บทที่ 5
กฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์

ความมุ่งหมายเฉพาะ

1. แถลงคำกล่าวของกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์ได้อย่างน้อย 3 คำกล่าว

2. ยกตัวอย่างปรากฏการณ์ธรรมชาติที่อยู่ภายใต้กฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์แต่ไม่สามารถเกิดขึ้นจริงได้

3. สรุปหลักการทำงานของสิ่งต่อไปนี้ได้
   - เครื่องยนต์ความร้อน
   - ปั๊มความร้อน
   - เครื่องทำความเย็น
   - เครื่องยนต์คาร์โนต์

4. เขียนแผนภาพ P-V ของวัฏจักรคาร์โนต์ได้

5. หางานสุทธิที่ได้จากวัฏจักรคาร์โนต์ได้

6. บอกสมการเพื่อหาสิ่งต่อไปนี้ได้
   - ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อน
   - ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อนแบบวัฏจักรคาร์โนต์
   - สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน
   - สัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็น

7. อธิบายได้ว่าการสร้างเครื่องยนต์ทุกชนิดต้องอยู่ภายใต้กฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์

เนื้อหา

กฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์เป็นการกล่าวถึงหลักการคงที่ของพลังงาน กฎข้อที่ 1 ไม่สามารถจะบอกได้ว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงใดเกิดขึ้นได้จริง หรือไม่สามารถจะบอกให้เราทราบถึงทิศทางการถ่ายเทพลังงานแต่อย่างใด กฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์จะบอกให้เราว่ากระบวนการใดเกิดขึ้นได้จริงหรือเกิดขึ้นไม่ได้

5.1 กฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์

มีกระบวนการหรือปรากฏการณ์ธรรมชาติทางอุณหพลศาสตร์ที่เป็นได้ตามกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์แต่ไม่สามารถจะเกิดขึ้นได้จริง อย่างเช่นกระบวนการหรือปรากฏการณ์ต่อไปนี้มีทิศทางการเกิดขึ้นในทิศทางเดียวเท่านั้นไม่สามารถเกิดขึ้นในทิศทางย้อนกลับได้

- งานกล (mechanical work) เปลี่ยนเป็นความร้อนได้ทั้งหมดแต่ความร้อนไม่สามาถเปลี่ยนเป็นงานได้ทั้งหมด
- ความร้อนถ่ายเทจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำเท่านั้น
- การละลายของน้ำแข็งที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศให้กับน้ำแข็งแต่น้ำไม่สามารถจะกลับเป็นน้ำแข็งได้ที่อุณหภูมิห้อง
- การเย็นตัวของน้ำร้อนที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนให้กับบรรยากาศ แต่น้ำเย็นไม่สามารถจะเป็นน้ำร้อนขึ้นได้อีกที่อุณหภูมิห้อง

กฎข้อที่ 1 จึงไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทางอุณหพลศาสตร์จึงมีกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์ขึ้นมาเป็นกฎที่กล่าวถึงกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ที่เป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ว่าจะเกิดขึ้นได้จริงหรือไม่ในธรรมชาติ กฎข้อที่ 2 มีการกล่าวไว้หลายรูปแบบ เช่น

- ไม่มีกระบวนการใดๆ ที่จะดึงความร้อนจากรีเซอร์วัวร์หนึ่งและเปลี่ยนเป็นงานได้ทั้งหมด [เป็นคำกล่าวของเคลวิน (Lord Kelvin และพลังค์ (Max Planck)]
- ไม่มีกระบวนการใดๆ ที่จะดึงความร้อนจากรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิต่ำไปส่งถ่ายให้กับรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิสูงกว่าโดยไม่มีงานป้อนเข้าสู่ระบบ [เป็นคำกล่าวของคลอซิอุส(Rudoft Clausius)]
- กระบวนการที่ทำให้ระบบอิสระใดมีเอนโทรปี (entropy) ลดลงนั้นไม่มีในโลก
- ในกระบวนการย้อนกลับได้ เอนโทรปีรวมของระบบและสิ่งแวดล้อมจะคงที่ ส่วนกระบวนการย้อนกลับไม่ได้เอนโทรปีรวมของระบบและสิ่งแวดล้อมจะเพิ่มขึ้น

แม้ว่ากฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์กล่าวได้หลายรูปแบบแต่ทุกแบบก็จะชี้บ่งทิศทางของการเกิดกระบวนการทั้งสิ้นและเป็นคำกล่าวที่มีความเท่าเทียมกัน (equivalent statement) ทั้งหมด กฎข้อที่ 2 ตามคำกล่าวของเคลวิน และพลังค์ กับของคลอซิอุสซึ่งเป็นคำกล่าวที่เท่าเทียมกันนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการสร้างเครื่องยนต์และเครื่องทำความเย็น

5.2 เครื่องยนต์ความร้อนและกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์

เครื่องยนต์ความร้อนเป็นเครื่องมือที่เปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนเป็นพลังงานรูปอื่นที่มีประโยชน์เช่น เปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไป

จะมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเช่น ถ่านหินแล้วเอาความร้อนไปต้มน้ำให้กลายเป็นไอ ไอที่เกิดขึ้นใช้หมุนใบพัดของกังหัน พลังงานกลจากการหมุนใช้ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องยนต์ความร้อนอีกประเภทหนึ่งคือ เครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น เครื่องยนต์ของรถยนต์ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานกล

สารทำงานที่ใช้ในเครื่องยนต์ความร้อนอาจจะเป็นของเหลวหรือแก๊ส การทำงานของเครื่องยนต์จะทำงานเป็นกระบวนการวัฏจักรดังนี้

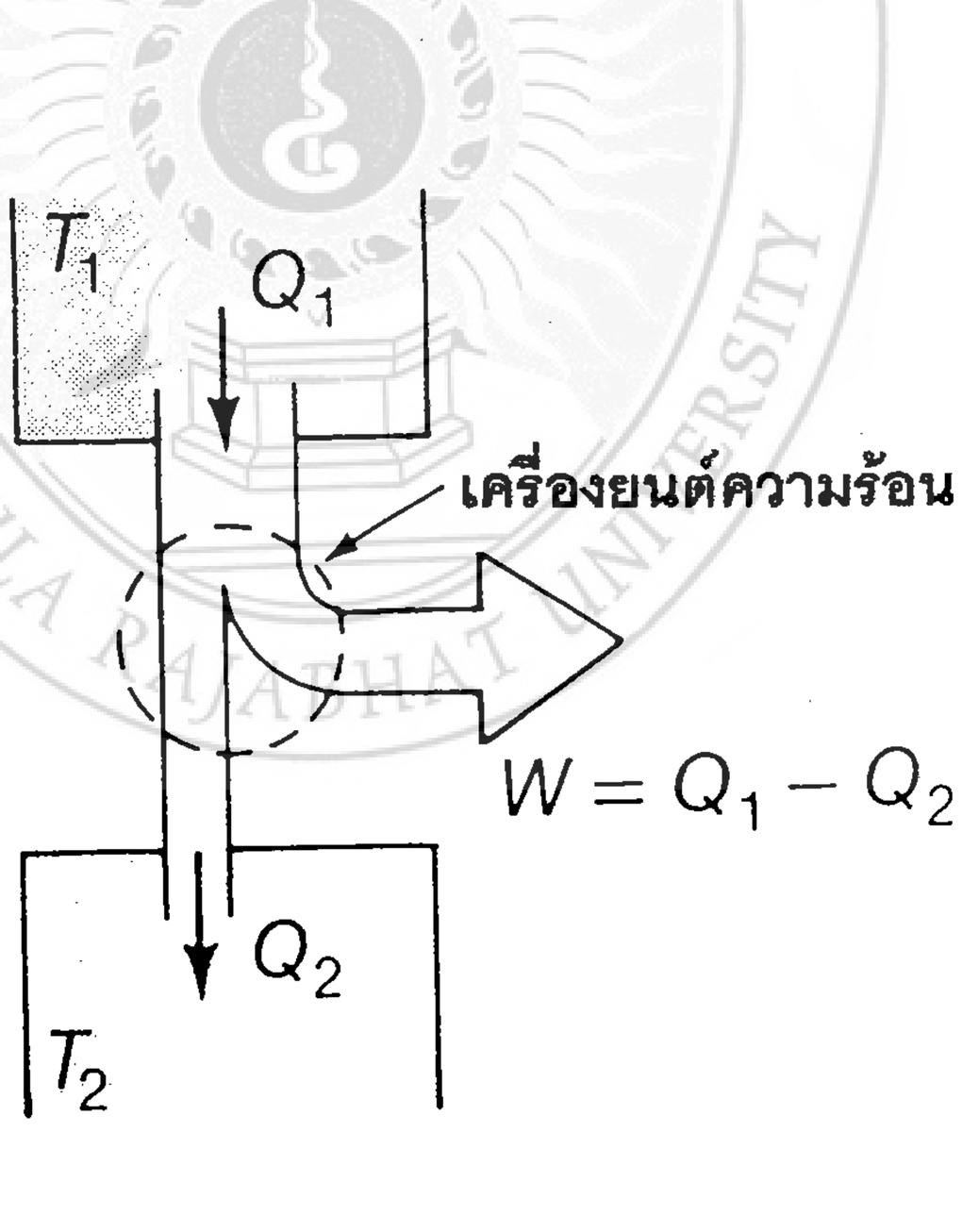
(1) เครื่องยนต์ดูดความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิสูงเข้ามา

(2) เครื่องยนต์ทำงาน

(3) เครื่องยนต์ถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งอุณหภูมิต่ำ

ตัวอย่างเช่น การทำงานของเครื่องยนต์ไอน้ำซึ่งใช้น้ำเป็นสารทำงาน น้ำจะถูกพาผ่านวัฏจักรซึ่งจะเริ่มจากกลายเป็นไอในหม้อต้มน้ำ (boiler) ขยายตัวดันลูกสูบ กลั่นตัวเป็นน้ำโดยน้ำเย็นและกลับไปสู่หม้อต้มน้ำจากนั้นก็จะเริ่มต้นซ้ำกระบวนการเดิม

รูปที่ 5.1 เป็นแผนภาพแสดงแบบแผนของเครื่องยนต์ความร้อน เครื่องยนต์ดูดความร้อนเข้ามา Q_1 จากรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิสูง ทำงาน W และปล่อยความร้อน Q_2 ให้กับรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 5.1 *แผนภาพแสดงแบบแผนของเครื่องยนต์ความร้อน*

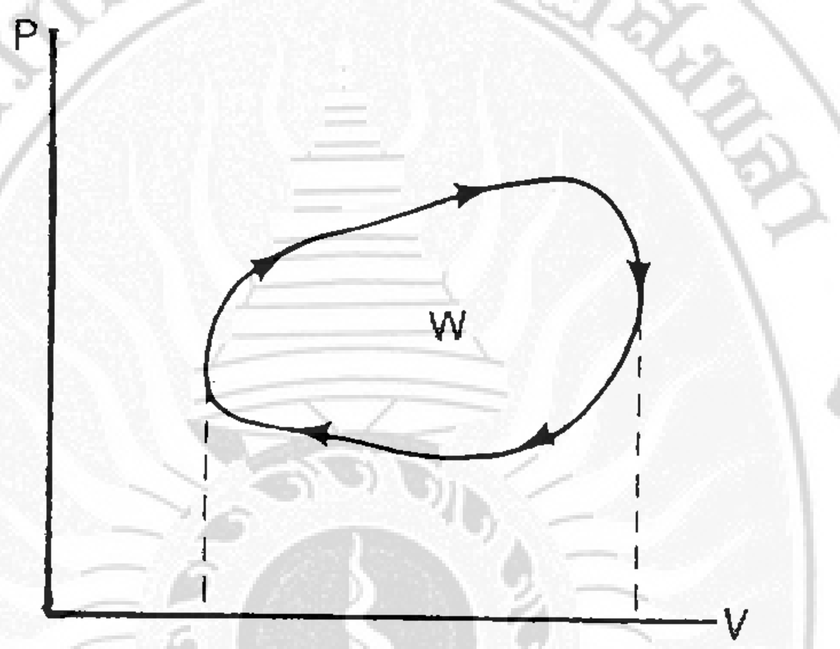
ที่มา : Marion, J.B., and Hornyak, F.W., 1984 : 419

เนื่องจากสารทำงานเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการวัฏจักร,สภาวะเริ่มต้นและสภาวะสุดท้ายเป็นสภาวะเดียวกัน พลังงานภายในของสารทำงานจึงมีค่าคงที่ ดังนั้น $\Delta U = 0$ และจากกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์จะได้ว่า

$$W = Q_1 - Q_2 \tag{5.1}$$

เมื่อ Q_1, Q_2 ใช้เป็นค่าบวกทั้งหมด

ถ้าสารตัวกลางเป็นแก๊สงานสุทธิ W สำหรับกระบวนการวัฏจักรจะเป็นพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้นโค้งที่แทนกระบวนการตามแผนภาพ P-V ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 *แผนภาพ P-V สำหรับกระบวนการวัฏจักรใดๆ งานสุทธิที่ทำโดยระบบเป็นพื้นที่ภายในวงปิด*

ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อน (efficency of heat engine, e) ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อนหรือประสิทธิภาพความร้อน (heat efficency) คือ อัตราส่วนระหว่างงานสุทธิที่เครื่องยนต์ทำได้ต่อพลังงานความร้อนที่เครื่องยนต์รับเข้ามาระหว่างกระบวนการ นั่นคือ

$$e = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \tag{5.2}$$

เราอาจคิดว่าประสิทธิภาพเป็นอัตราส่วนระหว่างสิ่งที่เราได้(งานกล) กับสิ่งที่เราให้ (ความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิสูง) สมการ (5.2) ชี้ให้เราเห็นว่าเครื่องยนต์ความร้อนจะมีประสิทธิภาพ 100% (e=1) เมื่อ $Q_2 = 0$ นั่นคือไม่มีการปล่อยความร้อนทิ้งให้กับรีเซอร์วัวร์ที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือกล่าวในอีกแง่หนึ่งว่าเครื่องยนต์ความร้อนจะมีประสิทธิภาพเต็มต่อเมื่อสามารถเปลี่ยนความร้อนที่รับเข้ามาเป็นงานได้ทั้งหมด ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นไม่ได้ จึงนำไปสู่คำกล่าวของกฎ

ข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์แบบหนึ่งว่า **เป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างเครื่องยนต์ความร้อนที่จะเปลี่ยนความร้อนที่รับเข้ามาเป็นงานได้ทั้งหมดโดยไม่มีผลอื่นเกิดขึ้น**

หากนำกฎข้อที่ 2 ตามคำกล่าวข้างบนไปอ้างในสมการ (5.2) จะได้ว่า ไม่มีทางที่จะทำให้ $W = Q_1$ หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งว่าในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อนจะมีความร้อนส่วนหนึ่งคือ Q_2 ซึ่งต้องปล่อยให้กับสิ่งแวดล้อม เป็นผลเชิงทฤษฎีตามมาว่าไม่สามาถจะสร้างเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพ 100% ได้

กรณีของกระบวนการวัฏจักร กฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์สรุปว่า เราไม่สามารถจะเอาพลังงานออกจากระบบมากกว่าที่ระบบได้รับ กฎข้อที่ 2 สรุปว่าเราต้องให้ความร้อนกับระบบที่อุณหภูมิสูงมากกว่างานสุทธิที่ได้รับจากระบบ

ตัวอย่าง 5.1 ให้หาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เมื่อได้รับความร้อน 2000 J ระหว่างจังหวะระเบิดและปล่อยความร้อนไป 1500 J ในจังหวะคาย

วิธีทำ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กำหนดตามสมการ (5.2) คือ

$$e = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{1500J}{2000J} = 0.25 \text{ หรือ } 25\%$$

5.3 กระบวนการย้อนกลับได้และกระบวนการย้อนกลับไม่ได้

เราได้กล่าวถึงกระบวนการย้อนกลับได้และกระบวนการย้อนกลับไม่ได้มาแล้วครั้งหนึ่งในหัวข้อที่ 1.3 เราเรียกกระบวนการย้อนกลับได้ว่าเป็นกระบวนการที่ระบบเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ และอยู่ในภาวะสมดุลอย่างต่อเนื่องและสามารถระบุสภาวะของระบบได้ตลอดกระบวนการ ในทางตรงกันข้ามเราเรียกกระบวนการที่ทำให้ระบบเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหรือไม่อยู่ในภาวะสมดุลอย่างต่อเนื่องว่ากระบวนการย้อนกลับไม่ได้ โดยทฤษฎีแล้วกระบวนการที่จะนับเป็นกระบวนการย้อนกลับได้จะมีคุณสมบัติว่าเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแล้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับตามเส้นทางเดิมจะต้องทำให้ระบบและสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงกลับไปสู่สภาวะเดียวกับสภาวะเริ่มต้นได้ จึงเห็นว่าหากระบบมีการสูญเสียพลังงานไประหว่างการเปลี่ยนแปลง เช่น มีการสูญเสียพลังงานไปเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานหรือสูญเสียพลังงานความร้อนไปในรูปการแผ่รังสีหรือการนำความร้อน พลังงานที่สูญเสียไปดังกล่าวไม่สามารถจะกลับคืนได้ระหว่างการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับตามเส้นทางเดิม กระบวนการที่เกิดขึ้นจึงไม่เป็นกระบวนการย้อนกลับได้ แต่จะเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้

เพื่อเป็นการย้ำว่ากระบวนการย้อนกลับได้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยธรรมชาติหรือถูกสร้างขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เพียงแต่ได้โดยประมาณเท่านั้น ลองพิจารณากระบวนการขยายตัวอย่างอิสระแบบเอเดียเบติกซึ่งได้กล่าวไว้ตามหัวข้อ 4.5 กระบวนการนี้แก๊สภายในภาชนะปิดไม่ได้ทำงานต่อสิ่งแวดล้อมและไม่มีพลังงานความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ จึงมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะระบบโดยที่สิ่งแวดล้อมไม่เปลี่ยนแปลง คราวนี้หากเราจะหากรรมวิธีอัดแก๊สในกระบอกสูบเพื่อให้ระบบเปลี่ยนแปลงกลับไปสู่สภาวะเริ่มต้นดังเดิมและขณะเดียวกันต้องการให้สิ่งแวดล้อมยังคงอยู่เหมือนสภาวะเดิมโดยไม่เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด

โดยจินตนาการว่าจะใช้เครื่องยนต์อัดแก๊ส การใช้เครื่องยนต์อัดแก๊สจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งระบบและสิ่งแวดล้อม ระบบเปลี่ยนแปลงเพราะการอัดแก๊สทำให้อุณหภูมิของแก๊สสูงขึ้น สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงเพราะมีงานจากสิ่งแวดล้อมกระทำต่อระบบเพื่อแก้ปัญหานี้ระหว่างการอัดแก๊สจะใช้กรรมวิธีให้ภาชนะที่บรรจุแก๊สสัมผัสกับแหล่งรับความร้อนภายนอกระบบ แก๊สจะมีอุณหภูมิต่ำลงกลับสู่สภาพเริ่มต้นได้ และเอาพลังงานความร้อนที่แก๊สถ่ายให้กับแหล่งรับความร้อนภายนอกไปขับเครื่องยนต์เพื่ออัดแก๊ส ด้วยแนวคิดนี้ทั้งระบบและสิ่งแวดล้อมก็จะกลับสู่สภาพเริ่มต้น กระบวนการการเปลี่ยนแปลงของระบบแก๊สเป็นวัฏจักรดังกล่าวก็น่าจะเป็นกระบวนการวัฏจักรย้อนกลับได้ที่แท้จริง แต่โดยความเป็นจริงแล้วกรรมวิธีตามแนวความคิดที่กล่าวมาจะไม่มีวันเกิดขึ้นได้ ทั้งนี้เพราะตามกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์บอกเราว่า **ความร้อนที่ถ่ายเทออกไปเมื่อนำไปใช้ขับเครื่องยนต์จะไม่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานกลเพื่ออัดแก๊สได้ทั้งหมด** กระบวนการย้อนกลับได้ที่แท้จริงจึงไม่มีวันจะเกิดขึ้นได้

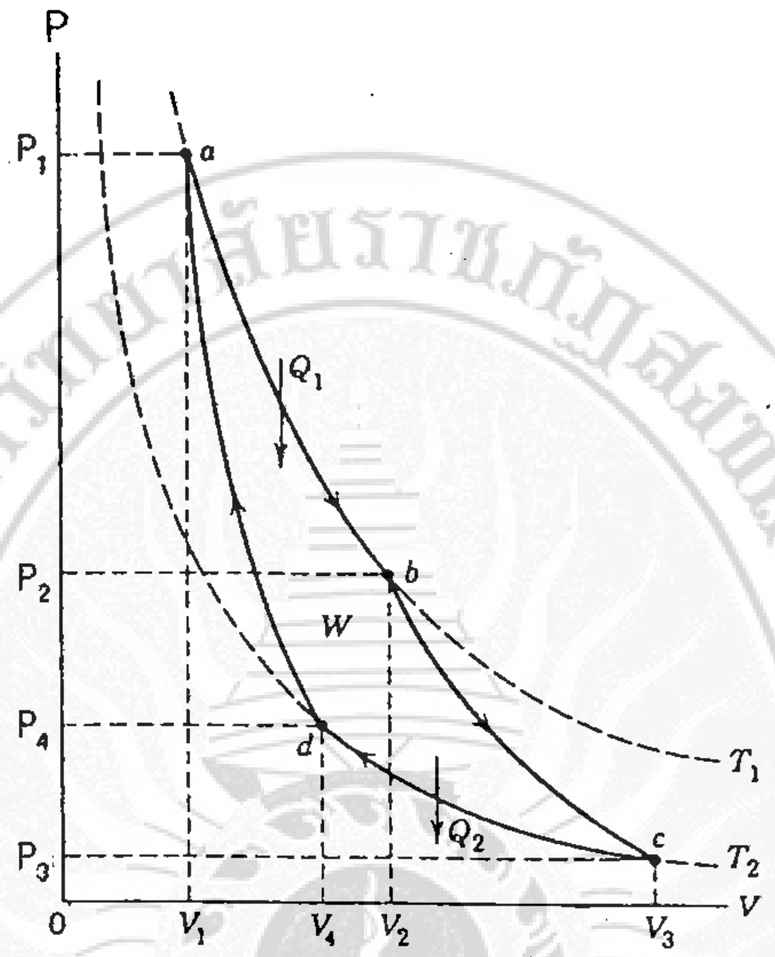
แม้ว่ากระบวนการที่แท้จริงจะเป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ก็ตามแต่ก็มีกระบวนการที่สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นกระบวนการย้อนกลับได้ หากกระบวนการนั้นเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในลักษณะที่ทำให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลอย่างต่อเนื่อง ดังตัวอย่างที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 1.3

5.4 วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle)

วัฏจักรคาร์โนต์เป็นวัฏจักรเชิงทฤษฎีที่ประกอบด้วยกระบวนการย่อย 4 กระบวนการดังนี้

- เริ่มต้นสารทำงานรับความร้อน โดยกระบวนการย้อนกลับได้จากแหล่งรีเซอร์วัวร์ที่มีอุณหภูมิสูงคงที่ T_1
- สารทำงานขยายตัวแบบเอเดียเบติกย้อนกลับได้จนอุณหภูมิลดลงเป็น T_2
- สารทำงานถ่ายเทความร้อน โดยกระบวนการย้อนกลับได้ให้กับรีเซอร์วัวร์ที่มีอุณหภูมิคงที่ T_2
- สารทำงานถูกอัดแบบเอเดียเบติกย้อนกลับได้กลับสู่สภาวะเริ่มต้น

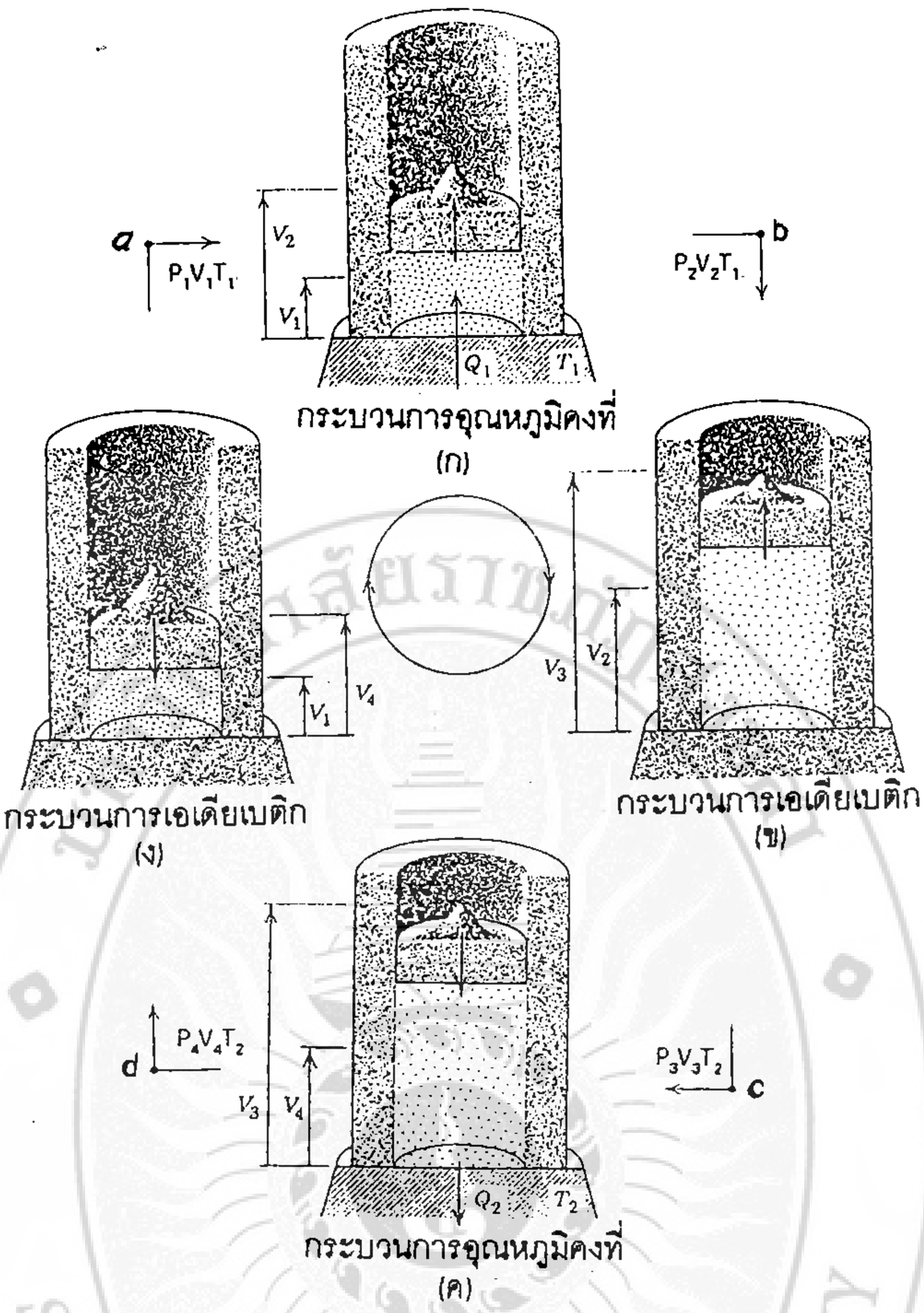
สารทำงานอาจจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส (สำหรับแก๊สอาจจะเป็นแก๊สอุดมคติหรือไม่ก็ได้) และสารทำงานอาจจะเปลี่ยนสถานะระหว่างวัฏจักรก็ได้ แผนภาพ P-V ของวัฏจักรคาร์โนต์จะเป็นพื้นที่ที่ล้อมด้วยเส้นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ 2 เส้น และเส้นกระบวนการเอเดียเบติก 2 เส้น กรณีที่สารทำงานเป็นแก๊สแผนภาพ P-V ของวัฏจักรคาร์โนต์จะมีรูปร่างดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 *วัฏจักรของคาร์โนต์ เส้นทาง ab, bc, cd และ da เป็นกระบวนการย่อยที่เกิดขึ้นตามลำดับ*
ที่มา : คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรระดับมหาวิทยาลัยสาขาฟิสิกส์, 2523 : 195

เพื่อให้เกิดความชัดเจนยิ่งขึ้นพิจารณาวัฏจักรของคาร์โนต์ของเครื่องยนต์คาร์โนต์ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ความร้อนตามจินตนาการของคาร์โนต์ (Sadi Carnot) วิศวกรชาวฝรั่งเศส เครื่องยนต์คาร์โนต์เป็นเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่เป็นไปได้ ในเครื่องยนต์จะใช้สารทำงานเป็นของไหล (fluid) อยู่ในกระบอกสูบซึ่งมีฐานเป็นตัวนำความร้อนและผนังกระบอกสูบเป็นฉนวนความร้อน ภายในกระบอกสูบมีลูกสูบซึ่งพอดีกับกระบอกสูบกับทั้งไม่มีแรงเสียดทานระหว่างลูกสูบกับกระบอกสูบ นอกจากนี้ติดตั้งรีเซอร์วัวร์ 2 แหล่ง คือ แหล่งที่มีอุณหภูมิสูง T_1 และแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำ T_2 และติดตั้งฉนวนความร้อนไว้อีก 2 แหล่ง การทำงานของเครื่องยนต์จะเป็นวัฏจักรย้อนกลับได้ดังรูปที่ 5.4

● ขั้นเริ่มต้น เอากระบอกสูบวางบนรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิ T_1 ของไหลมีสภาวะสมดุลเริ่มต้นเป็น P_1, V_1, T_1 [รูปที่ 5.4 (ก) และตรงกับตำแหน่ง *a* ตามรูปที่ 5.3] จากนั้นปล่อยให้ของไหลขยายตัวอย่างช้าๆ แบบอุณหภูมิคงที่ จนมีสภาวะสมดุลเป็น P_2, V_2, T_1. (จะตรงกับตำแหน่ง *b* ตามรูปที่ 5.3) ขั้นนี้มีพลังงานความร้อน Q_1 เข้าสู่ของไหลทางฐาน



รูปที่ 5.4 *วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์คาร์โนต์ ประกอบด้วย*

(ก) กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (ข) กระบวนการขยายตัวแบบเอเดียเบติก

(ค) กระบวนการอัดแบบอุณหภูมิคงที่ (ง) กระบวนการอัดแบบเอเดียเบติก

ที่มา : ชุมนุมวิชาการคณะวิศกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย, 2515 : 595

● ขั้นที่ 2 วางลูกสูบบนฉนวน [รูปที่ 5.4 (ข)] และปล่อยให้ของไหลขยายตัวแบบเอเดียเบติกอย่างช้าๆ จนมีสภาวะสมดุลเป็น P_3, V_3, T_2 (จะตรงกับตำแหน่ง c ตามรูปที่ 5.3) ขั้นนี้ไม่มีความร้อนเข้าและออกจากระบบ

● ขั้นที่ 3 วางกระบอกสูบบนรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิต่ำ T_2 [รูปที่ 5.4 (ค)] และอัดของไหลแบบอุณหภูมิคงที่จนมีสภาวะสมดุลเป็น P_4, V_4, T_2 (จะตรงกับตำแหน่ง d ตามรูปที่ 5.3) ขั้นนี้ความร้อน Q_2 ถ่ายเทจากของไหลผ่านฐานลูกสูบไปยังรีเซอร์วัวร์

● ขั้นที่ 4 วางกระบอกสูบบนที่ตั้งฉนวน [รูปที่ 5.4 (ง)] และอัดของไหลแบบเอเดียเบติกจนมีสภาวะสมดุลเป็น P_1, V_1, T_1 (และตรงกับตำแหน่ง a ตามรูปที่ 5.3) ขั้นนี้ไม่มีความร้อนเข้าและออกจากระบบ

จากแผนภาพรูปที่ 5.3 งานที่ทำโดยระบบในขั้นขยายตัว a ไป b และ b ไป c จะมีค่ามากกว่างานที่ทำบนระบบในช่วงการอัด c ไป d และ d ไป a หากให้ W เป็นงานสุทธิที่ทำโดยระบบซึ่งมีค่าเท่ากับพื้นที่ซึ่งล้อมด้วยเส้นทาง $abcd$ ปริมาณความร้อนสุทธิที่ระบบได้รับคือ $Q_1 - Q_2$ ซึ่ง Q_1 เป็นความร้อนที่ดูดไว้ในขั้นที่ 1 และ Q_2 เป็นความร้อนที่ปล่อยออกในขั้นที่ 3 และโดยที่เครื่องยนต์คาร์โนต์ทำงานเป็นวัฏจักรงานที่ทำโดยเครื่องยนต์คาร์โนต์จึงเป็นไปตามสมการ (5.1) คือ $W = Q_1 - Q_2$

คาร์โนต์ยังแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คาร์โนต์ที่ใช้แก๊สอุดมคติเป็นสารทำงาน นอกจากจะเป็นไปตามสมการ (5.2) เหมือนเครื่องยนต์ทั่วไปแล้วยังมีค่าเป็น

$$e_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (5.3)$$

เมื่อ T_1 เป็นอุณหภูมิของรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิสูงที่เครื่องยนต์รับความร้อนเข้ามา T_2 เป็นอุณหภูมิของรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิต่ำที่เครื่องยนต์ถ่ายความร้อนออกไป หน่วยของอุณหภูมิ T_1, T_2 มีหน่วยเป็นเคลวิน

สำหรับเครื่องยนต์คาร์โนต์หรือวัฏจักรคาร์โนต์เทอมทางขวามือของสมการ (5.2) และ (5.3) จะมีค่าเท่ากันจึงได้ข้อสรุปที่สำคัญประการหนึ่งว่า

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \qquad (5.4)$$

ตามสมการ (5.3) จะสามารถสรุปคุณลักษณะของเครื่องยนต์คาร์โนต์บางประการดังนี้

- เครื่องยนต์คาร์โนต์ทั้งหลายที่ทำงานอยู่ระหว่างคู่อุณหภูมิที่เท่ากัน จะมีประสิทธิภาพเท่ากัน

- ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คาร์โนต์เป็นศูนย์เมื่อ $T_1 = T_2$ ตรงตามที่คาดหมาย และประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ T_2 ลดลงและ T_1 เพิ่มขึ้น หาก $T_2 = 0$ K ประสิทธิภาพจะเป็น 1 ซึ่งเป็นไปไม่ได้เนื่องจากเมื่อ $T_2 = 0$ K ก็คืออุณหภูมิของรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิต่ำเป็น 0 K ด้วย ซึ่งเท่ากับไม่มีรีเซอร์วัวร์ และเท่ากับว่าเครื่องยนต์ดึงเอาความร้อนจากรีเซอร์วัวร์ที่มีอุณหภูมิสูงเพียงแหล่งเดียวมาเปลี่ยนเป็นงานทั้งหมด ซึ่งย่อมเป็นไปไม่ได้ตามกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวไว้ตามหัวข้อ 5.2

ในทางปฏิบัติเกือบทั้งหมดรีเซอร์วัวร์ที่มีอุณหภูมิต่ำจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง คือประมาณ 300 K การเพิ่มประสิทธิภาพจึงทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิของรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิสูง

ตัวอย่างที่ 5.2 จงแสดงว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คาร์โนต์ $e_C = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ โดยสมมติว่าสารทำงานเป็นแก๊สอุดมคติ

วิธีทำ อาศัยรูปที่ 5.4 และงานที่ทำโดยระบบในการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่จาก a ไป b จะเป็นไปตามสมการ (3.4) คือ

$$W_{ab} = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

งานที่ทำโดยระบบในการขยายตัวแบบเอเดียเบติกจาก b ไป c จะเป็นไปตามสมการ (4.22) คือ

$$W_{bc} = \frac{nR}{1-\gamma}\left(T_2 - T_1\right)$$

งานที่ทำบนระบบในการหดตัวแบบอุณหภูมิคงที่จาก c ไป d จะเป็นไปตามสมการ (3.4) คือ

$$W_{cd} = nRT_2 \ln \frac{V_4}{V_3}$$
$$= -nRT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

งานที่ทำบนระบบในการอัดแบบเอเดียเบติกจาก d ไป a จะเป็นไปตามสมการ (4.22) คือ

$$W_{da} = \frac{nR}{1-\gamma}\left(T_1 - T_2\right)$$

และเนื่องจาก W_{ab} = Q_1 (กระบวนการอุณหภูมิคงที่ของแก๊สอุดมคติ)
ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คาร์โนต์คือ

$$e_C = \frac{W}{Q_1} = \frac{W_{ab} + W_{bc} + W_{cd} + W_{da}}{Q_1}$$
$$= \frac{nR\left(T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}\right)}{nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} \qquad (1)$$

เนื่องจากสภาวะ b และ c อยู่ในกระบวนการเอเดียเบติกเดียวกัน และสภาวะ a และ d อยู่ในสภาวะเอเดียเบติกเดียวกัน ตามสมการ (4.19) จะได้ว่า

$$T_1V_2^{\gamma-1} = T_2V_3^{\gamma-1} \tag{2}$$

และ
$$T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_4^{\gamma-1} \tag{3}$$

สมการ (3) ÷ (2) จะได้ว่า

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ ข้างบนแทนใน (1) จะได้

$$e_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

ตัวอย่างที่ 5.3 เครื่องยนต์ไอน้ำมีหม้อต้มน้ำทำงานที่ 500 K ความร้อนเปลี่ยนสถานะของน้ำเป็นไอน้ำและไอน้ำไปขับลูกสูบ อุณหภูมิที่คายให้กับอากาศข้างนอกประมาณ 300 K ให้หาประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องยนต์ไอน้ำ

วิธีทำ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คาร์โนต์ตามสมการ (5.3) ใช้สำหรับหาประสิทธิภาพสูงสุดเชิงทฤษฎีของเครื่องยนต์ชนิดต่างๆ ดังนั้น

$$\text{e (สูงสุด)} = e_C = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$
$$= 1 - \frac{300K}{500K} = 0.4 \text{ หรือ } 40\ \%$$

ตัวอย่างที่ 5.4 เครื่องยนต์เบนซิน (gasoline engine) ทำงานเป็นวัฏจักรมีประสิทธิภาพสูงสุดเชิงทฤษฎีเป็น 3 % ถ้าเครื่องยนต์ขับไอเสียสู่บรรยากาศที่อุณหภูมิ 300 K

(ก) ให้หาอุณหภูมิภายในลูกสูบทันทีที่จุดระเบิด

(ข) ถ้าในแต่ละรอบเครื่องยนต์ดูดความร้อนจากรีเซอร์วัวร์มีอุณหภูมิสูงเข้ามา 837 J ให้หางานที่เครื่องยนต์ทำได้ในแต่ละรอบ

วิธีทำ (ก) ตามสมการ (5.3) จะได้

$$T_2 = \frac{T_1}{1 - e_C} = \frac{300K}{1 - 0.3} = 429K$$

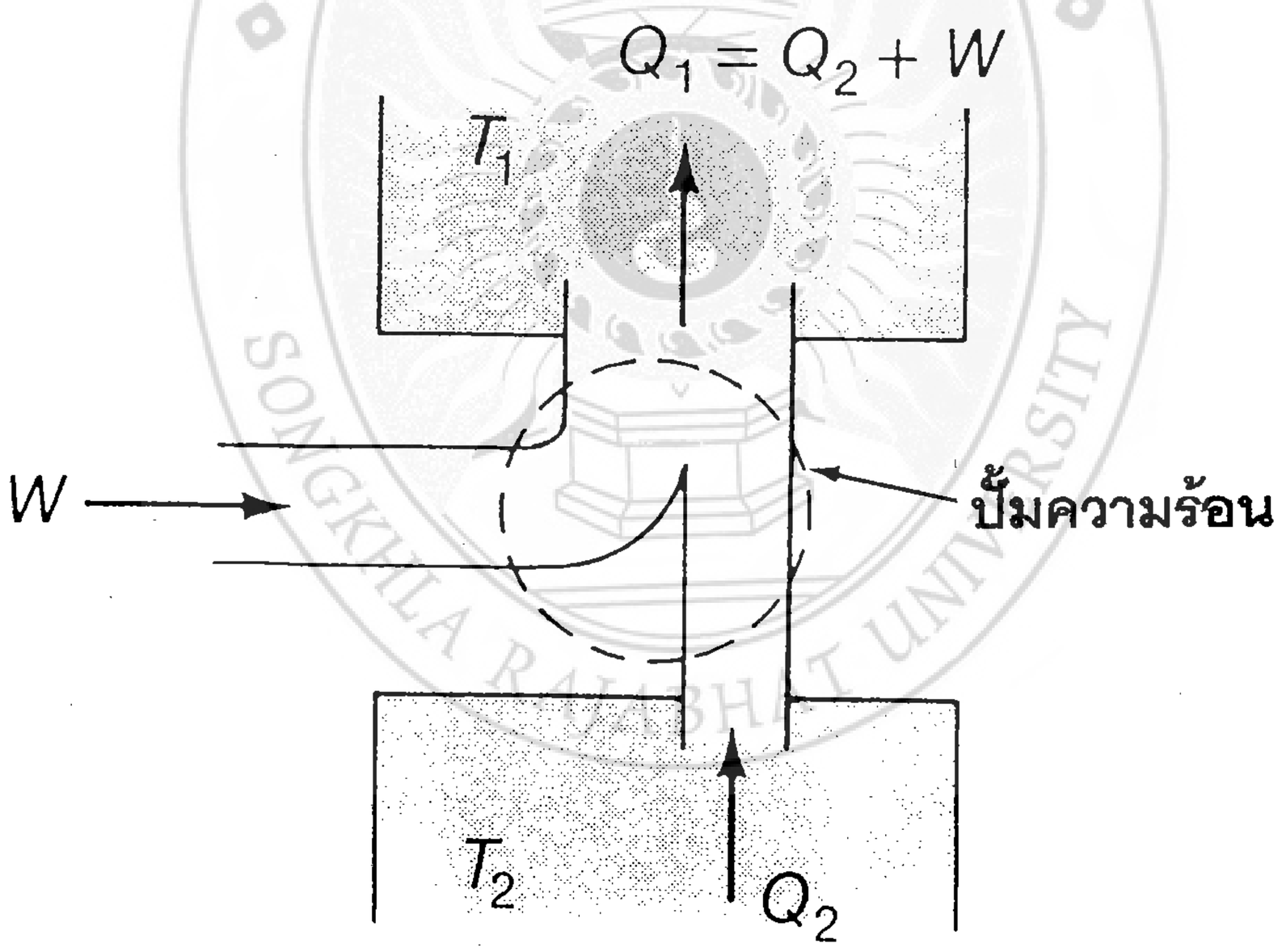
(ข) ตามสมการ (5.2) จะได้ว่า

$$W = Q_1 e = Q_1 e_c$$
$$= (837\ \text{J})(3\ \%)$$
$$= 251\ \text{J}$$

5.5ปั๊มความร้อนและเครื่องทำความเย็น(heat pump and refrigerator)

ปั๊มความร้อนเป็นเครื่องกลที่ใช้ดึงเอาความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิสูง ปั๊มความร้อนใช้ประโยชน์เป็นตัวทำความเย็นอย่างแพร่หลายมาก่อน ปัจจุบันใช้ประโยชน์เป็นตัวทำความร้อนด้วย

หลักการทำงานของเครื่องปั๊มความร้อนมีหลักการทำงานเป็นวัฏจักรทวน (reverse cycle) กับการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อน ดังแผนภาพแสดงแบบแผนตามรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 *แผนภาพแสดงแบบแผนการทำงานของเครื่องปั๊มความร้อน*

ที่มา : Marion, J.B., and Hornyak, F.W., 1984 : 421

อุณหภูมิภายนอกปั๊มความร้อนเป็นอุณหภูมิต่ำ T_2 อุณหภูมิภายในปั๊มความร้อนเป็นอุณหภูมิสูง T_1 ปั๊มความร้อนจะดูดความร้อน Q_2 จากรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิ T_2 คอมเพรสเซอร์ (compressor) จะทำงาน W (งานที่ทำโดยปั๊มความร้อน) บนสารทำงาน และเครื่องปั๊มความร้อนจะถ่ายความร้อน Q_1 ให้กับรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิสูง T_1 และตามกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์จะได้ว่า

$$W = Q_1 - Q_2$$

ในการใช้เครื่องปั๊มความร้อนเป็นตัวทำความร้อน ของไหลซึ่งเป็นสารทำงานเรียกว่าสารทำความเย็น (circulating coolant fluid) จะดึงเอาความร้อนจากภายนอกซึ่งเป็นแหล่งอุณหภูมิต่ำ (T_2) เช่นจากอากาศ แล้วปล่อยให้กับบริเวณภายในที่ต้องการให้อุณหภูมิสูงขึ้น (T_1) เช่น ภายในห้อง สารทำงานจะอยู่ในรูปของไอความดันต่ำในขดท่อ (coil) ติดอยู่กับส่วนนอกของปั๊มความร้อนและให้สัมผัสกับบริเวณที่จะดูดความร้อนเข้ามา เมื่อไอถูกอัดจนร้อนกลายเป็นไอความดันสูงเข้าไปภายในเครื่องปั๊มความร้อน ไอจะกลั่นตัวเป็นของเหลวและคายความร้อนให้กับบริเวณภายในที่ต้องการ

เครื่องปรับอากาศ (air conditioner) นับเป็นเครื่องปั๊มความร้อนอย่างง่ายติดตั้งในลักษณะที่กลับข้างระหว่าง**ภายนอก**กับ**ภายใน** ภายใน (อุณหภูมิต่ำ) เป็นแหล่งที่ดึงเอาความร้อนออกไป เช่นภายในห้อง ภายนอก(อุณหภูมิสูง)เป็นแหล่งที่นำเอาความร้อนไปปล่อยเช่น อากาศภายนอกห้อง

ความสามาถของปั๊มความร้อนเมื่อใช้เป็นตัวทำความร้อนจะบอกด้วยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance, COP) ของเครื่องปั๊มความร้อน ซึ่งนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ถ่ายเทออกไปสู่รีเซอร์วัวร์อุณหภูมิสูงกับงานที่ทำโดยปั๊มความร้อน (งานที่ใช้ในการอัด)

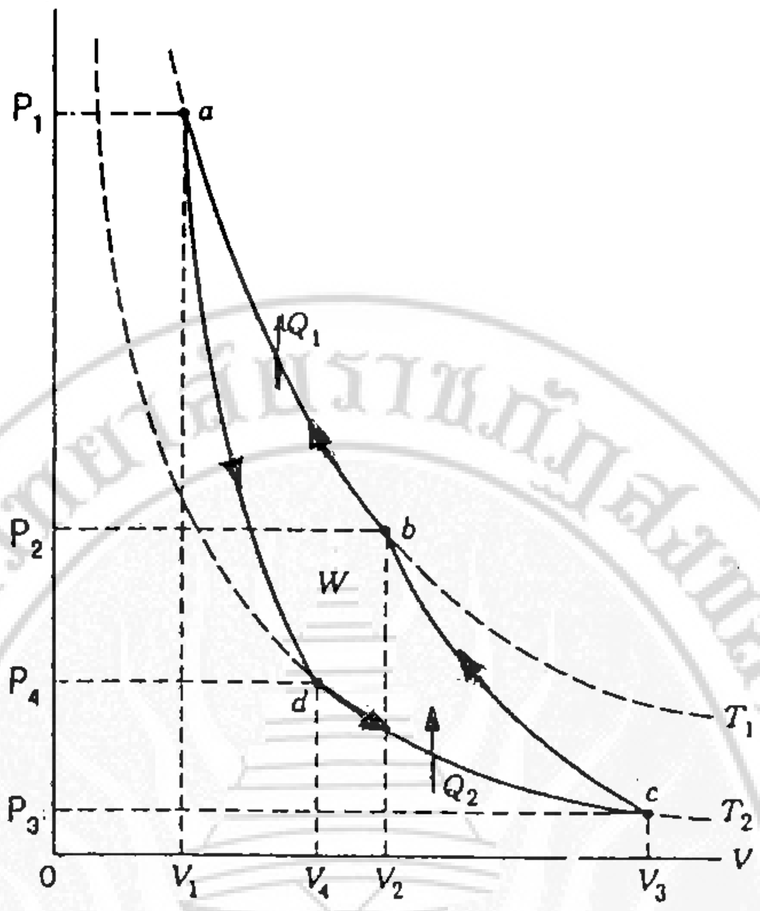
$$\text{COP (ปั๊มความร้อน)} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} \qquad (5.5)$$

ถ้าอากาศภายนอกเป็น 25 °F หรือมากกว่า ปั๊มความร้อนจะมีค่า COP ประมาณ 4 ซึ่งหมายถึงความร้อนที่เข้าไปในบ้านเป็น 4 เท่าของงานที่ทำโดยคอมเพรสเซอร์ในปั๊มความร้อน ถ้าอุณหภูมิภายนอกลดลงปั๊มดึงเอาความร้อนจากข้างนอกยากขึ้นทำให้ COP ลดลง COP สามารถลดลงน้อยกว่า 1 เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 12 °F

หากใช้วัฏจักรคาร์โนต์ทวนสร้างปั๊มความร้อน ในช่วงอุณหภูมิที่ทำงานสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุดที่เป็นไปได้ของปั๊มความร้อนที่ทำเป็นเครื่องทำความร้อนคือ

$$\text{COP}_C \text{ (ปั๊มความร้อน)} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \qquad (5.6)$$

รูปที่ 5.6 แสดงแผนภาพ P-V ของปั๊มความร้อนเมื่อทำงานเป็นวัฏจักรคาร์โนต์ทวน (reverse Carnot cycle) จะเห็นว่ากระบวนการย่อยจะมีทิศทางกลับกับวัฏจักรคาร์โนต์ปกติ จะเห็นได้จากทิศทางลูกศรจะมีทิศสวนกลับคือ ทิศตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.6 *แผนภาพ P-V ของปั๊มความร้อนที่มีวัฏจักรเป็นวัฏจักรคาร์โนต์ทวน*

ที่มา : ปรับปรุงจากคณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรระดับมหาวิทยาลัย สาขาฟิสิกส์, 2523 : 195

เครื่องทำความเย็น (เช่นตู้เย็น) เป็นปั๊มความร้อนที่ใช้ประโยชน์เป็นตัวทำความเย็น เครื่องทำความเย็นจะมีหลักการทำงานเหมือนปั๊มความร้อนทุกประการ ยกเว้นกระบวนการในเครื่องทำความเย็นจะดูดเอาความร้อน Q_2 จากอาหารที่อยู่ภายในออกไปถ่ายให้อากาศที่ร้อนกว่าภายนอกโดยที่คอมเพรสเซอร์ทำงาน W สัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็นมีนิยามเป็น อัตราส่วนระหว่างความร้อนที่เครื่องทำความเย็นได้รับแหล่งอุณหภูมิต่ำ Q_2ต่องานที่ทำโดยเครื่องทำความเย็น (งานที่ใช้ในการอัด)

$$\text{COP (เครื่องทำความเย็น)} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \qquad (5.7)$$

เครื่องทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพจะเป็นเครื่องทำความเย็นที่สามารถดูดเอาความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำเข้ามามากที่สุดโดยใช้งานน้อยที่สุด เครื่องทำความเย็นที่ดีโดยทั่วไปจะมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 5 หรือ 6

สัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็นที่มีค่าสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ก็คือทำความเย็นที่มีสารทำงานมีการเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักรคาร์โนต์ทวน คือ

$$\text{COP}_C \text{ (เครื่องทำความเย็น)} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \tag{5.8}$$

แผนภาพ P-V ของเครื่องทำความเย็นที่มีวัฏจักรเป็นวัฏจักรคาร์โนต์ทวนจะเป็นไปดังรูปที่ 5.6 เช่นเดียวกับปั๊มความร้อนที่เป็นตัวทำความร้อน

ตัวอย่างที่ 5.5 หากปั๊มความร้อนและเครื่องทำความเย็นทำงานภายใต้วัฏจักรคาร์โนต์ทวนจงแสดงว่า $Q_2/Q_1 = T_2/T_1$

วิธีทำ (ก) กรณีของปั๊มความร้อน เมื่อปั๊มความร้อนทำงานภายใต้วัฏจักรคาร์โนต์ทวนผลตามสมการ (5.5) และสมการ (5.6) จะมีค่าเท่ากัน คือ

$$\frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$$\frac{1}{1 - \frac{Q_2}{Q_1}} = \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_1}}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \tag{5.9}$$

(ข) กรณีของเครื่องทำความเย็น เมื่อเครื่องทำความเย็นทำงานภายใต้วัฏจักรคาร์โนต์ทวนผลตามสมการ (5.7) และสมการ (5.8) จะมีค่าเท่ากัน คือ

$$\frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$\frac{1}{\frac{Q_1}{Q_2} - 1} = \frac{1}{\frac{T_1}{T_2} - 1}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \tag{5.10}$$

ตามตัวอย่างนี้จะเห็นว่าความสัมพันธ์ $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$ นอกจากจะใช้ได้กับเครื่องยนต์ความร้อนที่ทำงานตามวัฏจักรคาร์โนต์แล้วยังใช้ได้กับปั๊มความร้อนและเครื่องทำความเย็นที่ทำงานตามวัฏจักรคาร์โนต์ทวนอีกด้วย

ตัวอย่างที่ 5.6 ระบบทำความเย็นตามแบบของคาร์โนต์อันหนึ่งทำงานอยู่ระหว่างแหล่งรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิ 260 K และ 300 K ดูดกลืนความร้อนจากรีเซอร์วัวร์ที่มีอุณหภูมิต่ำไป 2000 J จงหาว่าในแต่ละรอบของการทำงาน

(ก) ระบบทำความเย็นจะส่งถ่ายความร้อนให้กับรีเซอร์วัวร์ที่มีอุณหภูมิสูงเท่าไร

(ข) จะมีพลังงานป้อนเข้าไปในระบบทำความเย็นเท่าไร

วิธีทำ (ก) จากสมการ (5.9)

$$Q_1 = Q_2 \times \frac{T_1}{T_2}$$

$$= (2000J)\left(\frac{300K}{260K}\right) = 2307J$$

(ข)

$$W = Q_1 - Q_2$$

$$= (2307 - 2000)J = 307J$$

5.6 สรุปสาระสำคัญ

● กฎข้อที่2ของอุณหพลศาสตร์บ่งบอกถึงทิศทางการเกิดปรากฏการณ์ทางอุณพลศาสตร์ หรือบ่งชี้ว่าปรากฏการณ์ธรรมชาติทางอุณหพลศาสตร์ใดจะเกิดขึ้นได้จริง คำกล่าวของกฎข้อที่ 2 มีได้หลายคำกล่าว ทุกคำกล่าวจะมีความเท่าเทียมกัน

● เครื่องยนต์ความร้อนจะทำงานเป็นวัฏจักรใช้สารทำงานเป็นของไหล หลักการทำงานเป็นไปตามสมการ

$$W = Q_1 - Q_2$$

เมื่อ Q_1 = ความร้อนที่เครื่องยนต์รับเข้ามาจากรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิสูง T_1

W = งานที่เครื่องยนต์ทำได้

Q_2 = ความร้อนที่เครื่องยนต์ถ่ายให้กับรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิต่ำ T_2

● ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อน

$$e = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

● กระบวนการย้อนกลับได้ไม่สามารถจะเกิดขึ้นได้โดยธรรมชาติ หรือถูกสร้างขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

● วัฏจักรคาร์โนต์ เป็นกระบวนวัฏจักรแบบหนึ่ง มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้กระบวนการย้อนกลับได้ ประกอบด้วยกระบวนการ 4 กระบวนการย่อยคือ

(1) สารทำงานรับความร้อนจากรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิสูง T_1 ขยายตัวภายใต้กระบวนการอุณหภูมิคงที่ T_1

(2) สารทำงานหยุดรับความร้อน ขยายตัวต่อภายใต้กระบวนการเอเดียเบติก อุณหภูมิลดลงเป็น T_2

(3) สารทำงานถูกอัดและคายความร้อนให้กับรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิต่ำ T_2

(4) สารทำงานหยุดคายความร้อน ถูกอัดต่อภายใต้กระบวนการเอเดียเบติกจนกลับสู่สภาวะเดิม

● เครื่องยนต์คาร์โนต์ เป็นเครื่องยนต์ความร้อนที่ทำงานตามวัฏจักรคาร์โนต์ เป็นเครื่องยนต์จินตนาการที่ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์จริงทุกชนิด

$$e_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

เมื่อ e_C เป็นประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คาร์โนต์และจะได้ว่า

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}$$

● ปั๊มความร้อน เป็นเครื่องกลที่ใช้ดึงเอาความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำภายนอก (เช่นภายนอกห้อง) ไปปล่อยยังแหล่งอุณหภูมิสูงภายใน (เช่นภายในห้อง) ปั๊มความร้อนทำงานเป็นวัฏจักรทวนกับวัฏจักรของเครื่องยนต์ความร้อนมีหลักการทำงานเป็นไปตามสมการ

$$W = Q_1 - Q_2$$

เมื่อ Q_2 = ความร้อนที่ปั๊มความร้อนรับเข้ามาจากแหล่งอุณหภูมิต่ำ T_1

W = งานที่ทำโดยปั๊มความร้อน (โดยคอมเพรสเซอร์)

Q_1 = ความร้อนที่ปั๊มความร้อนถ่ายให้กับแหล่งอุณหภูมิสูง T_1

● ความสามารถของปั๊มความร้อนบอกด้วยค่าสมรรถนะ COP ของเครื่องปั๊มความร้อน

$$\text{COP (เครื่องปั๊มความร้อน)} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$$

ถ้าปั๊มความร้อนทำงานตามวัฏจักรคาร์โนต์ทวนจะได้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุดที่เป็นไปได้

$$\text{COP}_C \text{ (ปั๊มความร้อน)} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

● เครื่องทำความเย็น เช่น ตู้เย็น เป็นปั๊มความร้อนที่ใช้ประโยชน์เป็นตัวทำความเย็น เครื่องทำความเย็นมีหลักการทำงานเหมือนปั๊มความร้อนทุกประการ แต่จะดูดเอาความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำภายใน (เช่นในตู้เย็น) ไปปล่อยยังแหล่งอุณหภูมิสูงภายนอก (เช่นภายนอกตู้เย็น)

● ความสามารถของเครื่องทำความเย็น บอกด้วยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็น

$$\text{COP (เครื่องทำความเย็น)} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

ถ้าเครื่องทำความเย็นทำงานตามวัฏจักรคาร์โนต์ทวนจะได้สัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุดที่เป็นไปได้

$$\text{COP}_C \text{ (เครื่องทำความเย็น)} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

กิจกรรมการเรียนการสอน

1. บรรยาย
2. สาธิต
3. อภิปรายซักถาม
4. ศึกษาเครื่องยนต์ความร้อนและเครื่องทำความเย็นจากของจริง

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาอุณหพลศาสตร์
2. แผ่นใสรูปภาพและตารางค่าต่างๆ
3. แผ่นใสสรุปสาระสำคัญ
4. เครื่องยนต์ความร้อนและเครื่องทำความเย็น

การประเมินผล

1. ทำแบบฝึกหัด
2. ทดสอบย่อย

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5

5.1 จงแถลงกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์อย่างน้อย 3 คำกล่าว

5.2 ที่กล่าวว่ากฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์บ่งบอกให้ทราบถึงทิศทางของปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นหมายความว่าอย่างไร

5.3 วัฏจักรคาร์โนต์คืออะไร

5.4 จงให้เหตุผลว่า ทำไมเครื่องยนต์ทุกชนิดจะต้องมีประสิทธิภาพต่ำกว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อนตามจินตนาการของคาร์โนต์

5.5 ปั๊มความร้อนที่ใช้เป็นตัวทำความร้อนมีหลักการทำงานต่างกับหลักการทำงานของเครื่องทำความเย็นหรือไม่อย่างไร

5.6 นักประดิษฐ์เครื่องยนต์คนหนึ่งกล่าวว่าเขาสามารถจะออกแบบเครื่องยนต์ที่ทำงานอยู่ระหว่างรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิ 600 K และ 300 K โดยมีประสิทธิภาพ 52 % ได้ จงพิจารณาว่าเขาจะสร้างเครื่องยนต์นี้ได้จริงหรือไม่

5.7 แต่ละรอบของเครื่องยนต์ความร้อน เครื่องยนต์ดูดกลืนความร้อนเข้ามา 375 J และทำงานได้ 25 J ให้หา

(ก) ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

(ข) พลังงานความร้อนที่เครื่องยนต์ปล่อยออกไปใน 1 รอบการทำงาน

5.8 เครื่องยนต์ชนิดหนึ่งมีกำลังงาน 5 kW และมีประสิทธิภาพ 25 % ถ้าเครื่องยนต์ปล่อยความร้อนออกไป 8000 J ในแต่ละรอบการทำงานให้หา

(ก) ความร้อนที่เครื่องยนต์รับเข้ามาในแต่ละรอบ

(ข) เวลาที่ใช้ในการทำงานครบ 1 รอบ

5.9 เครื่องยนต์คาร์โนต์มีกำลัง 150 kW ทำงานอยู่ระหว่างรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิ 20°C และ 500°C

(ก) หาพลังงานความร้อนที่เครื่องยนต์รับเข้ามาต่อชั่วโมง

(ข) หาพลังงานความร้อนที่เครื่องยนต์ปล่อยออกไปต่อชั่วโมง

5.10 เครื่องยนต์คาร์โนต์มีแก๊สอุดมคติเป็นสารทำงานเกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่ 250°C และเกิดจากการอัดตัวที่อุณหภูมิคงที่ 50°C ถ้าระหว่างการขยายตัวแก๊สดูดความร้อนเข้ามา 1200 J ให้หา

(ก) ความร้อนที่ถ่ายเทออกไปในแต่ละรอบ

(ข) งานสุทธิที่ทำในแต่ละรอบ

5.11 เครื่องยนต์ความร้อนทำงานอยู่ระหว่างรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิ 20°C และ 300°C ให้หาประสิทธิภาพสูงสุดที่เป็นไปได้ของเครื่องยนต์

5.12 เครื่องยนต์ความร้อนทำงานตามวัฏจักรคาร์โนต์ระหว่างอุณหภูมิ 80°C และ 350°C ดูดกลืนความร้อนเข้ามา 21000 J/รอบ จากแหล่งรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิสูง และมีรอบการทำงาน 1 s

(ก) กำลังงานสูงสุดของเครื่องยนต์เป็นเท่าใด

(ข) มีพลังงานปล่อยออกมาในแต่ละรอบเป็นเท่าใด

5.13 เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งทำงานอยู่ระหว่างรีเซอร์วัวร์สองแหล่ง แหล่งอุณหภูมิต่ำเป็น 7°C ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เป็น 50 % ถ้าต้องการเพิ่มให้มีประสิทธิภาพเป็น 70 % จะต้องเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งรีเซอร์วัวร์อุณหภูมิสูงเป็นเท่าใด

5.14 ให้หาสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)ของตู้เย็นซึ่งทำงานด้วยประสิทธิภาพแบบเครื่องยนต์คาร์โนต์ระหว่างอุณหภูมิ -3°C กับ 27°C

5.15 จะต้องใช้งานเท่าใดให้กับเครื่องทำความเย็นคาร์โนต์อุดมคติเพื่อดูดความร้อน 1 J จากแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิที่ 4 K แล้วเอาไปปล่อยกับสิ่งแวดล้อมอุณหภูมิ 293 K

หนังสืออ่านประกอบ

ก่องกัญจน์ ภัทรากาญจน์, **ฟิสิกส์ขั้นมหาวิทยาลัย**, พิมพ์ครั้งที่ 3, มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2519.

คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ระดับวิทยาลัย, **ฟิสิกส์ เล่ม 1**, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัทเบญจรักษ์ จำกัด, กทม., 2523.

ชุมนุมวิชาการคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย, **ฟิสิกส์ เล่ม 1**, พิมพ์ครั้งที่ 1, อักษรสัมพันธ์, กทม., 2515.

Sear, F.W., **Thermodynamics, The Kinetic Theory of Gases and Statistical Mechanics**, 2nd ed., Tosho Inatsu Printing CO., Tokyo, Japan, 1972.

Serway, R.A., **Principle of Physics**, Saunders College Publishing, New York, 1994.

Marion, J.B., and Hornyak, W.F., **Principle of Physics**, Saunders College Publishing, New York, 1984.

Zemansky, M.W., **Heat and Thermodynamics**, 5th ed., Mcgraw-Hill Kogakusha, LTD., 1968.