายตัวอย่างอิสระเป็นกระบวนการไม่คืนสภาพ กระบวนการดังรูปที่ 6.4 ก็อยู่ในกรณีนี้



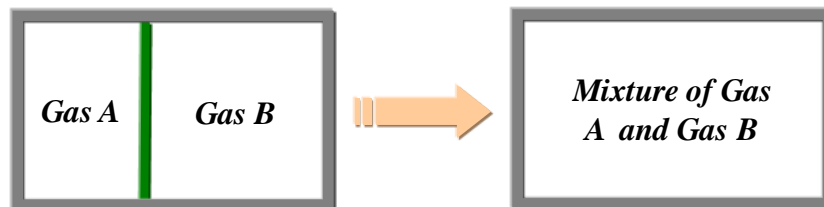
รูปที่ 6.7 รูปแสดงให้เห็นว่าการขยายตัวอย่างอิสระทำให้ กระบวนการไม่คืนสภาพ

ค . การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Through a Finite Temperature Difference) พิจารณาระบบที่ประกอบด้วยวัตถุอุณหภูมิสูงและวัตถุอุณหภูมิต่ำ ถ้าปล่อยให้ความร้อนส่งผ่านจากวัตถุอุณหภูมิสูงไปยังวัตถุอุณหภูมิต่ำ มีทางเดียวเท่านั้นที่จะทำให้กลับสู่สภาวะเริ่มแรกได้ คือต้องใช้เครื่องทำความเย็น ซึ่งจะต้องใช้พลังงาน และถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้สภาวะของสิ่งแวดล้อมไม่เหมือนเดิม แสดงว่า กระบวนการนี้ไม่คืนสภาพ

ดูเหมือนจะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะมีกระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบคืนสภาพ (reversible heat transfer process) เพราะความร้อนคือ พลังงานที่ส่งผ่านเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามเราจะกำหนดว่า กระบวนการถ่ายเทความร้อนคืนสภาพ คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างอุณหภูมิที่แทบจะไม่แตกต่างกันเลย ซึ่งในกระบวนการแบบนี้จะต้องใช้เวลาและเนื้อที่อย่างมหาศาล ที่เรากำหนดขึ้นมานี้เพื่อใช้เป็นกระบวนการในจินตนาการเท่านั้น

ง . การผสมของสสารต่างชนิด (Mixing of Two Different Substances)

กระบวนการนี้แสดงในรูปที่ 6.8 ซึ่งมีแก๊สต่างชนิด แยกกันอยู่โดยมีเข็วกัน เมื่อเข็วขาดแก๊สทั้ง 2 จะผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันและกระจายไปทั่ว การแยกแก๊สทั้งสองออกจากกัน และให้กลับสู่สภาพเดิมนั้น จะต้องใช้วิธีการที่ซับซ้อน แน่ละสิ่งแวดลอมต้องมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากทีเดียว



รูปที่ 6.8 แสดงการผสมกันของสสารต่างชนิดเป็น กระบวนการไม่คืนสภาพ

6.7 วัฏจักรคาร์โนต์ (The Carnot Cycle)

จากคำถามที่ค้างไว้ในหัวข้อ 6.5 ว่าเราสามารถสร้างเครื่องยนต์ความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่าใด ก่อนอื่นนั้นเราต้องพิจารณาถึงวัฏจักรที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดก่อน วัฏจักรดังกล่าวจะต้องมีกระบวนการทุก ๆ กระบวนการเป็นกระบวนการคืนสภาพ การรับและถ่ายเทความร้อนในวัฏจักรก็ต้องเป็นกระบวนการส่งผ่านความร้อนคืนสภาพ แต่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงและดำนันมีอุณหภูมิคงที่ กระบวนการคืนสภาพได้ก็คือเมื่ออุณหภูมิของสารทำงาน (working fluid) ในกระบวนการนี้ต้องแทบไม่แตกต่างจากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเลย ดังนั้น อุณหภูมิของมันต้องคงที่ด้วย สรุปแล้วในการถ่ายเทความร้อนของ กระบวนการจะต้องเป็น กระบวนการอุณหภูมิคงที่คืนสภาพ (Reversible isothermal process) และในกระบวนการที่เหลือจะต้องไม่มีการสูญเสียหรือถ่ายเทความร้อน ดังนั้นจึงต้องเป็น กระบวนการไม่ถ่ายเทความร้อนคืนสภาพ (Reversible adiabatic process) มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการไอเซนโทรปิก (Isentropic process) วัฏจักรดังกล่าวนี้มีชื่อเรียกว่า “วัฏจักรคาร์โนต์” ซึ่งเรียกตามชื่อวิศวกรชาวฝรั่งเศส Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796 - 1832) ผู้คิดวัฏจักรนี้ และได้รับการยอมรับว่าเป็นวัฏจักรที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

เนื่องจากทุกกระบวนการของวัฏจักรคาร์โนต์เป็น กระบวนการย้อนกลับคืนสภาพได้ทั้งสิ้น ดังนั้นถ้าวัฏจักรเครื่องยนต์ความร้อนที่ทำงานตามวัฏจักรคาร์โนต์ย้อนกลับ วัฏจักรคาร์โนต์นั้นจะทำงานเป็นวัฏจักรทำความเย็น โดยสรุปแล้ววัฏจักรคาร์โนต์ ประกอบด้วย กระบวนการ 4 กระบวนการ ดังนี้

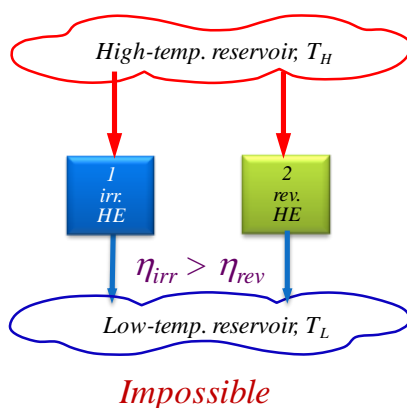
- กระบวนการอุณหภูมิคงที่คืนสภาพ (Reversible Isothermal Heat Transfer)
มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง
- กระบวนการขยายตัวโดยไม่ถ่ายเทความร้อนคืนสภาพ (Reversible Adiabatic Expansion)
อุณหภูมิสารทำงานลดจากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำสุด
- กระบวนการอุณหภูมิคงที่คืนสภาพ (Reversible Isothermal Heat Transfer)
มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ
- กระบวนการอัดโดยไม่ถ่ายเทความร้อนคืนสภาพ (Reversible Adiabatic Compression)
อุณหภูมิสารทำงานเพิ่มจากอุณหภูมิต่ำสุดไปเป็นอุณหภูมิสูงสุด

วัฏจักรคาร์โนต์เป็นวัฏจักรที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในทางทฤษฎี ประสิทธิภาพของมันจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงและต่ำของวัฏจักรซึ่งจะแสดงให้เห็นในตัวอย่างของกระบวนการต่อไป ในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถสร้างวัฏจักรให้เป็นไปตามวัฏจักรคาร์โนต์ได้

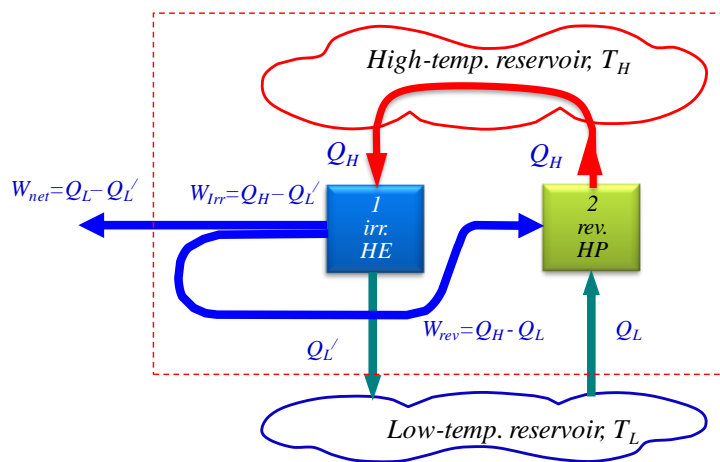
6.8 หลักของคาร์โนต์ (The Carnot Principle)

มีหลักสำคัญเกี่ยวกับประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ 2 ประการ คือ

หลักของคาร์โนต์ประการที่หนึ่ง “เป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างเครื่องยนต์ไม่กิ้นสภาพ (Irreversible engine) ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเครื่องยนต์คืนสภาพ (Reversible engine) ที่ทำงานด้วยแหล่งความร้อนเดียวกัน” ในการพิสูจน์คำกล่าวนี้ จะทำโดยตั้งสมมติฐานที่แย้งกับคำกล่าวนี้ แล้วแสดงให้เห็นว่าสมมติฐานนั้นนำไปสู่การสรุปที่เป็นไปไม่ได้ ดังนั้น ทางเดียวที่จะสรุปได้คือ สมมติฐานที่ตั้งไว้นั้นผิด



สมมติว่า มีเครื่องยนต์ไม่คืนสภาพทำงานระหว่างแหล่งความร้อนสองแหล่ง มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์คืนสภาพที่ทำงานในระหว่างแหล่งความร้อนเดียวกัน กำหนดให้ความร้อนที่ถ่ายเทให้เครื่องยนต์ไม่คืนสภาพเป็น Q_H , ความร้อนที่ระบายออกเป็น Q'_L และให้งานเท่ากับ W_{IE} (ซึ่งเท่ากับ $Q_H - Q'_L$) ดังแสดงในรูปที่ 6.9 และกำหนดให้ซึ่งทำงานระหว่างแหล่งความร้อนเดียวกัน เครื่องยนต์คืนสภาพทำงานเป็นเครื่องทำความเย็น (เนื่องจากมันเป็นเครื่องยนต์คืนสภาพจึงเป็นไปได้) โดยมีความร้อนส่งถ่ายจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเป็น Q_L , ถ่ายเทความร้อนสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงเป็น Q_H และต้องใช้งานเท่ากับ W_{RE} (ซึ่งเท่ากับ $Q_H - Q_L$)

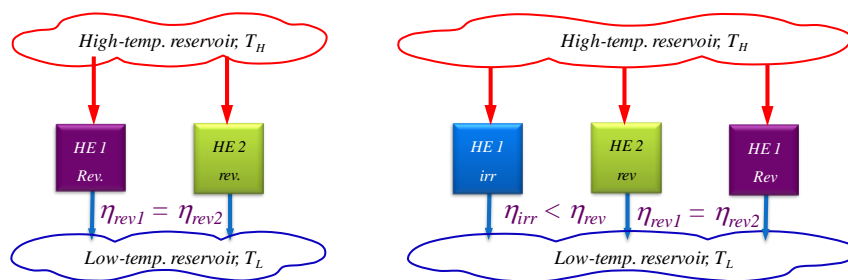


รูปที่ 6.9 รูปแสดงว่าวัฏจักรคาร์โนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์อื่น

คราวนี้ถ้าสมมติให้เครื่องยนต์ไม่คืนสภาพขับเคลื่อนเครื่องยนต์คืนสภาพและมีงานเหลือ

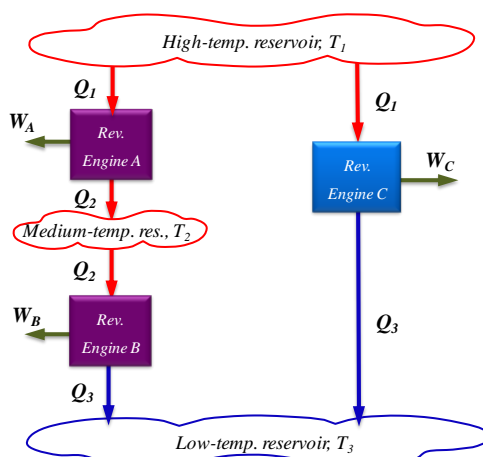
ออกมาเท่ากับ W_{net} (ซึ่งเท่ากับ $W_{IE} - W_{RE} = Q_L - Q'_L$) ถ้าพิจารณาเครื่องยนต์ทั้งสองและแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงเป็นระบบดังแสดงในรูป เราพบว่านี่เป็นระบบที่ทำงานเป็นวัฏจักร โดยการส่งถ่ายความร้อนจากแหล่งความร้อนแหล่งเดียวแล้วให้งานออกมา แต่มันเป็นการขัดแย้งกับกฎข้อที่สอง ดังนั้น สรุปได้ว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้ (ว่าเครื่องยนต์ไม่คืนสภาพมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์คืนสภาพ) ตอนต้นนั้นผิด ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะสร้างเครื่องยนต์ไม่คืนสภาพที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์คืนสภาพที่ทำงานด้วยแหล่งความร้อนเดียวกัน

หลักของการโน้ตประการที่สอง “เครื่องยนต์ทุกชนิดที่ทำงานเป็นวัฏจักรคาร์โนระหว่างแหล่งความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากันจะมีประสิทธิภาพเท่ากัน ” การพิสูจน์คำกล่าวนี้ สามารถทำได้ทำนองเดียวกับข้างต้น โดยการตั้งสมมติฐานว่า มีวัฏจักรคาร์โนที่อื่นหนึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าอีกวัฏจักรหนึ่ง ซึ่งทำงานระหว่างแหล่งความร้อนเดียวกัน แล้วกำหนดให้ตัวที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเป็นเครื่องยนต์ไม่คืนสภาพในรูปที่ 6.9 และวัฏจักรคาร์โนที่อีกตัวทำงานเป็นเครื่องทำความเย็น วิธีการพิสูจน์ก็ทำนองเดียวกับการพิสูจน์คำกล่าวที่แล้ว



สเกลอุณหภูมิสัมบูรณ์ของเคลวิน (Kelvin's Absolute Temperature Scale)

ดังได้กล่าวถึงกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ในบทที่หนึ่ง ซึ่งให้หลักในการวัดอุณหภูมิ แต่สเกลอุณหภูมิต้องขึ้นกับสารที่ใช้และเครื่องมือในการวัด เช่น สเกลเซลเซียส ใช้น้ำเป็นสารอ้างอิง คือ กำหนดให้ระดับอุณหภูมิที่น้ำแข็งตัวที่ความดันบรรยากาศมาตรฐานเป็นศูนย์องศา และกำหนดให้ระดับอุณหภูมิที่น้ำเดือดที่ความดันบรรยากาศมาตรฐานเป็นหนึ่งร้อยองศาแน่นอนหากใช้สารอื่นเป็นตัวอ้างอิงและใช้หลักเดียวกัน ระดับอุณหภูมิที่มีค่าเดียวกันย่อมไม่เท่ากัน ในการคำนวณจะมีปัญหามากมาย ดังนั้นหากมีสเกลอุณหภูมิที่ไม่ขึ้นกับสารย่อมจะทำให้สะดวกในการใช้อย่างมาก สเกลอุณหภูมิดังกล่าวเรียกว่า สเกลอุณหภูมิสัมบูรณ์ (The Absolute Temperature Scale) หรือ สเกลอุณหภูมิเทอร์โมไดนามิกส์ (The Thermodynamic Temperature Scale) ในหัวข้อที่ 6.5 ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนท์หรือวัฏจักรคีนสกาฟ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพไม่ขึ้นกับสารทำงานของระบบเลย แต่ขึ้นกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน ความจริงข้อนี้นำไปสู่หลักการของสเกลอุณหภูมิสัมบูรณ์



รูปที่ 6.10 รูปแบบการจัดเครื่องยนต์ความร้อนเพื่อแสดงสเกลอุณหภูมิเทอร์โมไดนามิกส์

แนวคิดของสเกลอุณหภูมิเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถหาได้โดยอาศัยรูปแบบการจัดเครื่องยนต์ ความร้อนในการอธิบาย ในรูปจะมีแหล่งความร้อนสามแหล่ง และมีเครื่องยนต์ความร้อนสามเครื่อง ทั้งหมดทำงานด้วยวัฏจักรคาร์โนท์ อุณหภูมิ T_1 เป็นอุณหภูมิสูงสุด ส่วนอุณหภูมิ T_3 เป็นอุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิ T_2 เป็นอุณหภูมิระหว่างกลาง และเครื่องยนต์ทั้งสามทำงานระหว่างแหล่งความร้อนเหล่านี้ โดยที่เครื่องยนต์ C ได้รับความร้อนปริมาณ Q_1 จากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง T_1 เช่นเดียวกับเครื่องยนต์ A และเนื่องจากทั้งสามเป็นวัฏจักรคืนสภาพ ดังนั้น ความร้อนที่เครื่องยนต์ B และ C ทั้งจะมีปริมาณ เท่ากันคือ Q_3

เนื่องจากประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนท์ขึ้นกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเท่านั้น จึงเขียนได้ว่า

$$\text{จาก} \quad \eta_{\text{thermal}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (6.5)$$

$$\text{และ} \quad \eta_{\text{thermal}} = f_1(T_L, T_H) \\ \text{ดังนั้นเขียนได้ว่า} \quad \frac{Q_H}{Q_L} = f(T_L, T_H) \quad (6.6)$$

เมื่อ f หมายถึงฟังก์ชันความสัมพันธ์ใดๆ

สำหรับเครื่องยนต์คาร์โนท์ทั้งสามเขียนได้ว่า

$$\text{เครื่องยนต์ A} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2)$$

$$\text{เครื่องยนต์ B} \quad \frac{Q_2}{Q_3} = f(T_2, T_3)$$

$$\text{เครื่องยนต์ C} \quad \frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3)$$

$$\text{เนื่องจาก} \quad \frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1}{Q_2} \times \frac{Q_2}{Q_3}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad f(T_1, T_3) = f(T_1, T_2) \times f(T_2, T_3) \quad (6.7)$$

เนื่องจากด้านซ้ายของสมการไม่มีค่า T_2 เกี่ยวข้องเลย ดังนั้นด้านขวามือของสมการย่อมไม่มี T_2 เป็นตัวแปรเช่นกัน จากข้อเท็จจริงนี้จึงสรุปได้ว่า

$$f(T_1, T_2) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)}$$

$$\text{และ} \quad f(T_2, T_3) = \frac{f(T_2)}{f(T_3)}$$

ด้วยความสัมพันธ์นี้จึงจะทำให้ด้านขวามือของสมการ (6.xxxx) ไม่ปรากฏมี T_2 เป็นตัวแปรคือ

$$f(T_1, T_3) = f(T_1, T_2) \times f(T_2, T_3) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)} \times \frac{f(T_2)}{f(T_3)} = \frac{f(T_1)}{f(T_3)}$$

$$\text{ดังนั้นสรุปได้ว่า} \quad \frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3) = \frac{f(T_1)}{f(T_3)} \quad (6.8)$$

$$\text{เขียนในเทอมทั่วไปได้ว่า} \quad \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{f(T_H)}{f(T_L)} \quad (6.9)$$

ฟังก์ชันความสัมพันธ์นี้มีความเป็นไปได้หลายแบบ แต่สำหรับสเกลอุณหภูมิของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งลอร์ดเคลวินนำเสนอ นั่น เคลวิน ได้เลือกความสัมพันธ์

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L} \quad (6.10)$$

สเกลอุณหภูมินี้เรียกว่า **สเกลเคลวิน (Kelvin Scale)** และอุณหภูมิของสเกลนี้เรียกว่า **อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)** ในการประชุม International Conference on Weights and Measures ในปี ค.ศ. 1954 ได้กำหนดว่าจุดสามสถานะ (Tripple point) ของน้ำ (คือสถานะที่ทั้งสามสถานะของน้ำ อยู่ในสมดุลกัน) มีค่าเท่ากับ 273.16 K และนิยามขนาดขององศาเคลวินว่า เท่ากับ $1/273.16$ ของช่วงอุณหภูมิระหว่างศูนย์องศาสัมบูรณ์ กับจุดสามสถานะของน้ำ ขนาด (magnitude) ของอุณหภูมิในหน่วยเคลวินและเซลเซียสนั้นเหมือนกัน ($1\text{ K} \equiv 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) โดยที่ค่าของอุณหภูมิของทั้งสองสเกลต่างกันเท่ากับ 273.15 ดังความสัมพันธ์

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (6.11)$$

6.9 ประสิทธิภาพคาร์โนต์ (The Carnot Efficiency)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ใดนิยามว่า

$$\eta_{\text{thermal}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

สำหรับวัฏจักรกินสภาพ จะได้ความสัมพันธ์

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

ดังนั้น โดยการใช้อุณหภูมิสัมบูรณ์ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กินสภาพจึงเขียนได้ว่า

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (6.12)$$

ความสัมพันธ์นี้มักเรียกว่า ประสิทธิภาพคาร์โนต์ (The Carnot Efficiency) เพราะว่าเครื่องยนต์คาร์โนต์เป็นวัฏจักรกินสภาพที่เป็นที่รู้จักกันดี นี่จะเป็นประสิทธิภาพที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับเครื่องยนต์ที่ทำงานระหว่างแหล่งความร้อนระหว่างอุณหภูมิ T_H และ T_L

Concussion : สรุปท้ายบทที่ 6

กฎข้อที่หนึ่งกล่าวถึงการคงอยู่ของพลังงาน แต่ถ้าต้องการพิจารณาให้ครบถ้วน จะต้องคำนึงถึงคุณภาพด้วย จึงได้กำเนิดกฎข้อที่สองขึ้นมา โดยเดิมมีสองเนื้อความ คือ เนื้อความของเคลวินและแรนค์ (Kelvin and Rankine Statement) กับเนื้อความของเคลเซียส (Clausius Statement) ทั้งนี้ยังมีการประยุกต์และพัฒนาเป็นกรณีย่อยอีกเรื่องๆ อีกด้วย

1. เครื่องยนต์ความร้อน (Heat Engine) คือ เครื่องยนต์ที่กำเนิดพลังงานออกมาโดยผลจากพลังงานความร้อนที่เราใส่เข้าไป เช่น

1.1 เครื่องยนต์ลูกสูบ ประกอบด้วย กระบอกสูบซึ่งมีที่กั้นกับลูกสูบ ภายในบรรจุแก๊ส

1.2 โรงจักรไอน้ำ เช่น โรงจักรไอน้ำอย่างง่ายที่มีปั๊ม ปั๊มน้ำขึ้นไปยังหม้อต้มไอน้ำ ได้ไอน้ำความร้อนสูงออกมา ทำให้กังหันไพบดหมุน และเกิดงานไหลกลับเข้าไปยังปั๊มเพื่อให้ปั๊มทำงาน โดยมีเครื่องควบแน่น ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากไอน้ำ

เมื่อแทน Q_H พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูง และ Q_L แทนพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำ

จะได้ว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อน $\eta_{th} = \frac{\text{งานสุทธิที่ได้จากเครื่องยนต์ปริมาณความร้อนที่ต้องใส่ให้เครื่องยนต์}}{Q_H}$

$$\text{และจากกฎข้อที่หนึ่ง จะได้ว่า } \eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

2. ปั๊มความร้อน (Heat Pump) คือ อุปกรณ์ที่ทำงานเป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ แล้วทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน จากวัตถุอุณหภูมิต่ำไปยังวัตถุที่อุณหภูมิสูงกว่า โดยประสิทธิภาพของปั๊มความร้อน เราเขียนอยู่ในรูปของ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (Coefficient of Performance) มีอักษรย่อเป็น COP และสัญลักษณ์เป็น β สำหรับวัฏจักรทำความเย็น และใช้ β' สำหรับวัฏจักรทำความร้อน

$$\beta = \frac{\text{ความสามารถในการทำความเย็นพลังงานที่ต้องใส่ให้วัฏจักร}}{Q_L}$$

$$= \frac{Q_L}{W_C} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1}$$

$$\beta' = \frac{\text{ความสามารถในการทำความร้อนพลังงานที่ต้องใส่ให้วัฏจักร}}{Q_H}$$

$$= \frac{Q_H}{W_C} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}} \quad \text{โดยที่ } Q_H > Q_L \text{ เสมอ}$$

3. แหล่งความร้อน (Thermal Reservoir) หมายถึง สิ่งที่บรรจุความร้อนสูงมาก และไม่อาจจะได้รับหรือถ่ายเทความร้อนออกมาเท่าใดก็ตาม ก็ไม่ทำให้อุณหภูมิของตัวมันเปลี่ยนไป ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ แหล่งให้ความร้อน (Heat Source) และ แหล่งทิ้งความร้อน (Heat Sink)

4. กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ (The Second Law of Thermodynamics)

4.1 The Kelvin-Planck Statement : เป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างอุปกรณ์ซึ่งทำงานเป็นวัฏจักร แล้วให้งานสุทธิ โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนจากแหล่งความร้อนเพียงแหล่งเดียว

4.2 The Clausius Statement : เป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างอุปกรณ์ซึ่งทำงานเป็นวัฏจักร แล้วมีการถ่ายเทความร้อนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า โดยไม่มีผลอย่างอื่น

5. กระบวนการคืนสภาพ (The Reversible Process) คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นแล้วสามารถย้อนกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ โดยไม่ทำให้ตัวระบบและสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง

6. ปัจจัยที่ทำให้กระบวนการไม่คืนสภาพ มีสาเหตุสำคัญ 4 สาเหตุ ดังนี้

6.1 แรงเสียดทาน (Friction Force)

6.2 การขยายตัวอย่างอิสระ (Unrestrained Expansion)

6.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer through a Finite Temperature Difference)

6.4 การผสมของสารต่างชนิดกัน (Mixing of Two Different Substances)

7. วัฏจักรคาร์โนต์ (The Carnot Cycle) คือ วัฏจักรที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และประกอบด้วยกระบวนการ 4 กระบวนการ ดังนี้

7.1 กระบวนการอุณหภูมิคงที่คืนสภาพ (Reversible Isothermal Heat Transfer)

7.2 กระบวนการขยายตัวโดยไม่ถ่ายเทความร้อนคืนสภาพ (Reversible Adiabatic Expansion)

7.3 กระบวนการอุณหภูมิคงที่คืนสภาพ (Reversible Isothermal Heat Transfer)

7.4 กระบวนการอัดโดยไม่ถ่ายเทความร้อนคืนสภาพ (Reversible Adiabatic Compression)

8. หลักการของคาร์โนต์ (The Carnot Principle) มี 2 ประการ

ประการที่หนึ่ง : เป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างเครื่องยนต์ไม่คืนสภาพ (Irreversible Engine) ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเครื่องยนต์คืนสภาพ (Reversible Engine) ที่ทำงานด้วยแหล่งความร้อนเดียวกัน

ประการที่สอง : เครื่องยนต์ทุกชนิดที่ทำงานเป็นวัฏจักรคาร์โนต์ระหว่างแหล่งความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากัน ประสิทธิภาพจะเท่ากัน

9. ประสิทธิภาพคาร์โนต์ (The Carnot Efficiency) ก็คือ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คืนสภาพนั่นเอง ซึ่งมีค่า $\eta_{rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ สำหรับเครื่องยนต์ที่ทำงานระหว่างแหล่งความร้อนระหว่างอุณหภูมิ T_H และ T_L

Exercises : แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6

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 Pripem, PhD.

5-5C Describe an imaginary process that violates both the first and the second laws of thermodynamics.

5-6C An experimentalist claims to have raised the temperature of a small amount of water to 150°C by transferring heat from high-pressure steam at 120°C. Is this a reasonable claim? Why? Assume no refrigerator or heat pump is used in the process.

Thermal Energy Reservoirs

5-7C Consider the energy dissipated by a computer in a room. What is suitable choice for a thermal energy reservoir?

5-8C What is a thermal energy reservoir? Give some examples.

5-9C Study the process of boiling eggs. Can the boiling water be treated as a thermal energy reservoir? Explain.

5-10C Study the process of baking potatoes in a conventional oven. Can the hot air in the oven be treated as a thermal energy reservoir? Explain.

5-11C Study the energy generated by a TV set. What is a suitable choice for a thermal energy reservoir?

Heat Engines and Thermal Efficiency

5-12C Is it possible for a heat engine to operate without rejecting an waste heat to a low-temperature reservoir? Explain.

5-13C What are the characteristics of all heat engines?

5-14C What is the physical significance of the thermal efficiency of heat engine, and how is it determined?

5-15C Describe two ways to determine the net work output of a heat engine.

5-16C Consider the process of baking potatoes in a conventional oven How would you define the efficiency of the oven for this baking process?

5-17C Consider a pan of water being heated (a) by placing it on an electric range and (b) by placing a heating element in the water. Which method is a more efficient way of heating water? Explain.

5-18C Which one of these is a more efficient way of heating house-burning wood in a fireplace or burning wood in a stove in the middle of the house?

5-19C Which is a more efficient way of converting electricity to light-using a light bulb or using a fluorescent tube?

5-20C Baseboard heaters are basically electric resistance heaters and are frequently used in space heating. A homeowner claims that her 5-year old baseboard heaters have a conversion efficiency of 100%. Is this claim in violation of any thermodynamic law? Explain.

5-21C What is the Kelvin-Planck expression of the second law of thermodynamics?

5-22C Does a heat engine that has a thermal efficiency of 100 percent necessarily violate (a) the first law and (b) the second law of thermodynamics? Explain.

5-23C In the absence of any friction and other irreversibilities, can a heat engine have an efficiency of 100 percent? Explain

5-24C Are the efficiencies of all the work-producing devices, including the hydroelectric power plants, limited by the Kelvin-Planck statement of the second law? Explain.

5-25 An 800-MW steam power plant, which is cooled by a nearby river, has a thermal efficiency of 40 percent. Determine the rate of heat transfer to the river water. Will the actual heat transfer rate be higher or lower than this value? Why?

5-26 A steam power plant receives heat from a furnace at a rate of 80 GJ/h. Heat losses to the surrounding air from the steam as it passes through the pipes and other components are estimated to be about 8 GJ/h. If the waste heat is transferred to the cooling water at a rate of 45 GJ/h, determine (a) the net power output and (b) the thermal efficiency of this power plant.

Answers: (a) 35.3 MW, (b) 45.4 percent

5-27 A car engine with a power output of 90 kW has a thermal efficiency of 28 percent. Determine the rate of fuel consumption if the value of the fuel is 44,000 kJ/kg.

5-27E A car engine with a power output of 95 hp has a thermal efficiency of 28 percent. Determine the rate of fuel consumption if the energy content of the fuel is 19,000 Btu/lbm.

5-28 A steam power plant with a power output of 150 MW consumes coal at a rate of 60 tons/h. If the energy content of the coal is 30,000 kJ/kg, determine the thermal efficiency of this plant (1 ton = 1000 kg).

Answer: 30.0 percent

5-29 An automobile engine consumes fuel at a rate of 20 L/h and delivers 60 kW of power to the wheels. If the fuel has a heating value of 41,000 kJ/kg and a density of 0.8 g/cm³, determine the efficiency of this engine. *Answer: 30.7 percent*

5-29E An automobile engine consumes fuel at a rate of 5 gal/h and delivers 70 hp of power to the wheels. If the fuel has an energy content of 9,000 Btu/lbm and a density of 50 lbm/ft³, determine the efficiency of this engine. *Answer: 28.1 percent*

5-30 Solar energy stored in large bodies of water, called solar ponds, is being used for generating electricity. If such a solar power plant has an efficiency of 3 percent and a net power output of 100 kW, determine the average value of the required solar energy collection rate, in kJ/h. *Answer: 1.2×10^7 kJ/h*

5-30E Solar energy stored in large bodies of water, called solar ponds, is being used for generating electricity. If such a solar power plant has an efficiency of 4 percent and a net power output of 300 kW, determine the average value of the required solar energy collection rate, in Btu/h.

Refrigerators and Heat Pumps

5-31C What is the difference between a refrigerator and a heat pump?

5-32C What is the difference between a refrigerator and an air conditioner?

5-33C In a refrigerator, heat is transferred from a lower-temperature medium (the

refrigerated space) to a higher-temperature one (the kitchen air). Is this a violation of the second law of thermodynamics? Explain.

5-34C A heat pump is a device that absorbs energy from the cold outdoor air and transfers it to the warmer indoors. Is this a violation of the second law of thermodynamics? Explain.

5-35C Define the coefficient of performance of a refrigerator in words. Can it be greater than unity?

5-36C Define the coefficient of performance of a heat pump in words. Can it be greater than unity?

5-37C A heat pump that is used to heat a house has a COP of 2.5. That is, the heat pump delivers 2.5 kWh of energy to the house for each 1 kWh of electricity it consumes. Is this a violation of the first law of thermodynamics? Explain.

5-38C A refrigerator has a COP of 1.5. That is, the refrigerator removes 1.5 kWh of energy from the refrigerated space for each 1 kWh of electricity it consumes. Is this a violation of the first law of thermodynamics? Explain.

5-39C What is the Clausius expression of the second law of thermodynamics?

5-40C Show that the Kelvin-Planck and the Clausius expressions of the second law are equivalent.

5-41 A household refrigerator with a COP of 1.8 removes heat from the refrigerated space at a rate of 90 kJ/min. Determine (a) the electric power consumed by the refrigerator and (b) the rate of heat transfer to the kitchen air. *Answers: (a) 0.83 kW, (b) 140 kJ/min*

5-41E A household refrigerator with a COP of 1.8 removes heat from the refrigerated space at a rate of 55 Btu/min. Determine (a) the electric power consumed by the refrigerator and (b) the rate of heat transfer to the kitchen air. *Answers: (a) 0.72 hp, (b) 85.56 Btu/min*

5-42 An air conditioner removes heat steadily from a house at a rate of 750 kJ/min while drawing electric power at a rate of 6 kW. Determine (a) the COP of this air conditioner and (b) the rate of heat discharge to the outside air. *Answers: (a) 2.08, (b) 1110 kJ/min*

5-43 A household refrigerator runs one-fourth of the time and removes heat from the food compartment at an average rate of 1200 kJ/h. If the COP of the refrigerator is 2.5 determine the power the refrigerator draws when running.

5-43E A household refrigerator runs one-fourth of the time and removes heat from the food compartment at an average rate of 800 Btu/h. If the COP of the refrigerator is 2.2, determine the power the refrigerator draws when running.

5-44 Water enters an ice machine at 15°C and leaves as ice at -5°C. If the COP of the ice machine is 2.4 during this operation, determine the required power input for an ice production rate of 12 kg/h. (Note that 384 kJ of energy needs to be removed from each 1 kg of water at 15°C to turn it into ice at -5°C.)

5-44E Water enters an ice machine at 55°F and leaves as ice at 25°F. If the COP of the ice machine is 2.4 during this operation, determine the required power input for an ice production rate of 20 lbm/h. (Note that 169 Btu of energy needs to be removed from each lbm of water at 55°F to turn it into ice at 25°F.)

5-45 A household refrigerator that has a power input of 450 W and a COP of 2.5 is to cool five large watermelons, 10 kg each, to 8°C. If the watermelons are initially at 20°C, determine how long it will take for the refrigerator to cool them. The watermelons can be treated as water whose specific heat is 4.2 kJ/(kg·°C). Is your answer realistic or optimistic? Explain. *Answer: 2240 s*

5-46 When a man returns to his well-sealed house on a summer day, he finds that the house is at 32°C. He turns on the air conditioner, which cools the entire house to 20°C in

15 min. If the COP of the air conditioning system is 2.5, determine the power drawn by the air conditioner. Assume the entire mass within the house is equivalent to 800 kg of air for which $C_v = 0.72 \text{ kJ/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$ and $C_p = 1.0 \text{ kJ/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$.

5-46E When a man returns to his well-sealed house on a summer day, he finds that the entire house is at 90°F . He turns on the air conditioner, which cools the entire house to 70°F in 15 min. If the COP of the air conditioning system is 2.5, determine the power drawn by the air

The Carnot Cycle and Carnot Principles

5-63C What are the four processes that make up the Carnot cycle?

5-64C What are the four processes that make up the reversed Carnot cycle?

5-65C What are the two statements known as the Carnot principles?

5-66C Somebody claims to have developed a new reversible heat-engine cycle that has a higher theoretical efficiency than the Carnot cycle operating between the same temperature limits. How do you evaluate this claim?

5-67C Somebody claims to have developed a new reversible heat-engine cycle that has the same theoretical efficiency as the Carnot cycle operating between the same temperature limits. Is this a reasonable claim?

5-68C Is it possible to develop (a) an actual and (b) a reversible heat-engine cycle that is more efficient than a Carnot cycle operating between the same temperature limits? Explain.

Carnot Heat Engines

5-69C Is there any way to increase the efficiency of a Carnot heat engine other than by increasing T_H or decreasing T_L ?

5-70C Consider two actual power plants operating with solar energy. Energy is supplied to one plant from a solar pond at 80°C and to the other from concentrating collectors that raise the water temperature to 600°C . Which of these power plants will have a higher efficiency ~d why?

5-71 A Carnot heat engine operates between a source at 1000 K and J sink at 300 K. If the heat engine is supplied with heat at a rate of 800 kJ / min, determine (a) the thermal efficiency and (b) the power output of this heat engine. *Answers: (a) 70 percent, (b) 9.33 kW*

5-71E A Carnot heat engine operates between a source at 1800 R and I sink at 440 R. If the heat engine is supplied with heat at a rate of 1200 Btu/ min, determine (a) the thermal efficiency and (b) the power output of this heat engine. *Answers: (a) 75.6 percent, (b) 21.4 hp*

5-72 A Carnot heat engine receives 500 kJ of heat from a source of unknown temperature and rejects 200 kJ of it to a sink at 17°C . Determine (a) the temperature of the source and (b) the thermal efficiency of the heat engine.

5-73 A heat engine operates between a source at 550°C and a sink at 25°C . If heat is supplied to the heat engine at a steady rate of 1200 kJ /min, determine the maximum power output of this heat engine.

5-74 A heat engine is operating on Carnot cycle and has a thermal efficiency of 55 percent. The waste heat from this engine is rejected to a nearby lake at 15°C at a rate of 800 kJ/min. Determine (a) the power output of the engine and (b) the temperature of the

source. *Answers: (a) 16.3 kW, (b) 640K*

5-76 An innovative way of power generation involves the utilization of thermal energy—the energy of hot water that exists naturally underground—as the heat source. If a supply of hot water at 140°C is discovered at a location where the environmental temperature is 20°C , determine the maximum thermal efficiency a geothermal power plant at that location can have. *Answer: 29.1 percent*

5-77 An inventor claims to have developed a heat engine that receives 800 kJ of heat from a source at 400 K and produces 250 kJ of net work while rejecting the waste heat to a sink at 300 K. Is this a reasonable claim? Why

Carnot Refrigerators and Heat Pumps

5-79C How can we increase the COP of a Carnot refrigerator?

5-80C What is the highest COP that a refrigerator operating between temperature levels T_L and T_H can have?

5-81C What is the highest COP that a heat pump operating between temperature levels T_L and T_H can have?

5-82C In an effort to conserve energy in a heat-engine cycle, somebody suggests incorporating a refrigerator that will absorb some of the waste energy Q_L and transfer it to the energy source of the heat engine. Is this a smart idea? Explain.

5-83C It is well established that the thermal efficiency of a heat engine increases as the temperature at which heat is rejected from the heat engine T_L decreases. In an effort to increase the efficiency of a power plant, somebody suggests refrigerating the cooling water before it enters the condenser, where heat rejection takes place. Would you be in favor of this idea? Why?

5-84C It is well known that the thermal efficiency of a heat engine increases as the temperature of the energy source increases. In an attempt to improve the efficiency of a power plant, somebody suggests transferring heat from the available energy source to a higher temperature medium by a heat pump before energy is supplied to the power plant. What do you think of this suggestion? Explain.

5-85 A Carnot refrigerator operates in a room in which the temperature is 25°C and consumes 2 kW of power when operating. If the food compartment of the refrigerator is to be maintained at 3°C , determine the rate of heat removal from the food compartment.

5-86 A refrigerator is to remove heat from the cooled space at a rate 300 kJ/min to maintain its temperature at -8°C . If the air surrounding the refrigerator is at 25°C , determine the minimum power input required for this refrigerator. *Answer: 0.623 kW*

5-87 An air conditioning system operating on the reversed Carnot cycle is required to transfer heat from a house at a rate of 750 kJ/min, maintain its temperature at 20°C . If the outdoor air temperature is 35°C , determine the power required to operate this air conditioning system. *Answer: 0.64 kW*

Review Problems

5-100 Consider a Carnot heat engine cycle executed in a steady-flow system using steam as the working fluid. The cycle has a thermal efficiency of 30 percent, and steam changes from saturated liquid to saturated vapor at 300°C during the heat addition process. If the mass flow rate of the steam is 5 kg/s, determine the net power output of this engine, in kW.

5-101 A heat pump with a COP of 2.4 is used to heat a house. When running, the heat pump consumes 8 kW of electric power. If the house is losing heat to the outside at an average rate of 4000 kJ /h and the temperature of the house is 3°C when the heat pump is turned on, determine how long it will take for the temperature in the house to rise to 22°C. Assume the house is well sealed (ie., no air leaks) and take the entire mass within the house (air, furniture, etc.) to be equivalent to 2,000 kg of air.

5-102 A gas turbine has an efficiency of 17 percent and develops a power output of 6000 kW. Determine the fuel consumption rate of this gas turbine, in L/min, if the fuel has a heating value of 46,000 kJ/kg and a density of 0.8 g/cm³.

5-103 Show that $\text{COP}_{\text{HP}} = \text{COP}_{\text{R}} + 1$ when both the heat pump and refrigerator have the same Q_L and Q_H values.

5-104 An air conditioning system is used to maintain a house at a constant temperature of 20°C. The house is gaining heat from outdoors at a rate of 20,000 kJ /h, and the heat generated in the house from the people, lights, and appliances amounts to 8000 kJ /h. For a COP of 2.5, determine the required power input to this air conditioning system.
Answer: 3.11 kW

5-105 Consider a Carnot heat engine cycle executed in a closed system using 0.01 kg of steam as the working fluid. The cycle has a thermal efficiency of 15 percent, and the steam changes from saturated liquid to saturated vapor at 70°C during the heat addition process. Determine the net work output of this engine, in kJ.
