

# Thermodynamics I

Assoc.Prof.Sommai Priprem, Ph.D.

## Chapter 9 : Some Power and Refrigeration Cycles



## บทที่ 9

### วัฏจักรต้นกำลังและวัฏจักรทำความเย็น (Some Power and Refrigeration Cycles)

เครื่องต้นกำลัง เช่น เครื่องจักรไอน้ำซึ่งเคยกล่าวถึงในบทก่อนหน้านี้ทำงานเป็นวัฏจักร กล่าวคือของไหลทำงานดำเนินไปตามกระบวนการต่าง ๆ และในที่สุดก็กลับมาสู่สถานะแรก เริ่ม เครื่องต้นกำลังบางพวกเช่น เครื่องยนต์สันดาปภายในของไหลไม่ได้ทำงานดำเนินไปครบวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ แม้ว่าตัวเครื่องยนต์เองจะดำเนินไปครบวัฏจักรทางกล ในกรณีนี้สถานะสุดท้ายของของไหลมีส่วนประกอบต่างไปจากสถานะเริ่มแรก เครื่องจักรเหล่านี้บางครั้งเรียกว่ามันทำงานเป็น วัฏจักรเปิด (open cycle) โดยที่เครื่องจักรไอน้ำทำงานเป็นวัฏจักรปิด (close cycle) ในการวิเคราะห์เบื้องต้นเราใช้วัฏจักรในจินตนาการ เพื่อจะดูถึงตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะ ตัวอย่างเช่น เครื่องยนต์แก๊สโซลีนเราวิเคราะห์ด้วย วัฏจักรออตโต ซึ่งได้ผลสรุปอย่างหนึ่งคือ การเพิ่มอัตราส่วนการอัดทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นความจริงสำหรับเครื่องยนต์จริงด้วย ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของวัฏจักรออตโต จะแตกต่างจากวัฏจักรจริงอย่างมากก็ตาม

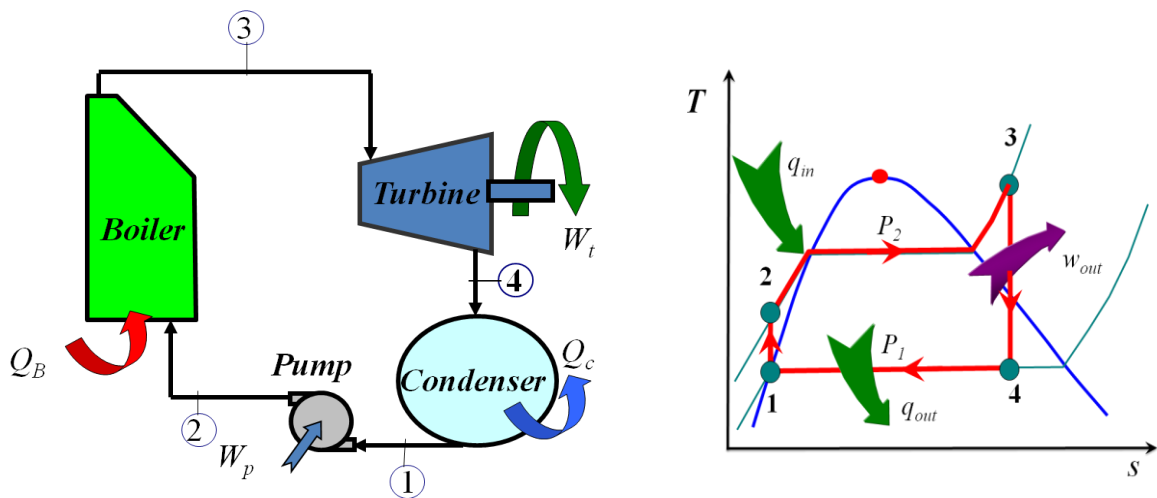
ในบทนี้จะกล่าวถึงวัฏจักรในจินตนาการ ทั้งวัฏจักรต้นกำลังและวัฏจักรทำความเย็นซึ่งจะแบ่งเป็น วัฏจักรไอน้ำต้นกำลัง , วัฏจักรไอทำความเย็น , วัฏจักรต้นกำลังมาตรฐานอากาศ และวัฏจักรทำความเย็นมาตรฐานอากาศ

#### 9.1 วัฏจักรไอน้ำต้นกำลัง (Vapor Power Cycle)

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวัฏจักรไอน้ำ ซึ่งวัฏจักรอย่างง่ายของมันคือวัฏจักรแรงคิน (Rankine Cycle) ซึ่งแสดงในรูป 9.1 กระบวนการต่าง ๆ ประกอบด้วย

- กระบวนการ 1  $\longrightarrow$  2 เป็นการอัดอย่างไม่ส่งถ่ายความร้อนกับสภาพในปั๊ม
- กระบวนการ 2  $\longrightarrow$  3 เป็นการส่งถ่ายความร้อนโดยความดันคงที่ในหม้อน้ำ
- กระบวนการ 3  $\longrightarrow$  4 เป็นการขยายตัวอย่างไม่ส่งถ่ายความร้อนกับสภาพในกังหัน  
(หรือ เครื่องจักรแบบอื่น เช่น เครื่องยนต์ไอน้ำ)
- กระบวนการ 4  $\longrightarrow$  1 เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยความดันคงที่ในเครื่องควบแน่น

วัฏจักรแรงคินอาจใช้ไอน้ำ ก็ได้ดังวัฏจักร 1-2-3'-4'-1



รูปที่ 9.1 เครื่องต้นกำลังไอน้ำอย่างง่ายทำงานตามวัฏจักรแรงคิน

ถ้าไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ในขบวนการต่าง ๆ งานและความร้อนสามารถแสดงได้ด้วยแผนภาพ  $T-s$  ความร้อนที่ถ่ายเทให้ของไหลในหม้อน้ำแทนได้ด้วยพื้นที่  $a-2-2'-3-b-a$  ความร้อนที่ถ่ายเทในเครื่องควบแน่น

พื้นที่  $a-1-4-b-a$  จากกฎข้อที่หนึ่งเราสรุปได้ว่า งานสุทธิคือผลต่างของพื้นที่ทั้งสองนี้คือ  $1-2-2'-3-4-1$  ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนเขียนได้ว่า

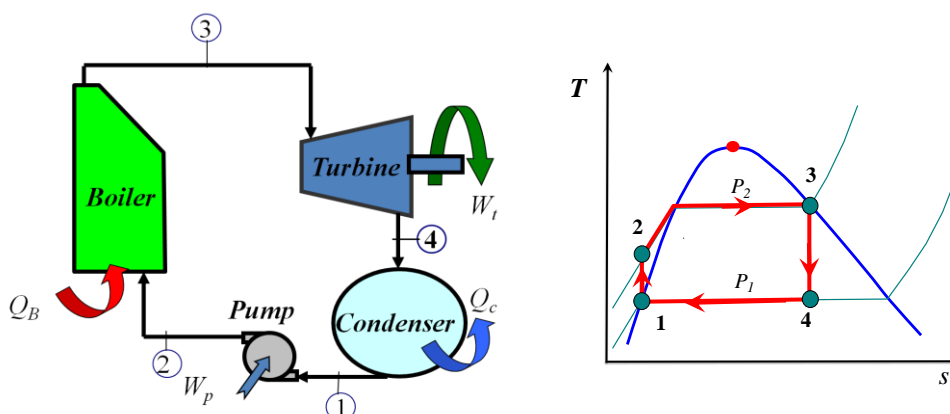
$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{\text{พื้นที่ } 1-2-2'-3-4-1}{\text{พื้นที่ } a-2-2'-3-b-a} \quad (9.1)$$

ในการวิเคราะห์วัฏจักรแรงคิน ถ้าพิจารณาถึงประสิทธิภาพและอุณหภูมิเฉลี่ยแล้วจะช่วยให้มากที่สุด การเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยในการให้ความร้อน และลดอุณหภูมิเฉลี่ยในการคายความร้อนจะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ในการวิเคราะห์วัฏจักรในจินตนาการบนี้ จะไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ เพราะแม้ในวัฏจักรจริงก็มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

จากการเปรียบเทียบ จะเห็นว่าวัฏจักรแรงคินมีประสิทธิภาพน้อยกว่าวัฏจักรคาร์โน เมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดเท่ากัน เพราะอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่าง 2 กับ 2' น้อยกว่าอุณหภูมิระหว่างการเดือด แต่ทำไมจึงเลือกเอาวัฏจักรแรงคินเป็นวัฏจักรในจินตนาการ ทำไมไม่เลือกวัฏจักรคาร์โน  $1'-2'-3-4-1'$  ทั้งนี้มีเหตุผลอย่างน้อยสองประการคือ ประการแรกคือการปั๊มที่สภาวะ  $1'$  เป็นของผสมระหว่างของเหลวกับไอ เป็นเรื่องยากและซับซ้อนที่จะสร้างปั๊มให้ปั๊มส่วนผสมนี้แล้วให้เป็นของเหลวอิมิตที่  $2'$  ในทางปฏิบัติแล้วจะง่ายกว่ามากถ้าควบแน่นไอให้เป็นของเหลวทั้งหมดเสียก่อน

แล้วจึงปั๊ม เหตุผลประการที่สองคือการทำให้เป็นไอคงโดยความดันคงที่ใน กระบวนการ 3-3' ในวัฏจักรคาร์โนการส่งผ่านความร้อนทั้งหมดนั้น อุณหภูมิต้องคงที่ นั่นคือการทำให้เป็นไอดีด้วย กระบวนการ 3-3" ซึ่งต้องลดความดันลงนั้นหมายความว่าในระหว่างการให้ความร้อนไอดีต้องผ่านการขยายตัวด้วยและจะได้งานมาด้วยการทำแบบนี้ไม่เป็นที่ยอมรับในทางปฏิบัติเพราะยากมากทีเดียว ดังนั้นวัฏจักรแรงคินจึงใกล้เคียงกับทางปฏิบัติมากกว่า ในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงการปรับปรุงวัฏจักรแรงคินให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ วัฏจักรคาร์โน แต่ก่อนนั้นดูตัวอย่างของวัฏจักรแรงคินเสียก่อน

**ตัวอย่าง 9.1** จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคิน ซึ่งใช้ไอน้ำเป็นของเหลวทำงานโดยความดันในเครื่องควบแน่นเป็น 10 kPa และความดันในหม้อน้ำเป็น 2 MPa ไอน้ำที่ออกจากหม้อน้ำเป็นไอน้ำอิ่มตัว



**สมมติฐาน** เป็นวัฏจักรอุดมคติ (Ideal Cycle)

กระบวนการที่เกิดขึ้นเป็น steady-state, steady-flow process (SSSF)

ไม่คิดการเปลี่ยนแปลง พลังงานจลน์และพลังงานศักย์

**วิธีทำ** ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับวัฏจักรแรงคิน จะ ใช้แผนภาพการทำงานของวัฏจักรและแผนภาพ T-s โดยกำหนดข้อสภาวะตามที่แสดงในภาพข้างบน แล กำหนดให้

$w_p$  คืองานที่ใช้ในการขับเคลื่อนต่อกิโกรัมของ ไอน้ำ

$w_t$  คืองานที่กังหันผลิตได้ต่อกิโกรัมของ ไอน้ำ

$q_H$  เป็นความร้อนที่ส่งถ่ายในหม้อน้ำต่อกิโกรัมของ ไอน้ำ

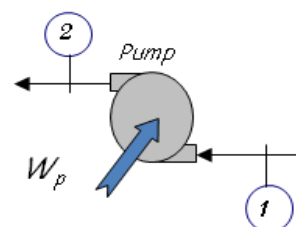
$q_L$  เป็นความร้อนที่ถ่ายเทออกจาก เครื่องควบแน่น ต่อกิโกรัมของ ไอน้ำ

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักร  $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{q_H - q_L}{q_H} = \frac{w_t - w_p}{q_H}$

หา  $w_p$  : กำหนดปริมาตรควบคุมรอบปั๊ม

กฎข้อที่ 1  $q + h_1 = w + h_2$

งานที่ใช้ในการขับเคลื่อน  $w_p = -w = h_2 - h_1$



จาก  $Tds = dh - vdP$  และ เนื่องจากเป็น isentropic process ( $s_2 = s_1$ )

และน้ำเป็นของไหลไม่ยวบตัว (incompressible Fluid):  $v = \text{constant}$

$$\text{ดังนั้น} \quad h_2 - h_1 = \int_1^2 v dP = v \int_1^2 dP = v(P_2 - P_1)$$

$$w_p = v(P_2 - P_1) = 0.00101 \text{ kg/m}^3 (2000 - 10) \text{ kPa} = 2.0 \text{ kJ/kg}$$

สถานะที่ 1 เป็นของเหลวอิ่มตัวที่ 10 kPa จากตาราง A.4  $h_f = 191.8 \text{ kJ/kg}$

$$\text{และ } h_2 = h_1 + w_p = 191.8 \text{ kJ/kg} + 2.0 \text{ kJ/kg} = 193.8 \text{ kJ/kg}$$

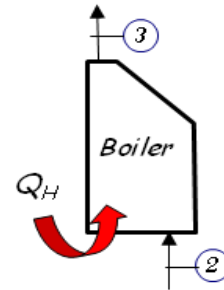
หา  $q_H$  : กำหนดปริมาณความร้อนรอบหม้อน้ำ

$$\text{กฎข้อที่ 1} \quad q + h_2 = w + h_3$$

$w = 0$  และสถานะที่ 3 เป็น ไออิ่มตัว ที่ 2.0 MPa

จากตาราง A.4  $h_g = 2,799.5 \text{ kJ/kg}$  แทนค่า

$$q_H = q = h_3 - h_2 = (2,799.5 - 193.8) \text{ kJ/kg} = 2,605.7 \text{ kJ/kg}$$



หา  $w_t$  : กำหนดปริมาณความร้อนรอบกังหัน

$$\text{กฎข้อที่ 1} \quad q + h_3 = w + h_4$$

$$w_t = w = h_3 - h_4$$

3-4 เป็น isentropic process:  $s_3 = s_4$

เราจะหา  $h_4$  ได้โดยต้องหาค่า  $x$  ก่อนเนื่องจากสถานะที่ 4 เป็นของผสม ดังนี้

$$s_4 = s_f + x_4 s_{fg}$$

$$x_4 = (s_4 - s_f) / s_{fg}$$

และสถานะที่ 3 เป็น ไออิ่มตัวที่ 2.0 MPa จากตาราง A.4  $s_3 = 6.3409 \text{ kJ/kgK}$

และสถานะที่ 4 เป็นของผสมไออิ่มตัวที่ 10 kPa จากตาราง A.4

$$h_f = \text{kJ/kg}, h_{gf} = \text{kJ/kg}$$

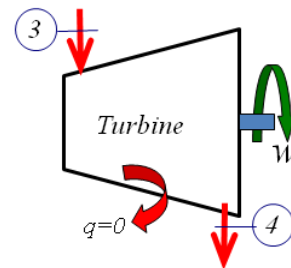
$$s_f = \text{kJ/kgK}, s_{gf} = \text{kJ/kgK}$$

$$s_3 = 8.1502 - (1 - x_4) 7.5009$$

$$(1 - x_4) = 0.2412$$

$$h_4 = 2585.7 - 0.2412 (2392.8) = 2007.5$$

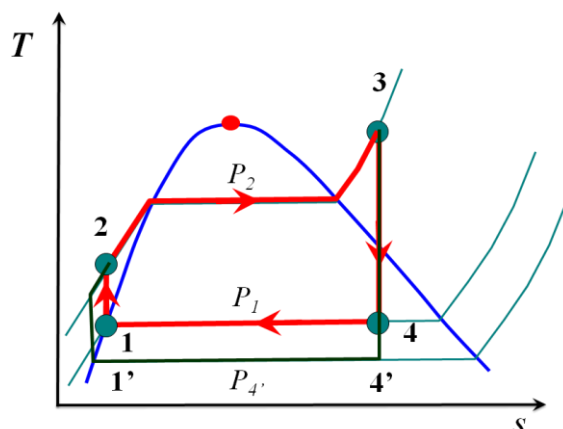
$$w_t = 2799.5 - 2007.5 = 792.0 \text{ kJ/kg}$$



$$\text{ดังนั้น} \quad \eta_{th} = \frac{w_t - w_p}{q_H} = \frac{792.0 - 2.0}{2605.7} = 30.3\%$$

## 9.2 ผลของความดันและอุณหภูมิต่อวัฏจักรแรงคิน

(Effect of Pressure and Temperature on the Rankine Cycle)

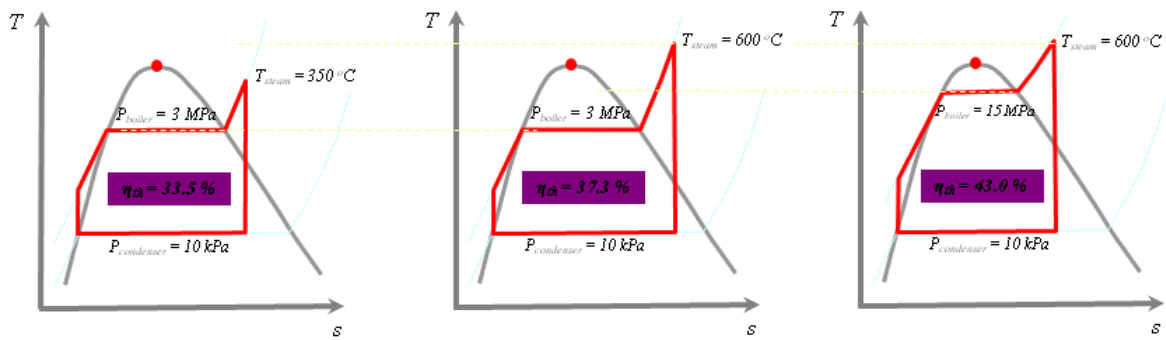


รูปที่ 9.2 ผลของความดันขาออกต่อวัฏจักรแรงคิน

พิจารณาผลของความดันและอุณหภูมิขาออกจากกังหันรูป 9.2 ถ้าความดันลดลงจาก  $P_4$  ไปเป็น  $P'_4$  ก็จะทำให้อุณหภูมิในการคายความร้อนลดลงไปด้วย งานสุทธิจะเพิ่มเท่ากับพื้นที่

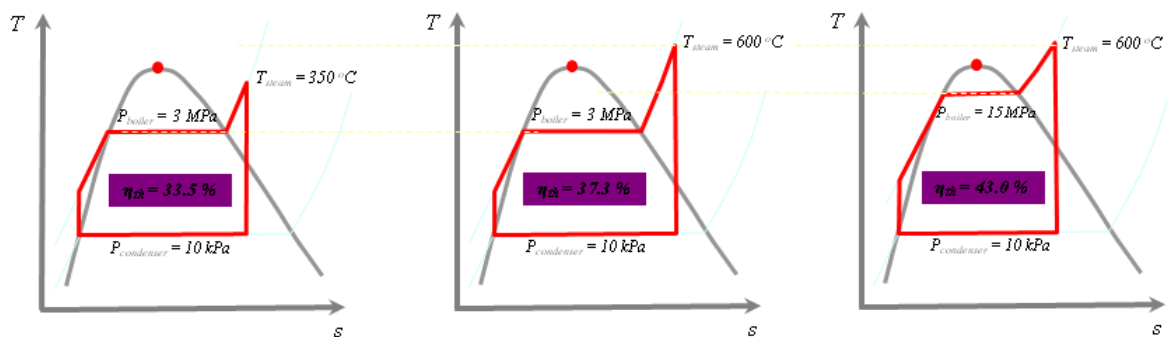
$1-4-4'-1'-2'-2-1$  ในขณะที่ความร้อนที่ต้องให้แก่อไ้เพิ่มขึ้นเท่ากับพื้นที่  $a'-2'-2-a-a'$  เนื่องจากพื้นที่ทั้งสองนี้เท่าๆกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งจากอุณหภูมิเฉลี่ยในการคายความร้อนลดลง อย่างไรก็ตามการลดความดันนี้ลง ถ้าทำให้ปริมาณความชื้นในไอขาออกจากกังหันมากถึง 10 % ไม่เพียงแต่จะทำให้ประสิทธิภาพของกังหันลดลงเท่านั้น ยังทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ใบกังหันอีกด้วย

การพิจารณาต่อไปคือการทำให้ไ้เป็นไอลงในหม้อน้ำดังแสดงในรูป 9.3 งานสุทธิจะเพิ่มขึ้นเท่ากับพื้นที่  $3-3'-4-4-3$  และความร้อนที่ให้ในหม้อน้ำที่เพิ่มขึ้นเท่ากับพื้นที่  $3-3'-b'-b-3$  เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ทั้งสองนี้มากกว่าอัตราส่วนของงานสุทธิ และความร้อนที่ให้ในส่วนที่เหลือของวัฏจักร จึงทำให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินเพิ่มขึ้น และนี่ก็พ้องกับความจริงที่ว่า การเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยในการให้ความร้อนจะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ผลอีกนัยหนึ่งคือจะทำให้ความชื้นของไอที่ขาออกของกังหันลดลงอีกด้วย



รูปที่ 9.3 ผลของการทำให้เป็นไอดงต่อประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคิน

ท้ายสุดจะพิจารณาความดันสูงสุดในวัฏจักร ดังรูป 9.4 ในการวิเคราะห์ผลอันนี้จะกำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดและความดันต่ำสุดคงที่ ในการนี้จะเห็นว่า ความร้อนที่ต้องคายทิ้งเท่ากับพื้นที่  $b'-4'-4-b-b$  งานสุทธิเพิ่มขึ้นเท่ากับพื้นที่  $3-3'-4-4-3$  และลดลงเท่ากับพื้นที่  $3-3'-b'-b-3$  ซึ่งเท่า ๆ กันนั่นคืองานสุทธิเท่าเดิม แต่ความร้อนที่ต้องคายทิ้งน้อยลง แสดงว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ดังนั้นสรุปได้ว่าการเพิ่มความดันสูงสุดจะทำให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีนี้อุณหภูมิเฉลี่ยในการให้ความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ความชื้นขาออกจากกังหันจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9.4 ผลของความดันในหม้อน้ำต่อวัฏจักรแรงคิน

โดยสรุปแล้ว เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินได้โดยการลดความดันขาออก จากกังหัน เพิ่มความดันสูงสุด และการทำให้เป็นไอดง คุณภาพของไอขาออกจากกังหันจะเพิ่มขึ้นได้ โดยการทำให้เป็นไอดงก่อนผ่านกังหัน และจะลดลงถ้าลดความดันขาออก หรือเพิ่มความดันสูงสุด

**ตัวอย่างที่ 9.2** ในวัฏจักรแรงดันไอน้ำออกจากหม้อน้ำและเข้าสู่กังหันที่ 4 MPa, 400 °C ความดันในเครื่องควบแน่นเป็น 10 kPa จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักร

**วิธีทำ** จาก

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H}$$

หา  $w_p$  : กำหนดปริมาตรควบแน่นรอบปั๊ม

กฎข้อที่ 1  $-w_p = h_2 - h_1$

กฎข้อที่ 2  $s_2 = s_1$

เนื่องจาก  $s_2 = s_1 ; h_2 - h_1 \int_1^2 v dP = v(P_2 - P_1)$

ดังนั้น  $-w_p = v(P_2 - P_1) = 0.00101(4000 - 10) = 4.0 \text{ kJ/kg}$

$$h_1 = 191.8$$

$$h_2 = 191.8 + 4.0 = 195.8 \text{ kJ/kg}$$

หา  $w_t$  : กำหนดปริมาตรควบแน่นรอบกังหัน

กฎข้อที่ 1  $w_t = h_3 - h_4$

กฎข้อที่ 2  $s_3 = s_4$

$$h_3 = 3218.6 ; s_3 = 6.7690$$

$$s_3 = s_4 = 6.7690 = 8.1502 - (1 - x_2) 7.5009$$

$$(1 - x_2) = 0.1841$$

$$h_4 = 2584.7 - 0.1841(2392.8) = 2144.1$$

$$w_t = h_3 - h_4 = 3213.6 - 2144.1 = 1069.5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{net} = w_t - w_p = 1069.5 - 4.0 = 1065.5 \text{ kJ/kg}$$

หา  $q_H$  : กำหนดปริมาตรควบแน่นรอบหม้อน้ำ

$$q_H = h_3 - h_2 = 3213.6 - 195.8 = 3017.8 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H} = \frac{1065.5}{3017.8} = 35.3\%$$

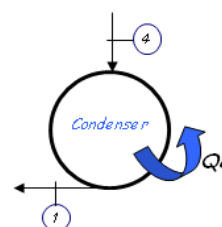
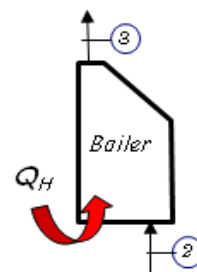
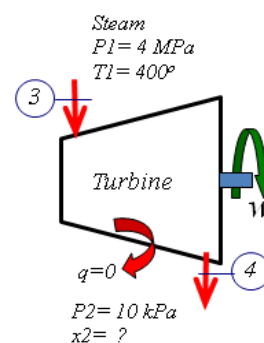
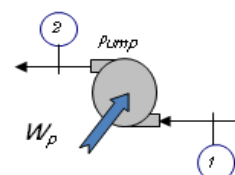
หรืองานสุทธิอาจหาได้จาก

$$w_{net} = q_H - q_L$$

กำหนดปริมาตรควบแน่นเครื่องควบแน่น

กฎข้อที่ 1 ;  $q_L = h_4 - h_1 = 2144.1 - 191.8 = 1952.3 \text{ kJ/kg}$

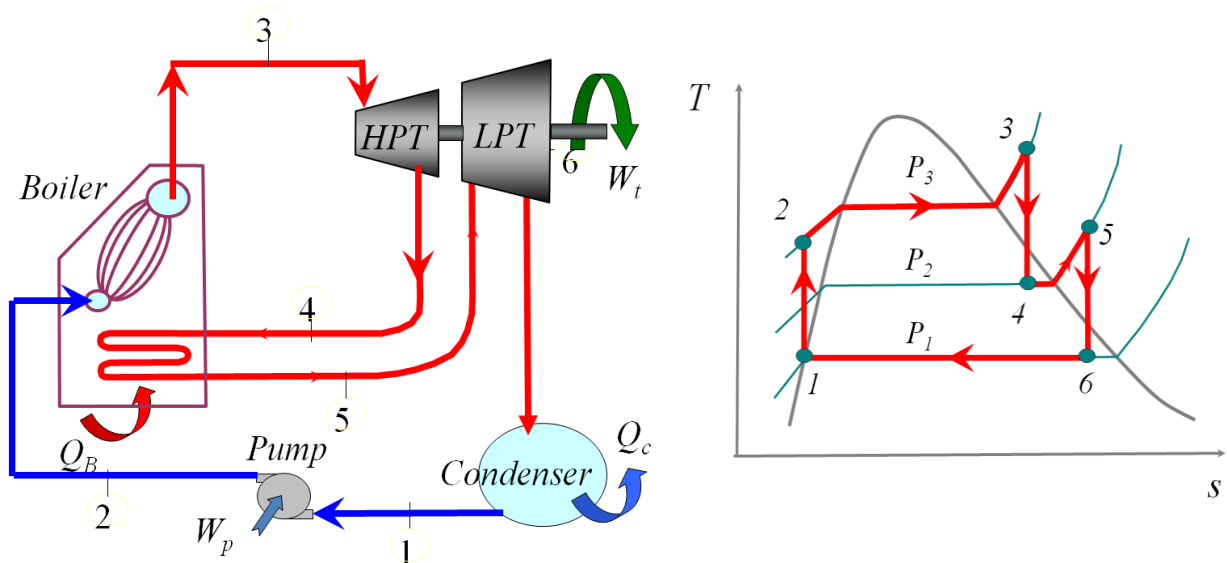
ดังนั้น  $w_{net} = q_H - q_L = 3017.8 - 1952.3 = 1065.5 \text{ kJ/kg}$





### 9.3 วัฏจักรรีฮีท (The Reheat Cycle)

ในหัวข้อที่แล้วมีข้อสรุปประการหนึ่งคือ เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินได้ โดยการเพิ่มความดันในช่วงการให้ความร้อน แต่วิธีนี้จะทำให้ความชื้นในด้านความดันต่ำของกังหันเพิ่มมากขึ้นด้วย วัฏจักรรีฮีทได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยใช้ความดันสูง สามารถหลีกเลี่ยงไม่ให้อิทธิพลด้านความดันต่ำของกังหันมีความชื้นมากเกินไป ดังแสดงในรูป 9.5



รูปที่ 9.5 วัฏจักรรีฮีท

หลักการของมันก็คือ ให้น้ำขยายตัวในกังหันถึงความดันปานกลาง แล้วนำไอนี้ไปให้ความร้อนในหม้อน้ำอีกที จากนั้นจึงให้ขยายตัวในกังหันต่อไปจนถึงความดันขาออก จากแผนภาพ T-s จะเห็นว่าช่วงที่นำไอนี้ไปให้ความร้อนอีกครั้งนั้นเราจะได้ประสิทธิภาพเพิ่มมาน้อยมาก เพราะว่าอุณหภูมิเฉลี่ยในการให้ความร้อนไม่ได้เพิ่มขึ้นเลย แต่ประโยชน์ที่สำคัญของมันคือสามารถลดความชื้นในด้านความดันต่ำของกังหันได้ถึงขีดที่ปลอดภัย เป็นที่น่าสังเกตว่าถ้าโลหะที่ใช้สามารถทนอุณหภูมิที่ 3' ได้ วัฏจักรแรงคินธรรมดาจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าวัฏจักรรีฮีท

**ตัวอย่าง 9.3** ในวัฏจักรรีฮีทซึ่งใช้น้ำ ไอน้ำที่ออกจากหม้อน้ำและเข้าสู่กังหันที่ 4 MPa, 400 °C หลังจากขยายตัวในกังหันถึง 400 kPa ไอน้ำถูกนำไปให้ความร้อนจนอุณหภูมิเป็น 400 °C แล้วจึงขยายตัวในกังหันความดันต่ำไปถึง 10 kPa จงหาประสิทธิภาพของวัฏจักร

**วิธีทำ** กำหนดสภาวะต่าง ๆ เหมือนรูปที่ 9.5

กฎข้อที่ 1 ;  $W_t = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$

กฎข้อที่ 2  $s_4 = s_3$

$$s_6 = s_5$$

$$h_3 = 3213.6 ; s_3 = 6.7690 - (1 - x_4) 5.1193$$

$$(1 - x_4) = 0.0248$$

$$h_4 = 2738.6 - 0.0248 (2133.8) = 2685.7$$

$$h_5 = 3273.4 ; s_5 = 7.8985$$

$$s_6 = s_5 = 7.8985 = 8.1502 - (1 - x_6) 7.5009$$

$$(1 - x_6) = 0.0336$$

$$h_6 = 2584.7 - 0.0336 (2392.8) = 2504.4$$

$$W_t = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

$$= (3213.6 - 2685.7) + (3273.4 - 2504.4)$$

$$= 1296.9 \text{ kJ/kg}$$

กำหนดปริมาตรควบคุมรอบปั๊ม

กฎข้อที่ 1 :  $W_p = h_2 - h_1$

กฎข้อที่ 2 :  $s_2 = s_1$

เนื่องจาก  $s_2 = s_1 ; h_2 - h_1 \int_1^2 v dP = v(P_2 - P_1)$

ดังนั้น  $W_p = v (P_2 - P_1) = 0.00101 (4000 - 10) = 4.0 \text{ kJ/kg}$

$$h_2 = 191.8 + 4.0 = 195.8 \text{ kJ/kg}$$

กำหนดปริมาตรควบคุมรอบหม้อน้ำ

$$q_H = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

$$= (3213.6 - 195.8) + (3273.4 - 2685.7) = 3605.5 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{net}} = w_t - w_p = 1296.9 - 4.0 = 1292.9 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{q_H} = \frac{1292.9}{3605.5} = 35.9\%$$

จะเห็นได้ว่าเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ 9.2 แล้วประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นน้อยมากแต่ปริมาณความชื้นของไอที่ออกจากกังหันลดลงจาก 18.4 % เป็น 3.4 %

#### 9.4 ความเบี่ยงเบนของวัฏจักรจริงจากวัฏจักรในจินตนาการ

##### (Deviation of Actual Cycle from Ideal Cycle)

มีสาเหตุใหญ่ ๆ ดังนี้คือ

**ก. การสูญเสียในท่อ** การลดของความดันเนื่องจากความเสียดทาน และการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเป็นสาเหตุใหญ่ ถ้าหากมีเฉพาะผลของความเสียดทาน จะแทนสถานะของไอน้ำขาออกจากหม้อน้ำและก่อนเข้ากังหันตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการนี้เอนโทรปีจะเพิ่ม ความร้อนที่ถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมที่ความดันคงที่ และผลอันนี้ทำให้เอนโทรปีลดลง ผลรวมของทั้งสองนี้ทำให้อะเวียลาบิลิตี (availability) ของไอน้ำก่อนเข้ากังหันลดลง การสูญเสียในหม้อน้ำก็คล้ายกัน ดังนั้นการปั๊มน้ำเข้าต้องให้ความดันสูงกว่าความดันขาออกที่ต้องการ

**ข. การสูญเสียในกังหัน** เนื่องมาจากการไหลของของไหลทำงานและการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม สถานะหลังจากขบวนการไอเซนโทรปิก และสถานะจริงที่ออกจากกังหัน ประสิทธิภาพของกังหันได้นิยามไว้ในบทที่ 8 แล้ว คือ

$$\eta_t = \frac{w_t}{h_3 - h_{4s}} \quad (9.2)$$

**ค. การสูญเสียในปั๊ม** ลักษณะคล้ายกับการสูญเสียในกังหัน และจากนิยามประสิทธิภาพของปั๊มคือ

$$\eta_p = \frac{h_{2s} - h_1}{w_p} \quad (9.3)$$

**ง. การสูญเสียในเครื่องควบแน่น** มีน้อยแต่ที่สำคัญคือการหล่อเย็นมากเกินไปทำให้ของไหลขาออกเป็นของเหลวไม่อิ่มตัว ซึ่งทำให้ต้องให้ความร้อนในหม้อน้ำมากขึ้น

**ตัวอย่างที่ 9.4** โรงจักรไอน้ำดังรูป มีประสิทธิภาพของกังหันเป็น 86 % และประสิทธิภาพของปั๊ม 80 % จงหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรนี้

**วิธีทำ** จากตารางไอน้ำ

$$h_1 = 175.9, h_3 = 171.8$$

$$h_4 = 3231.6, s_4 = 6.7690$$

$$h_5 = 3169.1, s_5 = 6.7235$$

กำหนดปริมาตรควมรอบกัณฑ์

$$\text{กฎข้อที่ 1 : } W_t = P_5 - P_6$$

$$\text{กฎข้อที่ 2 : } s_{6s} = s_5$$

$$\eta_t = \frac{w_t}{h_5 - h_{6s}} = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6s}}$$

$$s_{6s} = s_5 = 6.7235 = 8.1502 - (1 - x_{6s}) 7.5009$$

$$(1 - x_{6s}) = 0.1902$$

$$h_{6s} = 2584.7 - 0.1902 (2393.8) = 2129.6$$

$$W_t = \eta_t (h_5 - h_{6s}) = 0.86 (3169.1 - 2129.6) = 894.0 \text{ kJ/kg}$$

กำหนดปริมาตรควมรอบปั๊ม

$$\text{กฎข้อที่ 1 : } w_p = h_2 - h_1$$

$$\text{กฎข้อที่ 2 : } s_{2s} = s_1$$

$$\eta_p = \frac{h_{2s} - h_1}{w_p} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$\text{เนื่องจาก } s_{2s} = s_1 \quad s_{2s} = s_1 ; h_{2s} - h_1 = v (P_2 - P_1)$$

$$\text{ดังนั้น } w_p = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_p} = \frac{v (P_2 - P_1)}{\eta_p} = \frac{0.001009 (5000 - 10)}{0.80} = 6.3 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{net}} = w_t - w_p = 894.0 - 6.3 = 887.7 \text{ kJ/kg}$$

เมื่อใช้กฎข้อที่ 1 กับปริมาตรควมรอบหม้อน้ำจะได้

$$q_H = h_4 - h_3 = 3213.6 - 171.8 = 3041.8 \text{ kJ/kg}$$

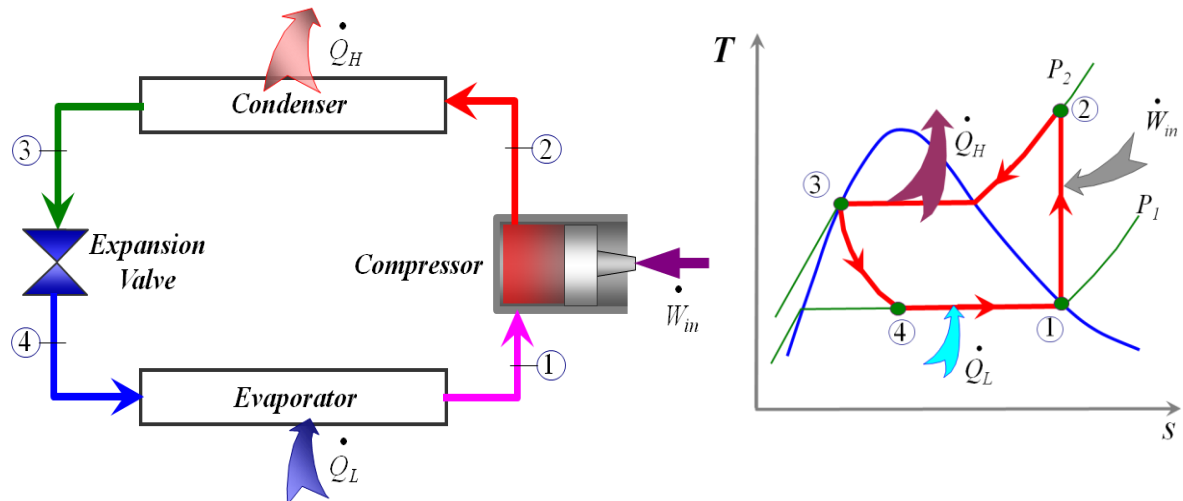
$$\eta_p = \frac{887.7}{3041.8} = 29.2\%$$

## 9.5 วัฏจักรไอทำความเย็น (Vapor Refrigeration Cycle)

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration Cycle) ซึ่งมีวัฏจักรในจินตนาการดังรูปที่ 9.6 คือ วัฏจักร 1-2-3-4-1 ไออิมตัวที่ความดันต่ำ ผ่านเข้าสู่เครื่องอัดไอ (Compressor) ซึ่งจะถูกอัดด้วย กระบวนการอัดไม่ส่งถ่ายความร้อนกับสภาพ 1-2 ,

จากนั้นคายความร้อนโดยความดันคงที่ 2-3 ในคอยล์ร้อน (condenser) และออกมาเป็นของเหลวอิ่มตัว , จากนั้นผ่านกระบวนการระเหยที่ 3-4 โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อน , ระเหยโดยความดันคงที่ในคอยล์เย็น (evaporator) ด้วยกระบวนการ 4-1 เป็นอันว่าครบวัฏจักร

เมื่อเปรียบเทียบกับวัฏจักรคาร์โน  $1'-2'-3-4'-1'$  จะเห็นความแตกต่างถ้าให้เป็นไปตามวัฏจักรคาร์โนในการอัดไอ  $1'-2'$  จะเป็นไปไม่ได้เลยในทางปฏิบัติที่จะอัดของผสมให้เป็นไออิ่มตัวโดยที่ทั้งสองสถานะอยู่ในสมดุลกัน ส่วนการลดความดันด้วย กระบวนการ 3-4' นั้นก็จะยุ่งยากกว่ากระบวนการ ระบายความร้อนมากทีเดียว



รูปที่ 9.8 วัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอในจินตนาการ

ดังได้กล่าวในบทที่ 6 แล้วว่า สมรรถนะของวัฏจักรทำความเย็นเราวัดด้วยสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ คือ

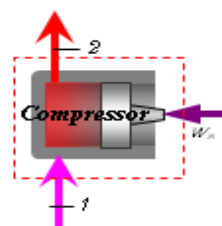
$$\beta = \frac{q_L}{w_C}$$

**ตัวอย่างที่ 9.5** วัฏจักรทำความเย็นในจินตนาการ ใช้ฟรอน -12 เป็นสารทำความเย็นโดยมีอุณหภูมิในคอยล์เย็นเป็น  $-20^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิในคอยล์ร้อนเป็น  $40^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของสารทำความเย็นในวัฏจักรเป็น  $0.03 \text{ kg/s}$  จงหาสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักร และความสามารถในการทำความเย็นของมัน

**วิธีทำ** กำหนดสถานะต่าง ๆ เหมือนรูปที่ 9.8

จาก 
$$\beta = \frac{q_L}{w_C}$$

กำหนดปริมาณควบคุมรอบคอมเพรสเซอร์



กฎข้อที่ 1 :  $w_c = h_2 - h_1$

กฎข้อที่ 2 :  $s_{2s} = s_1$

สถานะ 1 เป็นไออิ่มตัวที่อุณหภูมิ  $-20^\circ\text{C}$  จากตารางฟร็อน-12

$$h_1 = 178.610, s_1 = 0.7082$$

สถานะ 2  $s_2 = s_1 = 0.7082$

$P_2 = P_s$  ที่  $40^\circ\text{C} = 0.9607 \text{ MPa}$

ซึ่ง ณ ที่นี้  $s_2 = 0.6820$  ;  $s_2 > s_g$  แสดงว่าเป็นไอคง

หา  $h_2$  ได้โดยเทียบจากตารางไอคงของฟร็อน -12

$$\therefore w_c = 211.38 - 178.61 = 32.77 \text{ kJ/kg}$$

กำหนดปริมาตรควบคุมรอบลิ้นลดความดัน และกฎข้อที่ 1 ได้ว่า

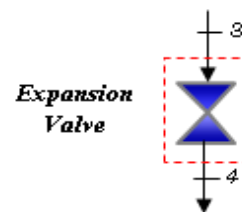
$$h_4 = h_3 = 74.53$$

กำหนดปริมาตรควบคุมรอบคอยล์เย็น

กฎข้อที่ 1 :  $q_L = h_1 - h_4 = 178.61 - 74.53 \text{ kJ/kg}$

ดังนั้น 
$$\beta = \frac{q_L}{w_c} = \frac{104.08}{32.77} = 3.18$$

ความสามารถในการทำความเย็น  $= \dot{m}_r q_L = (0.03 \text{ kg/s}) (104.08 \text{ kJ/kg})$   
 $= 3.12 \text{ kW}$



## 9.6 วัฏจักรต้นกำลังมาตรฐานอากาศ (The Air Standard Power Cycle)

ในเครื่องยนต์ต้นกำลังหลายชนิดใช้ของไหลทำงาน (working fluid) ที่เป็นแก๊ส เช่น เครื่องยนต์แก๊สโซลีน เครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องยนต์กังหันแก๊ส ในเครื่องยนต์เหล่านี้ของไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมี จากอากาศและเชื้อเพลิงไปเป็นไอเสีย ซึ่งหมายความว่า ของไหลทำงานในวัฏจักรไม่ได้เป็น สารบริสุทธิ์ (pure substance) ทำให้ยากแก่การวิเคราะห์ อีกทั้งของไหลไม่ได้ดำเนินไปครบวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ แม้ตัวเครื่องยนต์จะทำงานไปครบวัฏจักรทางกล ดังนั้นในการวิเคราะห์วัฏจักรเปิดเหล่านี้ (เครื่องยนต์สันดาปภายใน) จึงใช้วิธีจำลองให้เป็นวัฏจักรปิดให้ใกล้เคียงระบบจริงแทน วัฏจักรดังกล่าวเรียกว่า “วัฏจักรมาตรฐานอากาศ” (Air – Standard Cycle) ซึ่งมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

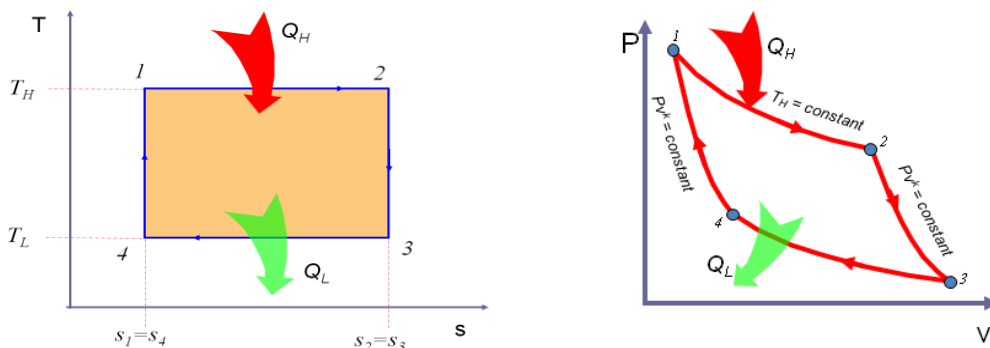
- 1) ภายในวัฏจักรมีอากาศเป็นของไหลทำงาน และไม่มีการดูดเข้าหรือคายทิ้ง และถือเอาอากาศเป็นแก๊สสมบูรณ์
- 2) กระบวนการสันดาปแทนที่โดยการส่งความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอก
- 3) ทำให้ครบวัฏจักรโดยการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (แทนจิงหะกายไอเสียและดูดไอดี)
- 4) ทุก ๆ กระบวนการเป็น กระบวนการคืนสภาพ
- 5) อากาศมีความร้อนจำเพาะคงที่

วัฏจักรมาตรฐานอากาศเหล่านี้เป็นเพียงวัฏจักรสมมติ เพื่อให้เข้าใจในหลักการเบื้องต้น และพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะ ค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้ เช่น ประสิทธิภาพและความดันเฉลี่ย (mean effective pressure) นั้นจะแตกต่างกับเครื่องยนต์จริงมาก ความดันเฉลี่ยเป็นค่าที่กำหนดขึ้นสำหรับเครื่องยนต์ลูกสูบคือ

$$\text{งานต่อวัฏจักร} = \text{ความดันเฉลี่ย} \times \text{ปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ} \quad (9.4)$$

### 9.7 วัฏจักรมาตรฐานอากาศคาร์โน (The Air Standard Carnot Cycle)

วัฏจักรนี้แสดงดังรูป 9.7



รูปที่ 9.7 วัฏจักรมาตรฐานอากาศคาร์โน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักร

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L(S_3 - S_4)}{T_H(S_2 - S_1)} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_2}$$

ประสิทธิภาพนี้สามารถเขียนในรูปของอัตราส่วนความดัน (Pressure Ratio) หรืออัตราส่วนการอัด (compression Ratio) ในระหว่างการอัด เมื่อ

$$\text{Isentropic pressure ratio, } r_{ps} = \frac{P_1}{P_4} = \frac{P_2}{P_3} = \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{k/(1-k)}$$

$$\text{Isentropic pressure ratio, } r_{vs} = \frac{v_4}{v_1} = \frac{v_3}{v_2} = \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{1/(1-k)}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \eta_{th} = 1 - r_{ps}^{(1-k)/k} = 1 - r_{vs}^{1-k}$$

## 9.8 วัฏจักรมาตรฐานอากาศออตโต (The Air Standard Otto Cycle)

วัฏจักรนี้เป็นวัฏจักรในจินตนาการที่ใกล้เคียงกับเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ (spark-ignition internal-combustion engine) ดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 9.8 ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- กระบวนการ 1–2 การอัดแบบไอเซนโทรปิก (isentropic compression)
- กระบวนการ 2–3 การให้ความร้อนโดยปริมาตรคงที่ (isometric heat supplied)
- กระบวนการ 3–4 การขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก (isentropic expansion)
- กระบวนการ 4–1 การคายความร้อนโดยปริมาตรคงที่ (isometric heat reject)

ประสิทธิภาพวัฏจักรหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{mC_v(T_4 - T_1)}{mC_v(T_3 - T_2)} \\ &= 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \end{aligned}$$

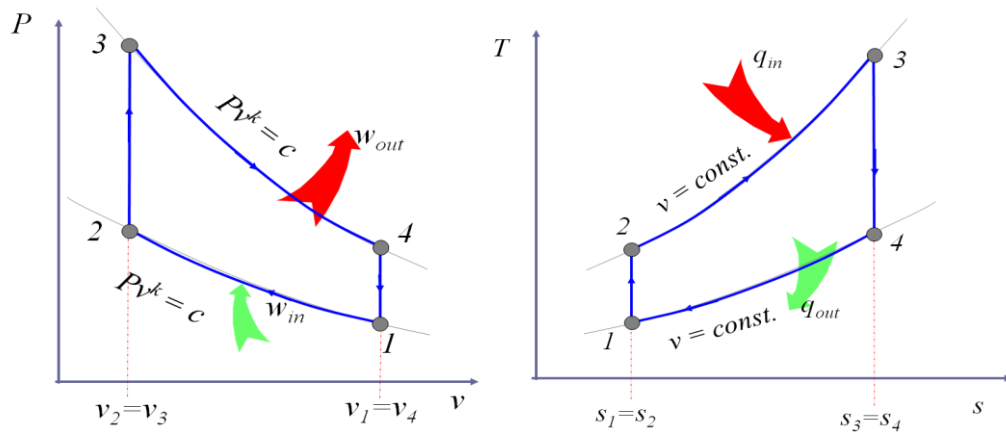
$$\text{เนื่องจาก} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$$

$$\text{ฉะนั้น} \quad \eta_{th} = \frac{T_1}{T_2} = 1 - (r_v)^{1-k} = 1 - \frac{1}{r_v^{(k-1)}}$$

$$\text{เมื่อ } r_v = \text{อัตราส่วนการอัด} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$





รูปที่ 9.8 แสดงแผนภาพ P-v และ T-s ของวัฏจักรมาตรฐานอากาศออตโต

จะเห็นว่าประสิทธิภาพ ขึ้นกับอัตราส่วนการอัดอย่างเดียว ถ้าอัตราส่วนการอัดสูง ประสิทธิภาพก็มาก แต่ในเครื่องยนต์จริง ถ้าอัตราส่วนการอัดสูงเกินไปจะเกิดเคตโทเนชั่น (detonation) ซึ่งปรากฏการอัดนี้เป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์

**ตัวอย่างที่ 9.6** วัฏจักรมาตรฐานอากาศออตโต มีอัตราส่วนการอัด 8 ก่อนเริ่มจังหวะอัดความดันเป็น 0.1 MPa และอุณหภูมิ  $15^{\circ}\text{C}$  ความร้อนที่ส่งผ่านให้อากาศต่อวัฏจักรเป็น 1800 kJ/kg ของอากาศ จงหา

- 1) ความดันและอุณหภูมิที่สภาวะสิ้นสุดของแต่ละ กระบวนการ
- 2) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
- 3) ความดันเฉลี่ย

**วิธีทำ** กำหนดสภาวะเหมือนรูปที่ 9.8

$$P_1 = 0.1 \text{ MPa} \quad T_1 = 288.2 \text{ K}$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{(0.287 \text{ kJ/kg})(288.2 \text{ K})}{100 \text{ kPa}} = 0.827 \text{ m}^3/\text{kg}$$

เนื่องจาก 1-2 เป็นกระบวนการไอเซนโทรปิก

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = 8^{0.4} = 2.3 ; T_2 = 622 \text{ K}$$

$$\text{และ} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = 8^{1.4} = 18.38 ; P_2 = 1.838 \text{ MPa}$$

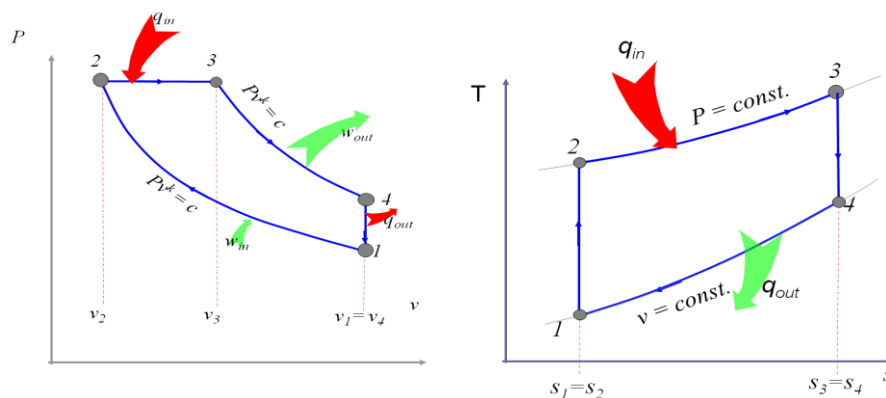
$$v_2 \frac{0.827}{8} = 0.1034 \text{ m}^3/\text{kg}$$

กระบวนการ 2-3 ให้ความร้อนโดยปริมาตรคงที่ 1800 kJ/kg

...

### 9.9 วัฏจักรมาตรฐานอากาศดีเซล (The Air Standard Diesel Cycle)

วัฏจักรในรูป 9.9 เป็นวัฏจักรในจินตนาการของเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งเรียกอีกอย่างว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (compression-ignition engine)



รูปที่ 9.9 วัฏจักรมาตรฐานอากาศดีเซล

จะเห็นได้ว่ามันแตกต่างจากวัฏจักรออตโตเฉพาะในช่วงการให้ความร้อนเท่านั้น สำหรับวัฏจักรนี้จะให้ความร้อนโดยความดันคงที่ นั่นหมายความว่าในระหว่างการให้ความร้อนลูกสูบเคลื่อนที่ลงจากจุดศูนย์กลางตายบนด้วย และหลังจากนั้นจึงขยายตัวแบบไอเซน - ทรอปิกไปจนถึงศูนย์กลางตายล่าง ถ้าวัฏจักรออตโตและดีเซลที่มีอัตราส่วนการอัดเท่ากัน และที่สถานะเริ่มต้นเหมือนกัน วัฏจักรออตโตจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่ในทางปฏิบัติเครื่องยนต์ดีเซลสามารถออกแบบให้มีอัตราส่วนการอัดสูงกว่าเครื่องยนต์แก๊สโซลีนมาก ดังนั้นประสิทธิภาพของมันจึงสูงกว่าเครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่มีปริมาตรกระบอกสูบเท่ากัน

**ตัวอย่างที่ 9.7** วัฏจักรมาตรฐานอากาศดีเซลซึ่งมีอัตราส่วนการอัด 16 ในช่วงการให้ความร้อนให้ในปริมาณ 1800 kJ/kg ของอากาศต่อวัฏจักรสถานะเริ่มแรกก่อนการอัดมีความดัน 0.1 MPa และอุณหภูมิ 15°C จงหา

- 1) อุณหภูมิและความดันที่จุดต่าง ๆ ในวัฏจักร
- 2) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
- 3) ความดันเฉลี่ย

**วิธีทำ** กำหนดสถานะต่าง ๆ เหมือนรูป 9.9

$$P_1 = 0.1 \text{ MPa} \quad T_1 = 288.2 \text{ K}$$

$$v_1 = \frac{0.287 \times 288.2}{100} = 0.827 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{16} = \frac{0.827}{16} = 0.0517 \text{ m}^3/\text{kg}$$

กระบวนการ 1-2 เป็นไอเซนทรอปิก

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = 16^{0.4} = 3.031 ; T_2 = 873.5 \text{ K}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{1.4} = 16^{1.4} = 48.5 ; P_2 = 4.85 \text{ MPa}$$

กระบวนการ 2-3 เป็นการให้ความร้อนโดยความดันคงที่

$$2 \quad q_3 = C_p (T_3 - T_2) = 1800$$

$$T_3 - T_2 = \frac{1800}{1.0035} = 1794 ; T_3 = 2667 \text{ K}$$

จากกฎของแก๊สสมบูรณ์ และเมื่อความดันคงที่ ได้ว่า

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{2667}{873.5} = 3.053 ; v_3 = 0.1375 \text{ m}^3/\text{kg}$$

3-4 เป็นกระบวนการไอเซนทรอปิก

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \left(\frac{0.827}{0.1578}\right)^{0.4} = 1.94 , T_4 = 1375 \text{ K}$$

$$\frac{P_4}{P_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k = \left(\frac{0.1578}{0.827}\right)^{1.4} = 0.09836 ; P_4 = 0.4771 \text{ MPa}$$

หาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

$$q_L = q_1 = C_v (T_1 - T_4) = 0.716 (288.2 - 1375) = -778.7 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = q_H = q_L = 1800 - 778.7 = 1021.3 \text{ kJ/kg}$$

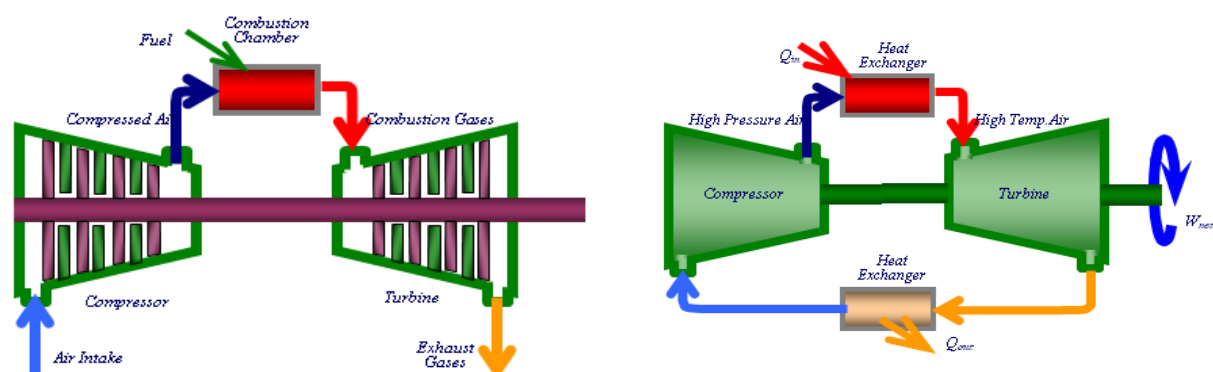
$$\eta_{th} = \frac{w_{\text{net}}}{q_H} = \frac{1021.3}{1800} = 56.7\%$$

$$mep = \frac{w_{\text{net}}}{(v_1 - v_2)} = \frac{1021.3}{(0.827 - 0.0517)} = 1317 \text{ kPa}$$


---

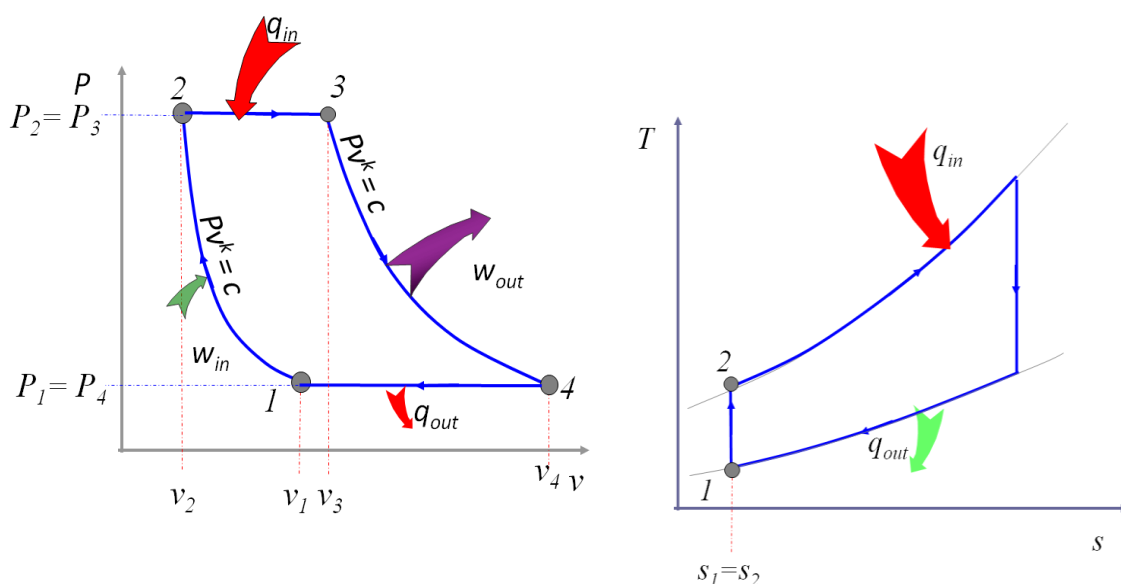
## 9.10 วัฏจักรเบรตัน (The Brayton Cycle)

วัฏจักรเบรตันมาตรฐานอากาศเป็นวัฏจักรในจินตนาการของเครื่องยนต์กังหันแก๊สอย่างง่าย ซึ่งแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 9.10



(ก) เครื่องยนต์กังหันแก๊ส (ข) วัฏจักรมาตรฐานอากาศเบรตัน

ต้น



(ค) แผนภาพ P-v และ T-s ของวัฏจักรมาตรฐานอากาศเบรตัน

### รูปที่ 9.10 วัฏจักรมาตรฐานอากาศเบรตัน

เราจะหาประสิทธิภาพของมันได้ดังนี้

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

แต่ในที่นี้

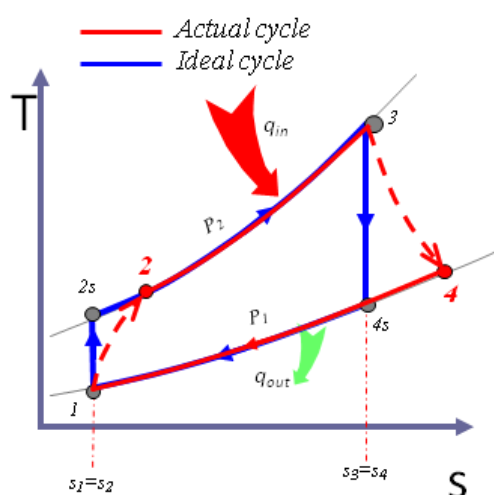
$$\begin{aligned} \text{และ} \quad \frac{P_2}{P_1} &= \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{k/k-1} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{k/k-1} \\ \text{และ} \quad \frac{T_3}{T_4} &= \frac{T_2}{T_1}; \therefore \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} - 1 = \frac{T_4}{T_1} - 1 \\ \eta_{th} &= 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}} \end{aligned}$$

จะเห็นว่าประสิทธิภาพจะขึ้นกับ อัตราส่วนความดัน (Pressure ratio,  $r_p$ ) ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามากประสิทธิภาพก็จะสูง

วัฏจักรจริงแตกต่างกับวัฏจักรในจินตนาการ เนื่องจากสาเหตุสำคัญคือ ความไม่คืนสภาพภายในเครื่องอัดแก๊ส (compressor) และกังหัน นอกจากนี้ก็คือการสูญเสียความดันเมื่อไหลผ่านห้องสันดาป (combustion) สถานะต่าง ๆ ของวัฏจักรจริงแสดงในรูป 9.11 ประสิทธิภาพของเครื่องอัดแก๊สและกังหัน เขียนให้สัมพันธ์กับ กระบวนการไอเซนทรอปิกได้ดังนี้

$$\eta_{\text{comp}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (9.5)$$

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (9.6)$$



รูปที่ 9.11 อิทธิพลที่ทำให้ประสิทธิภาพลดต่ำในวัฏจักรกังหันแก๊ส

**ตัวอย่าง 9.8** ในวัฏจักรมาตรฐานอากาศเบรตัน อากาศผ่านเข้าคอมเพรสเซอร์ที่ 0.1 MPa, 15 °C ความดันขาออกจากคอมเพรสเซอร์เป็น 0.5 MPa อุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักรเป็น 900 °C จงหา

- 1) ความดันและอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในวัฏจักร
- 2) งานของคอมเพรสเซอร์, กังหัน และประสิทธิภาพของระบบ

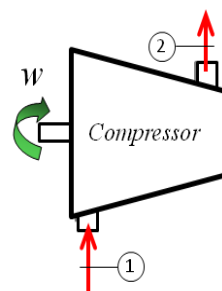
**วิธีทำ** ในการแก้ปัญหานี้เราก็ใช้วิธีเดิมคือกำหนดปริมาตรควบคุมรอบอุปกรณ์ต่าง ๆ และถือว่าอากาศเป็นแก๊สจินตภาพ และมีความร้อนจำเพาะคงที่

กำหนดผิวควบคุมรอบคอมเพรสเซอร์

กฎข้อที่ 1 :  $-w_c = h_2 - h_1$

กฎข้อที่ 2 :  $S_2 = S_1$

เนื่องจากเป็นกระบวนการไอเซนทรอปิก



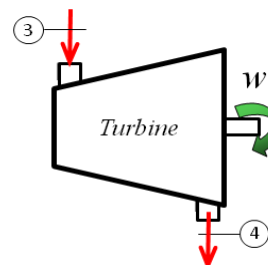
$$\begin{aligned}\frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{0.5}{0.1}\right)^{0.286} = 1.5845, T_2 = 456.6 \text{ K} \\ &= -w_c = h_2 - h_1 = C_p (T_2 - T_1) \\ &= 1.0035 (456.6 - 288.2) = 169.0 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

งานที่ใส่ให้คอมเพรสเซอร์ = 169.0 kJ/kg

กำหนดผิวควบคุมรอบกังหัน

กฎข้อที่ 1 :  $w_t = h_3 - h_4$

กฎข้อที่ 2 :  $s_3 = s_4$



ดังนั้น  $\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = 5^{0.286} = 1.5845 ; T_4 = 740.4 \text{ K}$

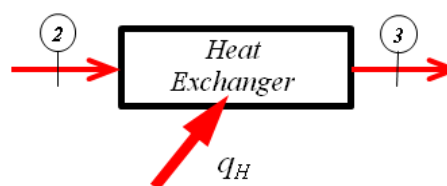
$$\begin{aligned}w_t &= h_3 - h_4 = C_p (T_3 - T_4) = 1.0035 (1173.2 - 740.4) \\ &= 434.8 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$w_{\text{net}} = w_t - w_p = 434.4 - 169.0 = 265.3 \text{ kJ/kg}$$

ใช้กฎข้อที่ 1 วิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\begin{aligned}q_H &= h_3 - h_2 = C_p (T_3 - T_2) \\ &= 1.0035 (1173.2 - 456.6) \\ &= 719.1 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_H} = \frac{265.3}{719.1} = 36.9\%$$



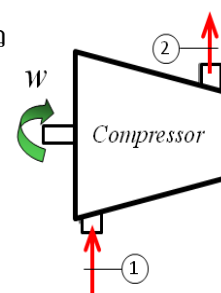
**ตัวอย่างที่ 9.9** พิจารณาเครื่องยนต์กังหันแก๊ส ซึ่งมีอากาศก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์ ภายใต้อุณหภูมิ 288 K เช่นเดียวกับตัวอย่าง 9.8 และขาออกมีความดัน 0.5 MPa อุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักรเป็น 900 °C ถ้าประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์เป็น 80 % ของกังหัน 85 % และความดันลดลงระหว่างคอมเพรสเซอร์กับกังหัน 15 kPa จงหางานในคอมเพรสเซอร์งานของกังหันและประสิทธิภาพของวัฏจักร

**วิธีทำ** กำหนดสภาวะเช่นเดียวกับรูป 9.13 และดำเนินเหมือนวิธีในตัวอย่างที่แล้ว

กำหนดปริมาตรควบคุมรอบคอมเพรสเซอร์

กฎข้อที่ 1 :  $w_c = h_2 - h_1$

กฎข้อที่ 2 :  $s_{2s} = s_1$



$$\eta_C = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{C_p(T_{2s} - T_1)}{C_p(T_2 - T_1)}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_{2s}}{T_1} = 5^{0.286} = 1.5845 ; T_{2s} = 456.6 \text{ K}$$

$$\eta_C = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{456.6 - 288.2}{T_2 - T_1} = 0.80$$

$$T_2 - T_1 = \frac{456.6 - 288.2}{0.80} = 210.5 ; T_2 = 498.7 \text{ K}$$

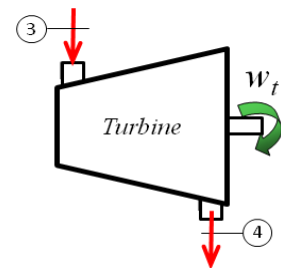
$$-w_C = h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1) = 1.0035(498.7 - 288.2)$$

$$-w_C = 211.2 \text{ kJ/kg}$$

กำหนดผิวควบคุมรอบกังหัน

กฎข้อที่ 1 :  $W_t = h_3 - h_4$

กฎข้อที่ 2 :  $s_3 = s_{4s}$



$$\eta_C = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = \frac{C_p(T_3 - T_4)}{C_p(T_3 - T_{4s})}$$

$$P_3 = P_2 - \text{ความดันลด} = 0.5 - 0.019 = 0.485 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_{4s}} = 4.85^{0.186} = 1.5708 ; T_{4s} = 746.9 \text{ K}$$

$$\eta_t = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} = 0.85$$

$$T_3 - T_4 = 0.85(11732.2 - 746.9) = 362.4 ; T_4 = 810.0 \text{ K}$$

$$w_t = h_3 - h_4 = C_p(T_3 - T_4) = 1.0035(1173.2 - 810.8)$$

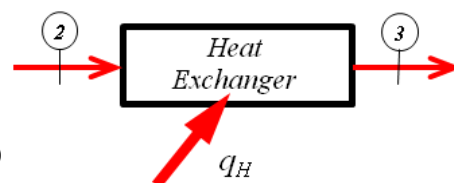
$$w_t = 363.7 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = w_t - w_C = 363.7 - 211.1 = 152.5 \text{ kJ/kg}$$

กำหนดปริมาตรควบคุมรอบห้องสันดาป

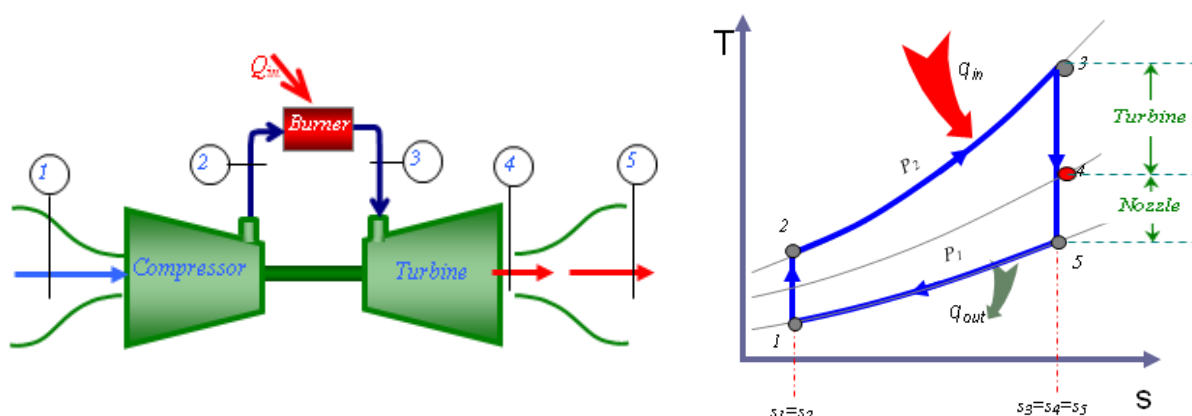
กฎข้อที่ 1 :  $q_H = h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2)$   
 $= 1.0035(1173.2 - 498.7)$   
 $= 676.9 \text{ kJ/kg}$

$$\eta_t = \frac{w_{\text{net}}}{q_H} = \frac{152.5}{676.9} = 22.5\%$$



### 9.11 วัฏจักรมาตรฐานอากาศสำหรับเครื่องยนต์เจ็ท (The Air Standard Cycle for Jet Propulsion)

วัฏจักรนี้คล้ายกับวัฏจักรเบรตัน เพียงแต่กังหันจะผลิตงานเพื่อใช้ขับคอมเพรสเซอร์เท่านั้น ดังนั้นแก๊สที่ออกจากกังหันจึงมีความดันสูงกว่าสิ่งแวดล้อมแก๊สนี้จะถูกขับออกทางหัวฉีด (nozzle) ปล่อยแก๊ส ซึ่งจะทำให้มันมีความเร็วสูง การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในช่วงนี้จะทำให้เกิดแรงขับยานที่เครื่องยนต์ติดตั้งอยู่ไปข้างหน้า แผนภาพของวัฏจักรนี้ดังแสดงในรูปที่ 9.12



รูปที่ 9.12 ภาพแสดงวัฏจักรมาตรฐานอากาศเครื่องยนต์เจ็ท

**ตัวอย่างที่ 9.10** วัฏจักรในจินตนาการซึ่งอากาศผ่านเข้าคอมเพรสเซอร์ที่ 0.1 MPa , 15 °C ความดันขาออกจากคอมเพรสเซอร์เป็น 0.5 MPa และอุณหภูมิสูงสุดเป็น 900 °C อากาศขยายตัวผ่านกังหันไปยังความดันหนึ่ง ซึ่งทำให้งานที่ได้จากกังหันพอดีเท่ากับงานที่ใช้ขับคอมเพรสเซอร์ จากนั้นอากาศขยายตัวแบบไอเซนโทรปิกในหัวฉีดจนถึง 0.1 MPa จงหาความเร็วของอากาศตอนออกจากหัวฉีด

**วิธีทำ** จากตัวอย่าง 9.8 เราได้สภาวะต่าง ๆ ที่กำหนดตามรูปข้างบนดังนี้

$P_1$	=	0.1 MPa	$T_1$	=	288.2 K
$P_2$	=	0.5 MPa	$T_2$	=	456.6 K
$W_c$	=	169.0 kJ/kg			
$P_3$	=	0.5 MPa	$T_3$	=	11732.2 K
$W_c$	=	$W_t = C_p (T_3 - T_2)$	=	169.0 kJ/kg	
$T_3 - T_4$	=	$\frac{169.0}{1.0035}$	=	168.4 ; $T_4$	= 1004.8 K



$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{1173.2}{1004.8} = 1.1766$$

$$\frac{P_3}{P_4} = 1.720 ; P_4 = 0.2907 \text{ MPa}$$

กำหนดรอบปริมาตรควบคุมรอบหัวฉีด และคิดว่าความเร็วเข้าต่ำ

กฎข้อที่ 1 :  $h_4 = h_5 + \frac{v_5^2}{2}$

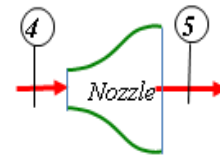
กฎข้อที่ 2 :  $s_4 = s_5$

ดังนั้น (จากตัวอย่าง 9.8)  $T_5 = 740.4 \text{ K}$

$$V_5^2 = 2(h_4 - h_5) = 2C_p(T_4 - T_5)$$

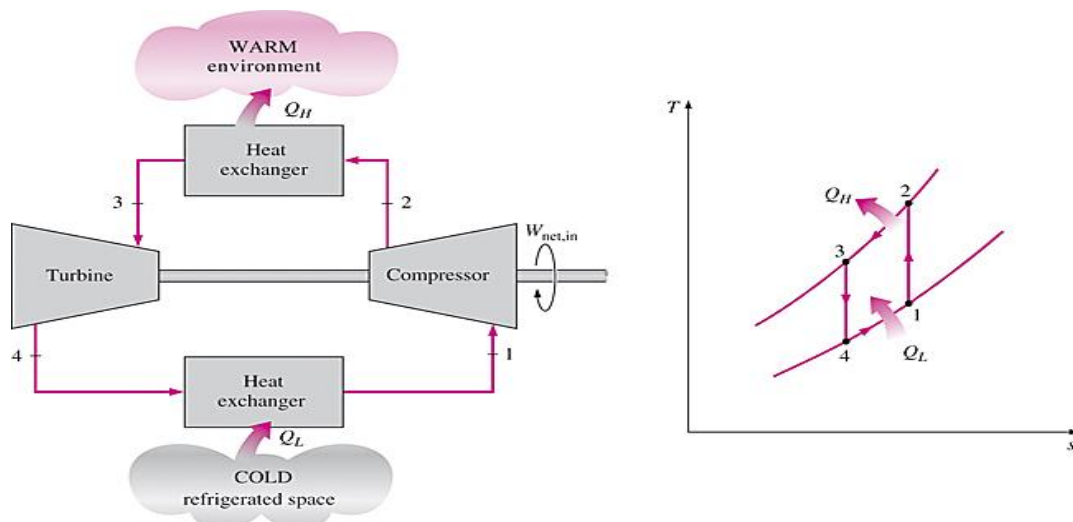
$$V_5^2 = 2 \times 1000 \times 1.0035(1004.8 - 740.4)$$

$$v_5 = 728.5 \text{ m/s}$$



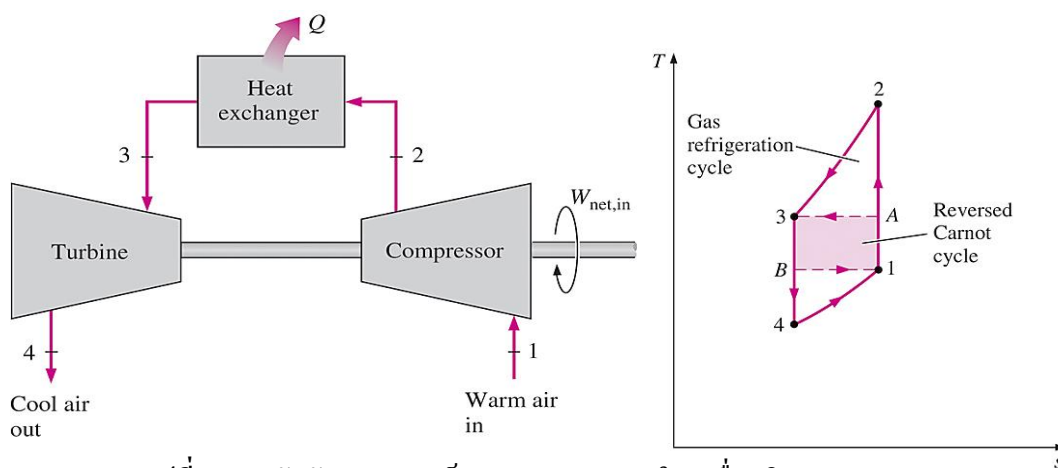
## 9.12 วัฏจักรทำความเย็นมาตรฐานอากาศ (The Air Standard Refrigeration Cycle)

วัฏจักรนี้โดยทั่วไปแล้วใช้ในการทำแก๊สเหลวจากอากาศหรือแก๊สอื่น ๆ และใช้ในการทำความเย็นในสภาวะพิเศษบางอย่าง รูปแบบที่ง่ายที่สุดของวัฏจักรนี้คือ วัฏจักรทวนของวัฏจักรเบรตัน ดังแสดงในรูปที่ 9.13



รูปที่ 9.13 วัฏจักรทำความเย็นมาตรฐานอากาศ

คอมเพรสเซอร์และตัวขยาย (Expander) อาจเป็นแบบสูบชัก (reciprocating) หรือแบบหมุน (rotary) หลังจากการอัดใน กระบวนการ 1–2 แล้วอากาศจะถูกทำให้เย็นลงโดยการถ่ายเทความร้อนสู่ สิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิต่ำ  $T_0$  จากนั้นขยายตัวใน กระบวนการ 3–4 จนถึงความดันเท่ากับความดันขาเข้า คอมเพรสเซอร์ และอุณหภูมิลดลงถึง  $T_4$  จากนั้นมันสามารถรับความร้อนได้จนอุณหภูมิถึง  $T_L$  การทำความเย็นโดยใช้อากาศในเครื่องบินมีระบบง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 9.14 โดยอากาศที่ขยายตัวแล้วจะถูกเป่าเข้าสู่ห้องโดยสารเลย



รูปที่ 9.14 วัฏจักรทำความเย็นมาตรฐานอากาศในเครื่องบิน

**ตัวอย่าง 9.11** วัฏจักรทำความเย็นมาตรฐานอากาศอย่างง่ายดังรูป 9.15 อากาศเข้าคอมเพรสเซอร์ ที่ 0.1 MPa,  $-20^\circ\text{C}$  และออกที่ 0.5 MPa อากาศผ่านเข้า expander ที่  $15^\circ\text{C}$  จงหา

- 1) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักรนี้
- 2) อัตราการไหลของอากาศซึ่งจะสามารถให้มีความสามารถในการทำความเย็น 1 kW

**วิธีทำ**

$$P_1 = P_4 = 0.1 \text{ MPa} \quad T_1 = 253.2 \text{ K}$$

$$P_2 = P_3 = 0.5 \text{ MPa} \quad T_3 = 288.2 \text{ K}$$

กำหนดปริมาตรควบคุมรอบ คอมเพรสเซอร์

กฎข้อที่ 1 :  $-W_C = h_2 - h_1$

กฎข้อที่ 2 :  $s_1 = s_2$

ดังนั้น  $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = 5^{0.286} = 1.5845 ; T_2 = 401.2 \text{ K}$

$$-W_C = h_2 - h_1 = C_p (T_2 - T_1) = 1.0035 (401.2 - 288.2)$$

$$-W_C = 148.5 \text{ kJ/kg}$$

กำหนดปริมาตรควบคุมรอบ expander

กฎข้อที่ 1 :  $W_t = h_3 - h_4 = C_p (T_3 - T_4)$

กฎข้อที่ 2 :  $s_3 = s_4$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = 5^{0.286} = 1.5845 ; T_4 = 181.9 \text{ K}$$

$$w_t = 1.0035 (288.2 - 181.9) = 106.7 \text{ kJ/kg}$$

ใช้กฎข้อที่ 1 กับปริมาตรควบคุมของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละตัว จะได้

$$-q_H = h_2 - h_3 = C_p (T_2 - T_3) = 1.0035 (401.2 - 288.2) = 113.4 \text{ kJ/kg}$$

$$-q_L = h_1 - h_4 = C_p (T_1 - T_4) = 1.0035 (253.2 - 181.9) = 71.6 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{net}} = W_t - W_c = 106.7 - 148.5 = -41.8 \text{ kJ/kg}$$

$$\beta = \frac{q_L}{-w_{\text{net}}} = \frac{71.6}{41.8} = 1.713$$

ถ้าต้องการทำความเย็น 1 kW ;

$$\text{จะได้} \quad \dot{m} = \frac{\dot{Q}_L}{q_L} = \frac{1}{71.6} = 0.014 \text{ kg/s}$$


---

## Exercises : แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9

Source: Cengel, Y.A., and Boles, M.A., *THERMODYNAMICS :An Engineering Approach*, 5<sup>th</sup> Edition in SI unit, McGraw-Hill, 2006.

Prepared by: Assoc.Prof.Sommai Priprem,PhD.

**8-10C** What is the difference between the clearance volume and the displacement volume of reciprocating engines?

**8-11C** Define the compression ratio for reciprocating engines.

**8-12C** How is the mean effective pressure for reciprocating engines defined?

**8-13C** Can the mean effective pressure of an automobile engine in operation be less than the atmospheric pressure?

**8-14C** As a car gets older, will its compression ratio change? How about the mean effective pressure?

**8-15C** What is the difference between spark-ignition and compression-ignition engines?

**8-16C** Define the following terms related to reciprocating engines: stroke, bore, top dead center, and clearance volume.

### Otto Cycle

**8-27C** What four processes make the ideal OTTO cycle?

**8-29C** How is the rpm (revolutions per minute) of an actual four-stroke. gasoline engine related to the number of thermodynamic cycles? What would your answer be for a two-stroke engine?

**8-30C** Are the processes which make up the Otto cycle analyzed as closed-system or steady-flow processes? Why?

**8-31C** How does the thermal efficiency of an ideal Otto cycle change with the compression ratio of the engine and the specific heat ratio of the working fluid?

**8-32C** Why are high compression ratios not used in spark-ignition engines?

**8-33C** An ideal Otto cycle with a specified compression ratio is executed using (a) air, (b) argon, and (c) ethane as the working fluid. For which case will the thermal efficiency be the highest? Why?

**8-34C** What is the difference between fuel-injected gasoline engines and diesel engines?

**8-35** An ideal Otto cycle has a compression ratio of 8. At the beginning of the compression process, air is at 25 kPa and 27°C, and 750 kJ/kg of heat is transferred to air during the constant-volume heat addition process. Taking into account the variation of specific heats with temperature, determine (a) the pressure and temperature at the end of the heat addition process, (b) the net work output, (c) the thermal efficiency, and (d) the mean effective pressure for the cycle. Answers: (a) 3898 kPa, 1539 K; (b) 392.4 kJ/kg; (c) 52.3 percent; (d) 495 kPa

**8-36** Repeat Prob. 8-35 using constant specific heats at room temperature.

**8-37** The compression ratio of an air-standard Otto cycle is 9.5. Prior to the isentropic compression process, the air is at 100 kPa, 17°C, and 600 cm<sup>3</sup>. The temperature at the end of the isentropic expansion process is 800 K. Using specific heat values at room temperature, determine (a) the highest temperature and pressure in the cycle, (b) the amount of heat transferred, in kJ, (c) the thermal efficiency, and (d) the mean effective pressure. Answers: (a) 1969 K, 6449 kPa; (b) 0.65 kJ; (c) 59.4 percent; (d) 719 kPa

## **Diesel Cycle**

**7-39C** How does a diesel engine differ from a gasoline engine?

**7-40C** How does the ideal Diesel cycle differ from the ideal Otto cycle?

**7-41C** For a specified compression ratio, is a diesel or gasoline engine more efficient?

**7-42C** Do diesel or gasoline engines operate at higher compression ratios? Why?

**7-43C** What is the cutoff ratio? How does it affect the thermal efficiency of a Diesel cycle?

**7-44** An air-standard Diesel cycle has a compression ratio of 16 and a cutoff ratio of 2. At the beginning of the compression process, air is at 95 kPa and 27°C. Using constant specific heats at room temperature, determine (a) the temperature after the heat addition process, (b) the thermal efficiency, and (c) the mean effective pressure.

Answers: (a) 1819K, (b) 61.4 percent, (c) 660.5kPa

**7-45** An air-standard Diesel cycle has a compression ratio of 18.2. Air is at 27°C and 0.1 MPa at the beginning of the compression process and at 2000 K at the end of the heat addition process. Using constant specific heats at room temperature, determine (a) the cutoff ratio, (b) the heat rejection per unit mass, and (c) the thermal efficiency.

**7-46** An ideal diesel engine has a compression ratio of 20 and uses air as the working fluid. The state of air at the beginning of the compression process is 95 kPa and 20°C. If the maximum temperature in the cycle is not to exceed 2200 K, determine (a) the thermal efficiency and (b) the mean effective pressure. Assume constant specific heats for air at room temperature. Answers: (a) 63.5 percent, (b) 933 kPa

**7-47** Repeat Prob. 7-46, but replace the isentropic expansion process by [polytropic expansion process with the polytropic exponent  $n = 1.35$ ].

**7-48** A four-cylinder 4.5-L diesel engine that operates on an ideal Diesel Cycle has a compression ratio of 17 and a cutoff ratio of 2.2. Air is at 27°C and 97 kPa at the beginning of the compression process. Using the cold-air-standard assumptions, determine how much power the engine will deliver at 1500 rpm.

**7-49** Repeat Prob. 7-48 using nitrogen as the working fluid.

**7-50** The compression ratio of an ideal dual cycle is 14. Air is at 100 kPa and 300 K at the beginning of the compression process and at 2200 K at the end of the heat addition process. Heat transfer to air takes place partly at constant volume and partly at constant pressure, and it amounts to 1520.4 kJ/kg. Assuming variable specific heats for air, determine (a) the fraction of heat transferred at constant volume and (b) the thermal efficiency of the cycle.

## **Gas-Turbine (Brayton) Cycle**

**7-51C** Why are the back work ratios relatively high in gas-turbine engines?

**7-52C** What four processes make up the simple ideal Brayton cycle?

**7-53C** For fixed maximum and minimum temperatures, what is the effect of the pressure ratio on (a) the thermal efficiency and (b) the net work output of a simple ideal Brayton cycle?

**7-54C** Why are gas turbines operated at very high air-fuel mass ratios?

**7-55C** Should the processes that make up the Brayton cycle be analyzed as closed-system or steady-flow processes? Why?

**7-56C** What is the back work ratio? What are typical back work ratio values for gas-turbine engines?

**7-57C** How can the irreversibilities in the turbine and compressor of gas-turbine engines be properly accounted for?

**7-58C** How do the inefficiencies of the turbine and the compressor affect (a) the back work ratio and (b) the thermal efficiency of a gas-turbine engine?

**7-59** A simple ideal Brayton cycle with air as the working fluid has a pressure ratio of 10. The air enters the compressor at 300 K and the turbine at 1200 K. Using constant specific heats at room temperature, determine (a) the air temperature at the compressor exit, (b) the back work ratio, and (c) the thermal efficiency.

**7-60** Air is used as the working fluid in a simple ideal Brayton cycle that has a pressure ratio of 12, a compressor inlet temperature of 300 K, and a turbine inlet temperature of 1000 K. Determine the required mass flow rate of air for a net power output of 30 MW, assuming both the compressor and the turbine to be isentropic. Assume constant specific heats at room temperature, answer 150.7 kg/s

**8-78** A stationary gas-turbine power plant operates on a simple ideal Brayton cycle with air as the working fluid. The air enters the compressor at 95 kPa and 290 K and the turbine at 760 kPa and 1100 K. Heat is transferred to air at a rate of 50,000 kJ/s. Determine the power delivered by this plant, (a) assuming constant specific heats at room temperature and (b) Accounting for the variation of specific heat with temperature

**8-79** Air enters the compressor of a gas-turbine engine at 300 K and 100 kPa, where it is compressed to 700 kPa and 580 K. Heat is transferred to air in the amount of 950 kJ/kg before it enters the turbine. For a turbine efficiency of 86 percent, determine (a) the fraction of the turbine work output used to drive the compressor and (b) the thermal efficiency. Assume variation of specific heat for air.

**8-81** A gas-turbine power plant operates on a simple Brayton cycle with air as the working fluid. The air enters the turbine at 1 MPa and 1000 K and leaves at 125 kPa and 600 K. Heat is rejected to the surroundings at a rate of 7922 kJ/s, and air flows through the cycle at a rate of 25 kg/s. Assuming a compressor efficiency of 80 percent, determine the net power output of the plant. Account for the variation of specific heat with temperature.

## **Jet-Propulsion Cycles**

**8-107C** How does the ideal jet-propulsion cycle differ from the ideal Brayton cycle?

**8-108C** What is the function of the nozzle in turbojet engines? **8-109C** What is propulsive power? How is it related to thrust?

**8-110C** What is propulsive efficiency? How is it determined?

**8-111C** Is the effect of turbine and compressor irreversibilities of a turbojet engine to reduce (a) the net work, (b) the thrust, or (c) the fuel consumption rate?

**8-112** A turbojet aircraft is flying with a velocity 280 m/s at an altitude of 6100 m, where the ambient conditions are 48 kPa and  $-13^{\circ}\text{C}$ . The pressure ratio across the compressor is 13, and the temperature at the turbine inlet is 1300 K. Assuming ideal operation for all components and constant specific heats for air at room temperature, determine (a) the pressure at the turbine exit, (b) the velocity of the exhaust gases, and (c) the propulsive efficiency. Answers: (a) 374.3 kPa, (b) 933.6 m/s, (c) 26.9 percent

**8-113** Repeat Prob. 8-112 accounting for the variation of specific heat with temperature.

**8-114** A turbojet aircraft is flying with a velocity 320 m/s at an altitude of 9150 m, where the ambient conditions are 32 kPa and  $-32^{\circ}\text{C}$ . The pressure ratio across the compressor is 12, and the temperature at the turbine inlet is 1400 K. Air enters the compressor at a rate of 40 kg/s, and the jet fuel has a heating value of 42,700 kJ/kg. Assuming ideal operation for all components and constant specific heats for air at room temperature, determine (a) the velocity of the exhaust gases, (b) the propulsive power developed, and (c) the rate of fuel consumption.

## **Rankine Cycle**

**9-11C** How do actual vapor power cycles differ from the idealized ones?

**9-12C** Compare the pressures at the inlet and the exit of the boiler for (a) actual and (b) ideal cycles.

**9-14C** Is it possible to maintain a pressure of 10 kPa in a condenser which is being cooled by river water entering at 20°C?

**9-15** A steam power plant operates on a simple ideal Rankine cycle between the pressure limits of 3 MPa and 50 kPa. The temperature of the steam at the turbine inlet is 400°C, and the mass flow rate of steam through the cycle is 25 kg/s. Show the cycle on a T-s diagram with respect to saturation lines, and determine (a) the thermal efficiency of the cycle and (b) the net power output of the power plant.

**9-16** Consider a 300-MW steam power plant which operates on a simple ideal Rankine cycle. Steam enters the turbine at 10 MPa and 500°C and is cooled in the condenser at a pressure of 10 kPa. Show the cycle on a T-s diagram with respect to saturation lines, and determine (a) the quality of the steam at the turbine exit, (b) the thermal efficiency of the cycle, and (c) the mass flow rate of the steam.

Answers: (a) 0.793, (b) 40.2 percent, (c) 235.4 kg/s

**9-18** A steam power plant operates on a simple ideal Rankine cycle between the pressure limits of 9 MPa and 10 kPa. The mass flow rate of steam through the cycle is 60 kg/sec. The moisture content of the steam at the turbine exit is not to exceed 10 percent. Show the cycle on a T-s diagram with respect to saturation lines, and determine (a) the minimum turbine inlet temperature, (b) the rate of heat input in the boiler, and (c) the thermal efficiency of the cycle.

**9-19** Repeat Prob. 9-18 assuming an adiabatic efficiency of 85 percent for both the turbine and the pump.

**9-20** Consider a coal-fired steam power plant which produces 300 MW of electric power. The power plant operates on a simple ideal Rankine cycle with turbine inlet conditions of 5 MPa and 450°C and a condenser pressure of 25 kPa. The coal used has a heating value (energy released when the fuel is burned) of 29,300 kJ/kg. Assuming that 75 percent of this energy is transferred to the steam in the boiler and that the electric generator has an efficiency of 96 percent, determine (a) the overall plant efficiency (the ratio of net electric power output to the energy input as fuel) and (b) the required rate of coal supply, in t/h [1 metric ton (t) = 1000 kg]. Answers: (a) 24.6 percent, (b) 150.1 t/h

**9-21** Consider a solar-pond power plant which operates on a simple ideal Rankine cycle with refrigerant-12 as the working fluid. The refrigerant enters the turbine as a saturated vapor at 1.6 MPa and leaves at 0.7 MPa. The mass flow rate of the refrigerant is 6 kg/sec. Show the cycle on a T-s diagram with respect to saturation lines, and determine (a) the thermal efficiency of the cycle and (b) the power output of this plant.

## **The Reheat Rankine Cycle**

**9-26C** Consider a simple Rankine cycle and an ideal Rankine cycle with three reheat stages. Both cycles operate between the same pressure limits. The maximum temperature is 700°C in the simple cycle and 500°C in the reheat cycle. Which cycle do you think will have a higher thermal efficiency?

**9-27** A steam power plant operates on the ideal reheat Rankine cycle. Steam enters the high-pressure turbine at 8 MPa and 500°C and leaves at 3 MPa. Steam is then reheated at constant pressure to 500°C before it expands to 20 kPa in the low-pressure turbine.

Determine the turbine work output, in kJ/kg, and the thermal efficiency of the cycle. Also show the cycle on a T-s diagram with respect to saturation lines.

### **The Reverse Carnot Cycle**

**10-5** Refrigerant-12 enters the condenser of a steady-flow Carnot refrigerator as a saturated vapor at 800 kPa and leaves with a quality of 0.05. The heat absorption from the refrigerated space takes place at 140 kPa. Show the cycle on a T-s diagram relative to saturation lines, and determine (a) the coefficient of performance, (b) the quality at the beginning of the heat absorption process, and (c) the net work input.

Answers: (a) 4.59, (b) 0.317, (c) 22.7 kJ/kg

### **Ideal and Actual Vapor-Compression Refrigeration Cycles**

**10-6C** Does the ideal vapor-compression refrigeration cycle involve any internal irreversibilities?

**10-7C** Why is the throttling valve not replaced by an isentropic turbine in the ideal vapor-compression refrigeration cycle?

**10-8C** It is proposed to use water instead of refrigerant-12 as the working fluid in air conditioning applications, where the minimum temperature never falls below the freezing point. Would you support this proposal? Explain.

**10-9C** In a refrigeration system, would you recommend condensing the refrigerant-12 at a pressure of 0.7 or 1.0 MPa if heat is to be rejected to a cooling medium at 15°C? Why?

**10-10C** Does the area enclosed by the cycle on a T-s diagram represent the net work input for the reversed Carnot cycle? How about for the ideal vapor-compression refrigeration cycle?

**10-11C** Consider two vapor-compression refrigeration cycles. The refrigerant enters the throttling valve as a saturated liquid at 30°C in one cycle and as subcooled liquid at 30°C in the other one. The evaporator pressure for both cycles is the same. Which cycle do you think will have a higher COP?

**10-12C** The COP of vapor-compression refrigeration cycles improves when the refrigerant is subcooled before it enters the throttling valve. Can the refrigerant be subcooled indefinitely to maximize this effect, or is there a lower limit? Explain.

**10-13** A refrigerator uses refrigerant-12 as the working fluid and operates on an ideal vapor-compression refrigeration cycle between 0.12 and 0.7 MPa. The mass flow rate of the refrigerant is 0.05 kg/sec. Show the cycle on a T-s diagram with respect to saturation lines. Determine (a) the rate of heat removal from the refrigerated space and the power input to the compressor, (b) the rate of heat rejection to the environment and (c) the coefficient of performance.

answer: (a) 5.68 kW, 1.55 kW; (b) 7.24 kW; (c) 3.67

**10-14** If the throttling valve in Prob. 10-13 is replaced by an isentropic turbine, determine the percentage increase in the COP and in the rate of heat removal from the refrigerated space. answers: 4.6 percent

**10-15** Consider a 300 kJ/min refrigeration system which operates on an ideal vapor-compression refrigeration cycle with refrigerant-12 as the working fluid. The refrigerant enters the compressor as saturated vapor at 140 kPa and is compressed to 800 kPa. Show



the cycle on a T-s diagram with respect to saturation lines, and determine (a) the quality of the refrigerant at the end of the throttling process, (b) the coefficient of performance, and (c) the power input to the compressor.

**10-16** Repeat Prob. 10-15 assuming an adiabatic efficiency of 85 percent for the compressor. Also determine the irreversibility rate associated with the compression process in this case. Take  $T_o = 298$  K.

**10-17** Refrigerant-12 enters the compressor of a refrigerator as superheated vapor at 0.14 MPa and  $-20^\circ\text{C}$  at a rate of 0.04 kg/s, and it leaves at 0.7 MPa and  $50^\circ\text{C}$ . The refrigerant is cooled in the condenser to  $24^\circ\text{C}$  and 0.65 MPa, and it is throttled to 0.15 MPa. Disregarding any heat transfer and pressure drops in the connecting lines between the components, show the cycle on a T-s diagram with respect to saturation lines, and determine (a) the rate of heat removal from the refrigerated space and the power input to the compressor, (b) the adiabatic efficiency of the compressor, and (c) the COP of the refrigerator.

Answer: (a) 4.81 kW, 1.44 kW; (b) 79.4 percent; (c) 3.34

**10-18** An ice-making machine operates on the ideal vapor-compression cycle using refrigerant-12. The refrigerant enters the compressor as saturated vapor at 160 kPa and leaves the condenser as saturated liquid at 700 kPa. Water enters the ice machine at  $15^\circ\text{C}$  and leaves as ice at  $-5^\circ\text{C}$ . For an ice production rate of 12 kg/h, determine the power input to the ice maker (384 kJ of heat needs to be removed from each kilogram of water at  $15^\circ\text{C}$  to turn it into ice at  $-5^\circ\text{C}$ ). Answer: 0.284 kW

---