

### วัฏจักรสถานะกำลังและวัฏจักรทำความเย็น

อุปกรณ์หรือระบบชนิดที่นำกำลังออกมา เรียกว่า "เครื่องยนต์" (engines)

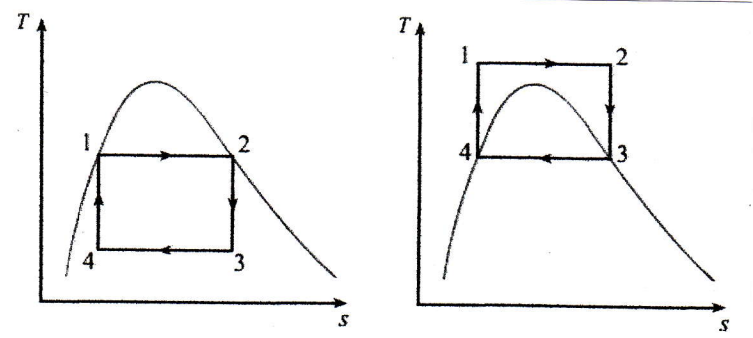
และเรียกวัฏจักรของอุปกรณ์นั้นว่า "วัฏจักรสถานะกำลัง" (power cycle)

วัฏจักรสถานะกำลัง ได้แก่ วัฏจักรของอุปกรณ์ใด ๆ ที่มีสารตัวกลางไหลผ่านกระบวนการหลาย ๆ กระบวนการ และเปลี่ยนสถานะไปตามกระบวนการที่ไหลผ่าน แล้วก็เกิดแหล่งงานหรืองานแก่สิ่งแวดล้อม ส่วนอุปกรณ์ที่ได้รับกำลังงานแล้วมีสารตัวกลางไหลผ่านวัฏจักรแล้วให้ความร้อนออกมา เรียกอุปกรณ์นั้นว่า "ตู้เย็น" (refrigerators) "เครื่องปรับอากาศ" (air conditioners) หรือปั๊มความร้อน (heat pump) โดยเรียกวัฏจักรของอุปกรณ์นั้นว่า "วัฏจักรทำความเย็น" (refrigeration cycle)

### วัฏจักรไอสถานะกำลังคาร์โนต์ (Carnot Vapor Cycle)

เป็นวัฏจักรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเทียบกับวัฏจักรไอสถานะกำลังอื่น ๆ ที่ทำงานในระหว่าง

อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดเดียวกัน



(ก) เกิดขึ้นภายในเส้นอิมตัว (ข) เกิดขึ้นภายนอกเส้นอิมตัว

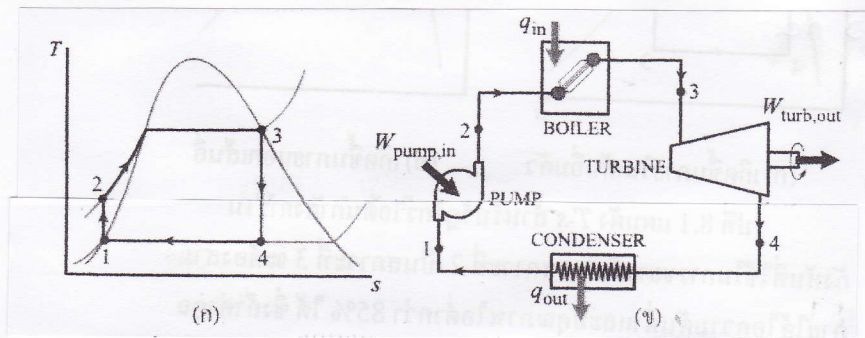
รูปแสดงแผนภาพ T-s ของวัฏจักรคาร์โนต์ของเหลวอิมตัวที่สถานะที่ 1 จ. ถูกทำให้ระเหยกลายเป็นไอ โดยมีอุณหภูมิและความดันคงที่ไปสู่สถานะที่ 2 แล้วมีสถานะเป็นไออิมตัวแล้วเข้าสู่เครื่องยนต์ให้งานออกมาจนกระทั่งถึงสถานะที่ 3 ของผสมคงความหนาแน่นที่อุณหภูมิคง ความดันคงที่ จนถึงสถานะที่ 4 สารตัวกลางที่ควบแน่นและถูกอัดกลับเป็นสถานะที่ 1

วัฏจักรสถานะกำลังคาร์โนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดของกระบวนการข้างต้น มิฉะนั้นเกิดปัญหาข้อ 1. ก่อนหน้าที่ใช้ในงานขยายตัวจากสถานะที่ 2 เป็นสถานะที่ 3 คงสามารถทำงานภายใต้ความดันต่ำ แต่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 85% ได้ ซึ่งถ้าค่าคุณภาพต่ำกว่า 85% แล้วคงมีประสิทธิภาพความชื้นลดลง ทำให้วัฏจักรเกิดประสิทธิภาพน้อยลงได้

2. ในบททดลองสามารถวัดค่าความดันที่ 4 เป็นสภาวะที่ 1 ได้ สามารถวัดค่าที่สภาวะที่ 4 ยึดความดันของผสมอิ่มตัว (ของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว) อยู่ จึงเป็นบททดลองมากที่สุดหาปริมาณที่สามารรถวัด หรือเพิ่มค่าความดันให้แก่สภาวะที่วัดค่าความดันที่สภาวะที่ 1 ของผสมอิ่มตัวได้

### วัฏจักรแรงดันคิน (Rankine Cycle)

เป็นวัฏจักรไอที่เปลี่ยนสถานะที่เปลี่ยนในวัฏจักรไอที่เปลี่ยนค่าความดัน โดยที่กระบวนการในวัฏจักรนี้ และค่าความดันของวัฏจักรนี้ เกิดขึ้นแบบกระบวนการความดันคงที่



แผนภาพ T-s และ แผนผังเครื่องมือของวัฏจักรแรงคิน

วัฏจักรแรงคินอย่างง่าย ประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

กระบวนการ 1 → 2 สภาวะที่วัดค่าความดันที่สภาวะที่ 1 ของเหลวอิ่มตัวที่ความดันต่ำ ผ่านเข้าสู่ปั๊มแล้ว ถูกอัดให้มีความดันสูงขึ้นแบบกระบวนการไอเซนโทรปิก (ไม่ถ่ายเทความร้อนแบบคินสภาวะ) เป็นของเหลวอิ่มตัว

กระบวนการ 2 → 3 ของเหลวอิ่มตัวที่ความดันสูง ผ่านเข้าสู่หม้อน้ำแล้วรับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง แบบกระบวนการความดันคงที่

กระบวนการ 3 → 4 สภาวะที่วัดค่าความดันที่สภาวะที่ 3 อิ่มตัว หรือ ไอที่ความดันสูง ขยายตัวในกังหันแบบกระบวนการไอเซนโทรปิก กลายเป็นของผสมอิ่มตัว

กระบวนการ 4 → 1 สภาวะที่วัดค่าความดันที่ออกจากกังหันผ่านเข้าสู่เครื่องควบแน่น เกิดกระบวนการคายความร้อนแบบความดันคงที่

# หาปริมาณพลังงานของมวลไหล (Flow energy)

$$W_f = FL = PAL = PV$$

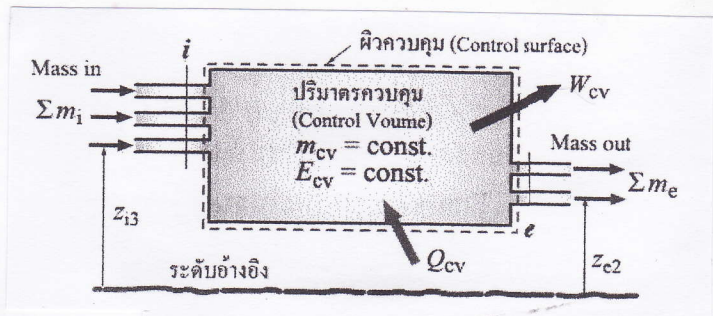
ดังนั้น พลังงานของตัวมวลไหล คือ

$$E_{flow} = U + PV + KE + PE$$

หรือ  $E_{flow} = m \left( h + \frac{V^2}{2} + gZ \right)$

ถ้าพิจารณาขงที่มีมวลไหลเข้าทางเดียวแล้ว ออกทางเดียว

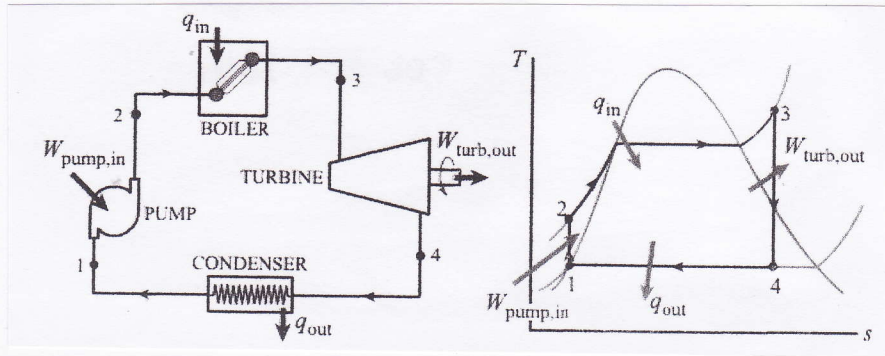
$$q_{cv} + \left( h + \frac{V^2}{2} + gZ \right)_i = w_{cv} + \left( h + \frac{V^2}{2} + gZ \right)_e$$



สมมติฐานของกระบวนการไหลคงที่และสภาวะคงที่

เมื่อ  $q$  = ปริมาณ ความร้อน ที่ถ่ายเท ต่อมวลของมวลไหล

$w$  = ปริมาณ งาน ต่อมวลของมวลไหล



จากสมการของกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์ที่แล.สภาวะคงที่

$$q_{cv} + \left( h + \frac{V^2}{2} + gZ \right) = w_{cv} + \left( h + \frac{V^2}{2} + gZ \right)$$

กรณีควบคุมมวล 1 - 2 :

ถ้าจะสนใจที่ปั๊มเท่านั้น ปริมาณความร้อนที่เข้าและออกจะเป็นศูนย์  
 ไอเซนโทรปิก นั่นคือ  $q_{1,2} = 0$

ดังนั้น  $w_{p,in} = h_2 - h_1$

แต่เนื่องจากน้ำที่สภาวะใด ๆ เป็นของเหลวไม่อัดตัว จึงเป็นของไหลอัด  
 ไหล (incompressible fluid) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่กรณีควบคุม  
 นี้มีค่าคงที่เสมอ. ปริมาตรที่เข้ามีค่าคงที่ ( $v_1 = v_2$ )

$$w_{p,in} = v_1 (p_2 - p_1)$$

กรณีวงจร 2-3 :

พิจารณาสถาณน้ำ เป็น ปริมาตรควบคุม และ ฐานที่วางวางได้รับ ความร้อน แบบ ความร้อนคงที่ เนื่องจาก  $W_{23} = 0$  คือ

$$q_{23} = q_{in} = h_3 - h_2$$

กรณีวงจร 3-4 :

พิจารณาสถาณน้ำ เป็น ปริมาตรควบคุม ซึ่ง มี การขยายตัว ของ ไอ น้ำ เป็น แบบ ไอ เซอร์เวทีคัล ดังนั้น  $q_{34} = 0$  และ  $W_{34} = h_3 - h_4 = W_t$

กรณีวงจร 4-1 :

พิจารณาสถาณเครื่องควบแน่น เป็น ปริมาตรควบคุม ซึ่ง มี การคาย ความร้อน แบบ ความร้อนคงที่  $W_{41} = 0$  คือ  $q_{41} = q_{out} = h_4 - h_1$

ดังนั้น งานสุทธิของวัฏจักรนี้คือ

$$W_{net} = W_t - W_p = q_{in} - q_{out}$$

หรือ

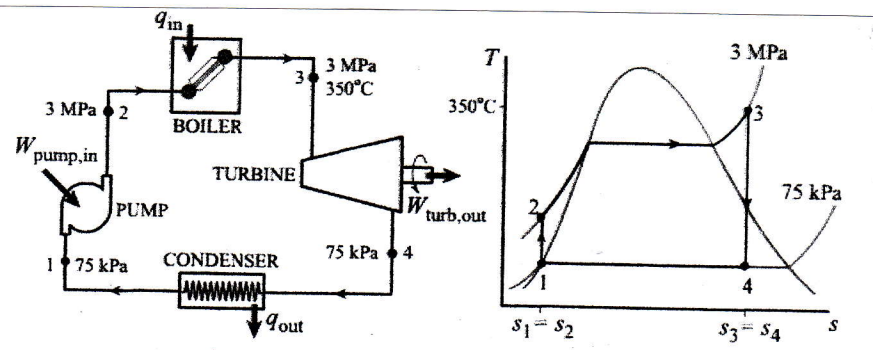
$$W_{net} = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency) ของวัฏจักรแบบนี้คือ

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

ตัวอย่าง Consider a steam power plant operating on the simple ideal Rankine cycle. The steam enters the turbine at 3 MPa and 350°C and is condensed in the condenser at a pressure of 75 kPa. Determine the thermal efficiency of this cycle.



วิธีทำ 1. ในทางวิศวกรรมนี้สมมุติว่า มีจลนศาสตร์และแผนภาพ T-s เพื่อหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ตามจุดที่ A-4, A-5 และ A-6

สมการที่ 1 :  $P_1 = 75 \text{ kPa}$  และเงื่อนไขของเหลวอิ่มตัว ด้อยัน

$$h_1 = h_{f@75 \text{ kPa}} = \text{kJ/kg}$$

และ  $v_1 = v_{f@75 \text{ kPa}} = \text{m}^3/\text{kg}$

สมการที่ 2 :  $P_2 = 3 \text{ MPa}$  และ คำนวณเอนโทรปี 1-2  $\Rightarrow s_2 = s_1$

$$w_p = v_1 (P_2 - P_1)$$

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

และ:  $h_2 = h_1 + w_p$

$$h_2 = \text{kJ/kg}$$

สถานะที่ 3 :  $p_3 = 3 \text{ MPa}$  หรือ  $T_3 = 350^\circ \text{C}$  ตัวหนา  
 $h_3 =$  kJ/kg  
 $s_3 =$  kJ/kg.K

สถานะที่ 4 :  $p_4 = 75 \text{ kPa}$  หรือ  $s_4 = s_3 =$  kJ/kg.K  
 หรือ  $s_f < s_4 < s_g$  ที่  $75 \text{ kPa}$  แสดงว่า เป็นของผสมอิ่มตัว

หรือ ↗

$$y_f \leq y_{\text{av}} \leq y_g$$

เมื่อ  $y$  แทนคุณสมบัติใด, เช่น  $v, u, h$

จาก  $s_4 = s_f + x_4 s_{fg}$

หรือ  $h_4 = h_f + x_4 h_{fg}$

∴ หาอุณหภูมิ 2-3 ได้

$$q_{23} = q_{\text{in}} = h_3 - h_2$$

∴ หาอุณหภูมิ 4-1 ได้

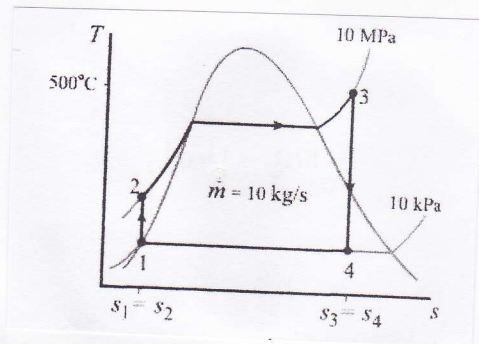
$$q_{41} = q_{\text{out}} = h_4 - h_1$$

จาก

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

แบบฝึกหัด วัฏจักรแบบคาร์โนต์อย่างง่าย ไอเดียไหลเข้าสู่ห้องที่มีความดัน 10 MPa อุณหภูมิ 500 °C และออกจากห้องที่มีความดัน 10 kPa จงคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักร





9

แบบฝึกหัด Determine the thermal efficiency of a Rankine cycle using steam as the working fluid in which the condenser pressure is 10 kPa. The boiler pressure is 2 MPa. The steam leaves the boiler as saturated vapor.