

บทที่ 1

ความร้อนเบื้องต้น

(Fundamental of Heat)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา (Overview)

ในการออกแบบติดตั้ง และตรวจสอบเครื่องจักรด้านความร้อนนั้น ถ้าผู้ปฏิบัติมีความเข้าใจถึงลักษณะทางความร้อน และพื้นฐานของขบวนการทางความร้อนแบบต่างๆ จะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากจะเข้าใจถึงหลักการทำงานของระบบ ซึ่งจะสามารถนำไปปรับปรุง พัฒนาอุปกรณ์ หรือขั้นตอนขบวนการให้มีประสิทธิภาพขึ้นมาได้ ซึ่งในเนื้อหาที่อธิบายถึงหลักการเหล่านี้เราจะรวมเรียกว่าเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) จะเป็นการอธิบายในเชิงพลังงานพื้นฐานว่ามีอะไรบ้าง เป็นอย่างไร และมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานในลักษณะใดในขบวนการต่าง ๆ

วัตถุประสงค์ (Objective)

เพื่อเข้าใจหลักการของความร้อนเบื้องต้น

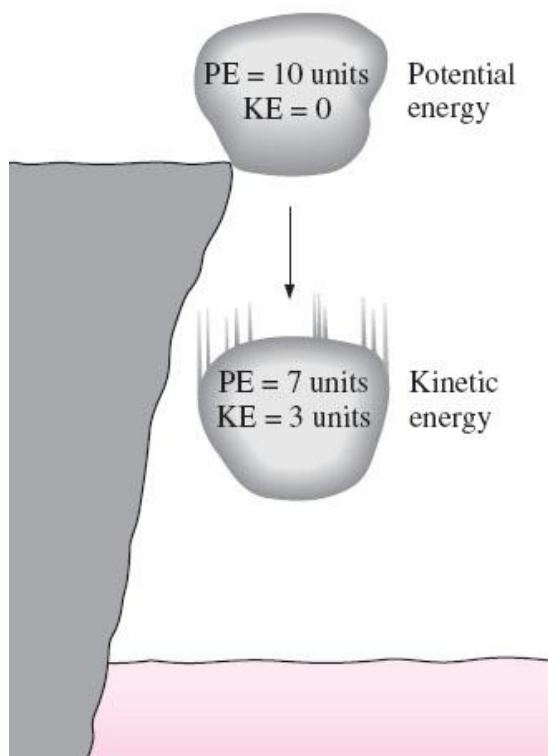
บทนำ (Introduction)

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานความร้อน หลักการเบื้องต้นของเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิจำเพาะ ปริมาณความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความร้อนสัมผัส ความร้อนแฝง ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี และฟิสิกส์, แผนภูมิอากาศและการใช้งาน กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ เครื่องจักรกลความร้อน วัฏจักรก๊าซ วัฏจักรไอน้ำ วัฏจักรทำความเย็นกับวัฏจักรฮีทปั๊ม (Heat pump)

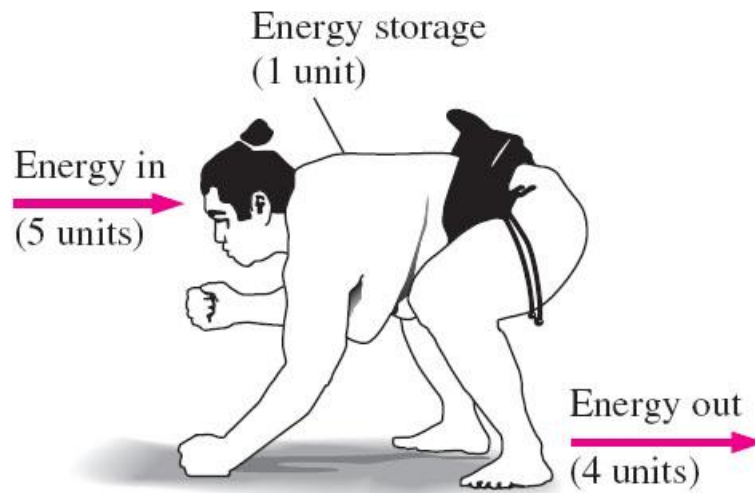
1.1 หลักการเบื้องต้นของเทอร์โมไดนามิกส์

เทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) เป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่องของพลังงาน (Energy) โดยจะมีเนื้อหาครอบคลุมถึงเรื่องของพลังงานในรูปแบบต่างๆ การเปลี่ยนรูปของพลังงาน การถ่ายโอนพลังงาน รวมทั้งสมบัติต่างๆ ของสสารที่ใช้เป็นตัวกลางในการเปลี่ยนแปลง

พลังงาน คือ ความสามารถในการทำงานได้ โดยพลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง และสามารถถ่ายโอนจากบริเวณหนึ่งไปสู่อีกบริเวณหนึ่งได้ ในการเปลี่ยนรูป หรือการถ่ายโอนพลังงานจะเป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation law) กล่าวคือ พลังงานทั้งหมดจะมีค่าคงที่ เนื่องจากพลังงานไม่สามารถถูกทำลายไป หรือถูกสร้างขึ้นมาใหม่ได้ ตัวอย่าง เมื่อก้อนหินหล่นจากหน้าผา จะพบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของก้อนหินจะสูงขึ้น เนื่องจากพลังงานศักย์ของก้อนหินถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ หรือเมื่อคนได้รับพลังงานเข้าไป (โดยการรับประทานอาหาร) มากกว่าการใช้พลังงาน (โดยทำงาน หรือการออกกำลังกาย) จะทำให้เกิดการสะสมพลังงานในรูปแบบไขมัน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 ตามลำดับ

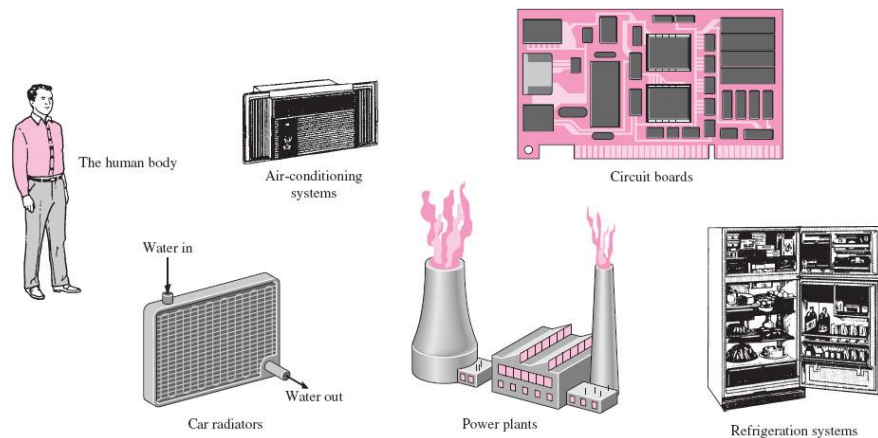


รูปที่ 1.1 กฎอนุรักษ์พลังงานในปรากฏการณ์หล่นของก้อนหิน



รูปที่ 1.2 กฎอนุรักษ์พลังงานในร่างกายของคน

หลักการของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ตามธรรมชาติได้มากมาย เช่น สมบัติของสารใดๆ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อระดับพลังงานในสารนั้นเปลี่ยนแปลงไป ความร้อนเกิดการถ่ายโอนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่แหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือน้ำจะไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำเสมอ เป็นต้น ในแง่ของการประยุกต์ใช้งาน เราสามารถใช้ทฤษฎีของเทอร์โมไดนามิกส์มาช่วยในการวิเคราะห์ และออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ได้หลายอย่าง เช่น เครื่องทำความเย็น เครื่องทำอาหาร ระบบรถยนต์ เครื่องบิน และโรงจักรกำลัง เป็นต้น ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 อุปกรณ์ที่สามารถใช้หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์มาช่วยในการวิเคราะห์ และออกแบบ

1.2 อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความร้อนที่สัมผัสได้ ความร้อนแฝงความร้อนจากปฏิกิริยาแผนภูมิอากาศ และการใช้งาน

1.2.1 อุณหภูมิ

แม้ว่าเราจะคุ้นเคยกันดีว่าอุณหภูมิ เป็นสมบัติที่ใช้บอกความร้อน-เย็นของสารอย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถบอกระดับอุณหภูมิจากความรู้สึกเพียงอย่างเดียว ยิ่งไปกว่านั้นบางครั้งการพิจารณาความร้อน - เย็นจากความรู้สึกอาจมีความผิดพลาดได้ เช่น เราจะมีความรู้สึกว่าสารที่เป็นโลหะจะเย็นกว่าวัตถุที่เป็นไม้ แม้ว่าวัตถุทั้งสองจะมีอุณหภูมิเท่ากันก็ตาม

จากการที่สมบัติของสารหลายอย่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิโดยมีทิศทาง และขนาดของการเปลี่ยนแปลงที่แน่นอน ปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ถูกนำมาเป็นหลักเกณฑ์ในการวัดอุณหภูมิที่มีความแม่นยำ โดยวิธีที่นิยม คือการวัดจากการขยาย และการหดตัว (การเปลี่ยนแปลงปริมาตร) ของปรอทที่บรรจุในหลอดแก้วโดยเครื่องมือดังกล่าวเรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์

สเกลอุณหภูมิ

สเกลอุณหภูมิสำหรับวัด ที่ใช้ในระบบ SI คือ องศาเซลเซียส [$^{\circ}\text{C}$] ส่วนสเกลอุณหภูมิที่ใช้ในระบบอังกฤษ คือ องศาฟาเรนไฮต์ [$^{\circ}\text{F}$] สเกลอุณหภูมิมักจะกำหนดอ้างอิงกับจุดอ้างอิงหลักสองจุด คือ จุดน้ำแข็ง (Freezing point) และจุดเดือด (Boiling point) ของน้ำ โดยในสเกลองศาเซลเซียสมีการกำหนดให้จุดน้ำแข็งและจุดน้ำเดือดมีระดับอุณหภูมิเป็น 0°C และ 100°C ตามลำดับ ในขณะที่สเกลองศาฟาเรนไฮต์กำหนดให้เป็น 32°F และ 212°F ตามลำดับ

สเกลอุณหภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์ในระบบ SI คือ องศาเคลวิน [K] ความสัมพันธ์ระหว่างองศาเคลวิน กับองศาเซลเซียสเป็นดังนี้

$$T[\text{K}] = T[^{\circ}\text{C}] + 273.15 \quad (1.1)$$

ในระบบอังกฤษ คือ องศาแรงคิน [R] ความสัมพันธ์ระหว่างองศาแรงคินกับองศาฟาเรนไฮต์เป็นดังนี้

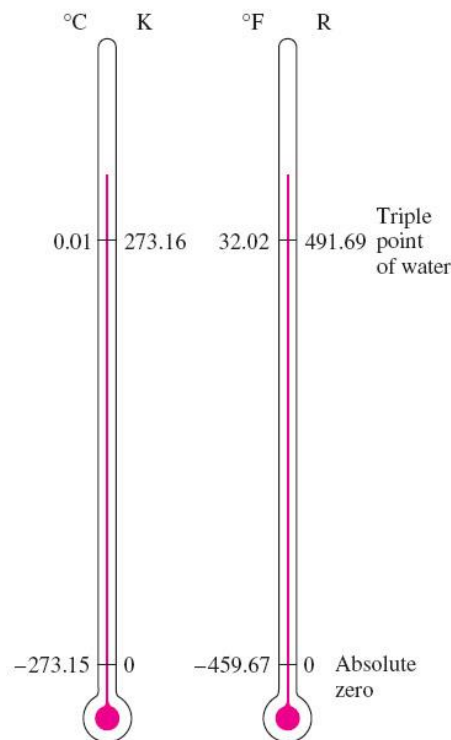
$$T[\text{R}] = T[^{\circ}\text{F}] + 459.67 \quad (1.2)$$

อุณหภูมิในระบบ SI และระบบอังกฤษมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$T[\text{R}] = 1.8 T[\text{K}] \quad (1.3)$$

$$T[^{\circ}\text{F}] = 1.8 T[^{\circ}\text{C}] + 32 \quad (1.4)$$

ความสัมพันธ์ของสเกลอุณหภูมิที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 เปรียบเทียบสเกลอุณหภูมิในหน่วยต่างๆ

สำหรับขนาดของผลต่างของอุณหภูมิ (dT) ในหน่วยต่างๆ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$dT[R] = dT[°F] = 1.8 dT[K] = 1.8 dT[°C] \quad (1.5)$$

1.2.2 ความชื้น (Humidity)

โดยธรรมชาติทั่วไปแล้วอากาศนั้นจะมีไอน้ำผสมอยู่ ปริมาณไอน้ำที่ผสมอยู่นั้นสามารถถูกทำให้เปลี่ยนแปลงไปได้ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆ ดังนั้นในกระบวนการต่างๆ เช่น การผสมอากาศ การอบแห้ง จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศจำนวนนี้ด้วย อากาศที่มีไอน้ำผสมรวมอยู่ด้วยนี้ ถูกเรียกว่า “อากาศชื้น (Moist air or Humid air)” เนื่องจากปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศมีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ดังนั้นอากาศชื้นนี้จึงสามารถแยกออกเป็นอากาศที่ไม่มีไอน้ำปนอยู่หรืออากาศแห้ง กับไอน้ำโดย

$$\text{อากาศชื้น} = \text{อากาศแห้ง} + \text{ไอน้ำ}$$

จากกฎของดัลตัน (Dalton's law) ที่เกี่ยวกับของผสมของก๊าซในอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของอากาศชื้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ความดันของอากาศชื้น (P)} = \text{ความดันของอากาศแห้ง (P}_a\text{)} + \text{ความดันของไอน้ำ (P}_w\text{)}$$

อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio)

อัตราส่วนความชื้น คือ มวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศแห้ง 1 kg หรือมวลของไอน้ำที่มีอยู่ต่อมวลของอากาศแห้ง จะเรียกว่า “อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio)” หรือ ความชื้นจำเพาะ (specific humidity) หรือ ความชื้นสมบูรณ์ (Absolute humidity) กล่าวคือ ในมวล m_a [kg] ของอากาศแห้งมีไอน้ำ m_w [kg] อยู่ อัตราส่วนความชื้น ω สามารถเขียนได้ว่า

$$\omega = m_w / m_a \quad (1.6)$$

ถ้าทราบอัตราส่วนของความชื้นของอากาศแล้ว ก็จะสามารถคำนวณหามวลอากาศแห้ง และมวลของไอน้ำ m_w [kg] ที่มีอยู่ในอากาศชื้นได้

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้น เทียบกับปริมาณไอน้ำที่มากที่สุดที่จะมีอยู่ในอากาศนั้นได้ จะหาได้จากความชื้นสัมพัทธ์กับค่าระดับความชื้นอิ่มตัว (Degree of saturation)

ความชื้นสัมพัทธ์ ยังนิยามได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบค่าปริมาณความชื้นที่มีอยู่ กับความชื้นมากที่สุดที่อุณหภูมิเดียวกัน และยังเป็นสัดส่วนกันระหว่างความดันย่อยของไอน้ำนั้นกับความดันย่อยของไอน้ำในอากาศชื้นมากที่สุดที่สามารถมีได้ ที่เรียกว่า “อากาศชื้นอิ่มตัว (Saturated moist air)” ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศชื้นอิ่มตัว จะเท่ากับ ความดันอิ่มตัวของไอน้ำ P_s ณ อุณหภูมินั้น และเมื่อกำหนดให้ความดันย่อยของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้นเป็น P_w ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (ϕ) จะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\phi = P_w / P_s \quad (1.7)$$

อัตราส่วนความชื้นของอากาศต่ออัตราส่วนความชื้นของอากาศอิ่มตัวจะเรียกว่า “ระดับความชื้นอิ่มตัว หรือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น (Percentage humidity)” ถ้าให้ความชื้นของอากาศชื้นอิ่มตัวเป็น ω_s ระดับความชื้นอิ่มตัว ψ สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\psi = \omega / \omega_s \quad (1.8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นอิ่มตัวกับอัตราส่วนความชื้น

วิธีการแสดงค่าความชื้นจะมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี แต่ไม่ว่าจะใช้วิธีใด ในที่สุดค่าอัตราส่วนความชื้นก็จะเป็นค่าที่จำเป็นต้องใช้ ในกรณีที่ให้ค่าระดับความชื้นอิ่มตัวมา จากค่าจำกัดความของระดับของความชื้นอิ่มตัว ค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\omega = \psi \omega_s \quad (1.9)$$

ในการคำนวณอัตราส่วนความชื้น ใช้สมการสถานะของแก๊สในอุดมคติ ค่าอัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำและอากาศแห้งจะเป็น

$$\omega = m_w/m_a = (P_w/R_w)/(P_a/R_a) = 0.622 P_w/P_a \quad (1.10)$$

จากสมการนี้ R_w, R_a คือค่าคงที่เฉพาะของไอน้ำ และของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $461.70 \text{ [J/(kg.K)]}$, $287.13 \text{ [J/(kg.K)]}$ ตามลำดับ ถ้าให้ความดันของอากาศชื้นเป็น P และ $P_a = P - P_w$ จากคำจำกัดความของความชื้นสัมพัทธ์ที่ว่า $P_w = \phi P_s$ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นกับค่าความชื้นสัมพัทธ์จะเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\omega = 0.622 P_w/(P - P_w) = 0.622 \phi P_s / (P - P_s) \text{ [kg/kg]} \quad (1.11)$$

หรืออาจจะเขียนใหม่ได้ว่า

$$\phi = P_w/P_s = \omega P / (P_s(0.622 + \omega)) \quad (1.12)$$

1.2.3 ปริมาณความร้อน (Heat) กับ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

สสารใดๆ เมื่อถูกทำให้ร้อนขึ้น หรือเย็นลงปริมาณความร้อนที่เข้าหรือออก จะเป็นปฏิภาคหรือสัดส่วนโดยตรงกับมวลของสสาร และอุณหภูมิของสสารที่เปลี่ยนไป ยกตัวอย่างเช่น ถ้าสสารมีมวล $m \text{ [kg]}$ สสารมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก $(T_1 \text{ [K], } ^\circ\text{C})$ ไปเป็น $(T_2 \text{ [K], } ^\circ\text{C})$ ปริมาณความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ จะมีค่าเท่ากับ $Q \text{ [J]}$ หรือ

$$Q \text{ [J]} = c \times m (T_2 - T_1) \quad (1.13)$$

ค่าคงที่เฉพาะ c ในสมการนี้เป็นค่าที่จะขึ้นอยู่กับชนิดของสสาร ซึ่งเรียกว่า “ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)” ซึ่งค่าความร้อนจำเพาะจะหมายถึง ปริมาณความร้อนที่ทำให้สสารใดๆ ที่มีน้ำหนัก 1 kg มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C ซึ่งมีหน่วยเป็น [J/(kg.K)] และเมื่อต้องการทำให้สสารใดๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1°C ปริมาณความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ ในกระบวนการนี้จะเรียกว่า “ปริมาณความจุความร้อน (Calorific capacity or Heat capacity)” $[C]$ โดยปริมาณความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะมีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้

$$C = mc \text{ [J/K]} \quad (1.14)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการเพิ่มความร้อน หรือในการทำความเย็น ถ้าเราทราบค่าความร้อนจำเพาะของสสารใดๆ เราก็สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่จำเป็นที่จะต้องเพิ่มเข้าไปในระบบ หรือปริมาณความร้อนที่จะต้องนำออกจากระบบได้ ค่าความร้อนจำเพาะสามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดัน ตลอดจนขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการเพิ่มความร้อน หรือทำความเย็น สำหรับสสารที่เป็นของแข็ง หรือของเหลว ค่าความร้อนจำเพาะของสสารนั้นๆ จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก สามารถคิดเป็นค่าคงที่ที่ไม่

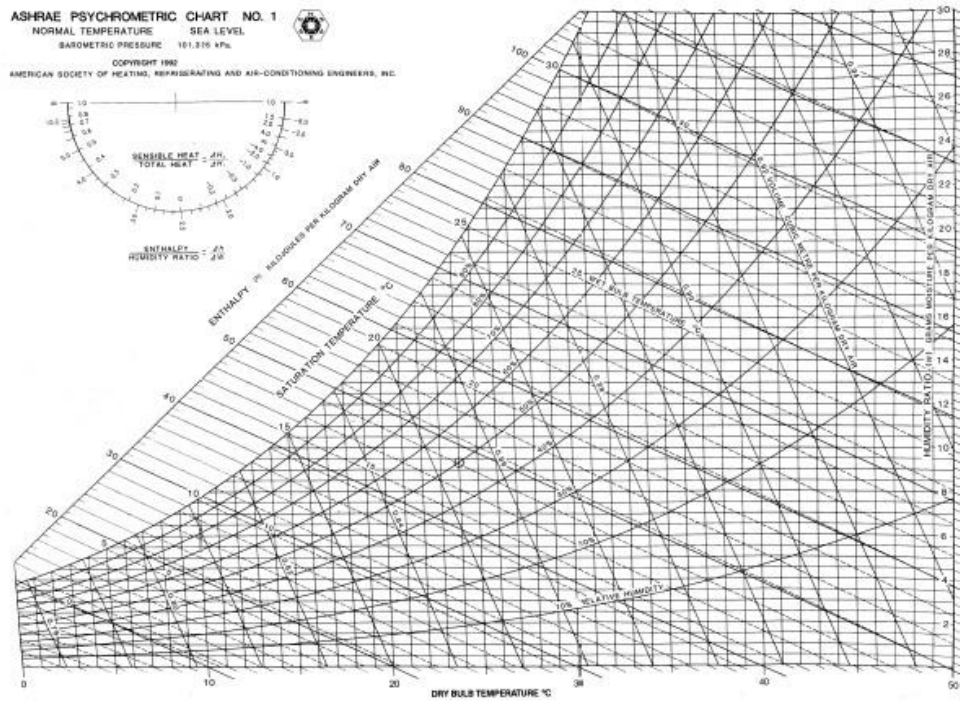
เปลี่ยนแปลงได้ แต่สำหรับสสารที่เป็นก๊าซแล้วค่าความร้อนจำเพาะนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะต่างๆ อย่างมาก ดังนั้นสำหรับสสารที่เป็นก๊าซ จึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดเงื่อนไขของการให้ความร้อน หรือทำความเย็นอย่างชัดเจนก่อน โดยปกติทั่วไปแล้วค่าที่ใช้กันจะถูก กำหนดให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ความดันคงที่ กับเงื่อนไขที่ ปริมาตรคงที่ ซึ่งจะเรียกว่า ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ และ ค่าความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่

1.2.4 ความร้อนที่สัมผัสได้ (Sensible heat), ความร้อนแฝง (Latent heat), ความร้อนของปฏิกิริยา (Heat of reaction)

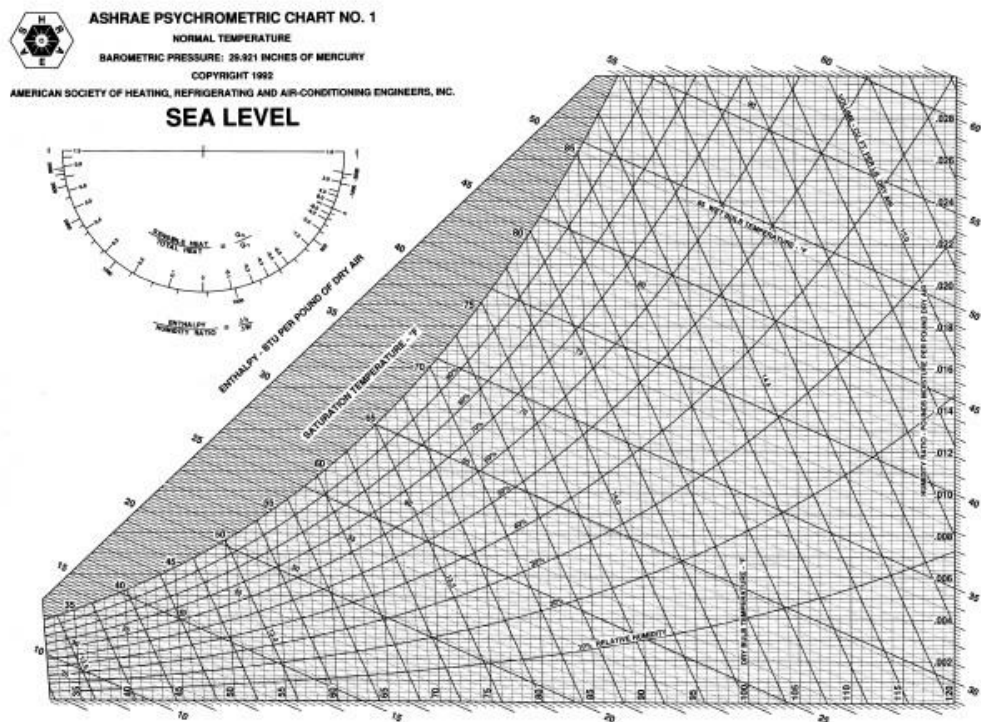
สสารใดๆ เมื่อมีความร้อนเข้าหรือออกจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเกิดขึ้น ปริมาณความร้อนนี้จะเรียกว่า “ความร้อนที่สัมผัสได้ (Sensible heat)” ขณะเดียวกันสสารอาจจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม้ จะมีความร้อนเข้าหรือออก ในกรณีนี้ปริมาณความร้อนนี้จะเรียกว่าเป็น “ความร้อนแฝง (Latent heat)” ที่บรรยากาศปกติน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0°C สามารถเปลี่ยนไปเป็น น้ำ หรือน้ำที่ 100°C เปลี่ยนไปเป็นไอน้ำโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยน เราเรียก ความร้อนเหล่านั้นว่า “ความร้อน (แฝง) ในการหลอมละลาย” และ “ความร้อน (แฝง) ในการระเหย” ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันในปฏิกิริยาเคมีบางอย่างอาจจะมีความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเหล่านั้นก็ได้ ซึ่งความร้อนเหล่านั้นจะเรียกว่า “ความร้อนของปฏิกิริยา (Heat of reaction)” เช่นในปฏิกิริยาการเผาไหม้ ปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงจะถูกปล่อยออกมา ซึ่งเราสามารถนำ ความร้อนจากปฏิกิริยาเหล่านั้นไปใช้ประโยชน์ได้

1.2.5 แผนภูมิอากาศ (Psychrometric charts) และการใช้งาน

โดยปกติสภาวะของอากาศในบรรยากาศที่ความดันค่าหนึ่งนั้น เราสามารถคำนวณคุณสมบัติของสภาวะของอากาศได้จากค่าคุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับมวล 2 ค่า แต่ในการออกแบบระบบปรับอากาศนั้นจะต้องมีการคำนวณเช่นนั้นมากมาย ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากอย่างมาก จึงได้มีผู้คิดค้นที่จะหาวิธีการคำนวณค่าทั้งหมดและนำค่าที่คำนวณได้มาทำเป็นรูปของแผนภูมิที่ง่ายต่อการอ่าน แผนภูมินี้เรียกว่า แผนภูมิอากาศ (Psychrometric charts) ซึ่งจะให้ค่าคุณสมบัติของอากาศที่ความดัน 1 atm ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.5 ในหน่วย SI และในรูปที่ 1.6 ในหน่วยอังกฤษ



รูปที่ 1.5 แผนภูมิอากาศ (Psychometric charts) ที่ความดัน 1 atm หน่วย SI

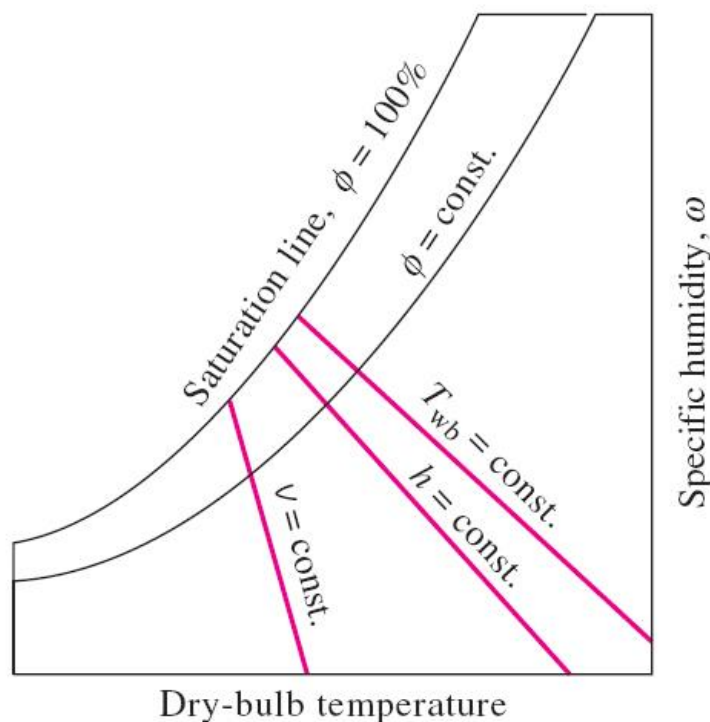


รูปที่ 1.6 แผนภูมิอากาศ (Psychometric charts) ที่ความดัน 1 atm หน่วยอังกฤษ

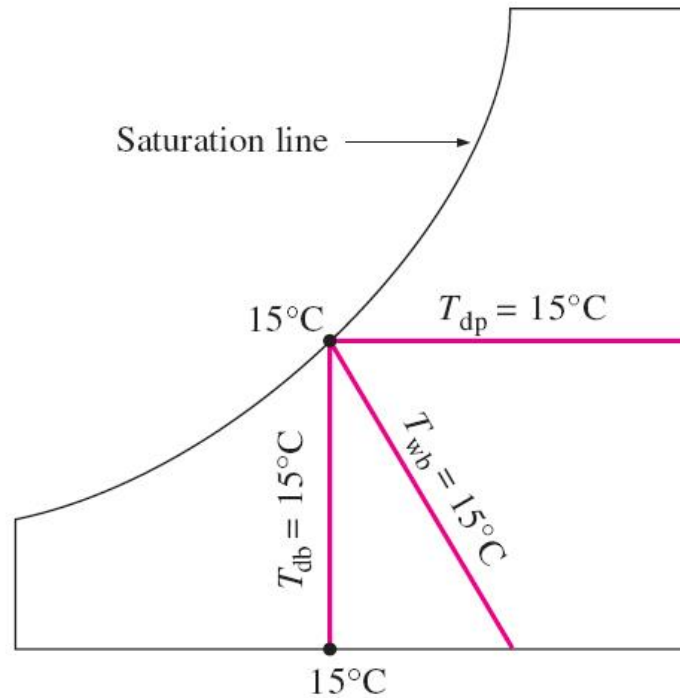
รูปร่างพื้นฐานทั่วไปของแผนภูมิอากาศ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.7 กล่าวคือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature) ถูกแสดงไว้ในแกนนอน และค่าความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) ถูกแสดงไว้ในแกนตั้ง บางแผนภูมิได้แสดงค่าความดันไอ (P_v) ไว้ในแกนตั้งด้วย เพราะค่าความชื้นจำเพาะ จะมีความสัมพันธ์กับค่าความดันไอ ที่ส่วนปลายด้านซ้ายของแผนภูมิ เราจะเห็นเส้นโค้ง ซึ่งเรียกว่า เส้นอิ่มตัว (Saturation line) แทนที่จะเป็นเส้นตรง สภาวะของอากาศอิ่มตัวทั้งหมดจะอยู่บนเส้นโค้งนี้ ดังนั้น เส้นโค้งนี้ก็คือเส้นโค้งที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100% ส่วนเส้นโค้งที่ค่าคงที่ของความชื้นสัมพัทธ์อื่นๆ ก็ได้แสดงในรูปร่างที่คล้ายคลึงกัน

เส้นของอุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่ (T_{wb}) จะมีลักษณะเฉียงลงมาจากขวามือ และเส้นของปริมาณจำเพาะคงที่ (v ; ในหน่วยของ m^3/kg dry air) จะดูคล้ายคลึงกัน เว้นแต่จะมีความชันที่มากกว่า ส่วนเส้นของค่าเอนทัลปีคงที่ (h ; ในหน่วยของ kJ/kg dry air) จะเกือบที่จะขนานกับเส้นของอุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่ ดังนั้น เส้นของอุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่จึงมักถูกใช้เป็นเส้นของเอนทัลปีคงที่ในแผนภูมิเดียวกันด้วย

สำหรับอากาศอิ่มตัว อุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก และจุดน้ำค้าง จะเท่ากัน ดังรูปที่ 1.8 ดังนั้นอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศในบรรยากาศที่จุดใดๆ บนแผนภูมิสามารถหาได้โดยลากเส้นแนวนอน (เส้นของค่าความชื้นจำเพาะคงที่ หรือความดันไอคงที่) จากจุดนั้นๆ ไปยังเส้นอิ่มตัว ค่าอุณหภูมิที่จุดตัด คือค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

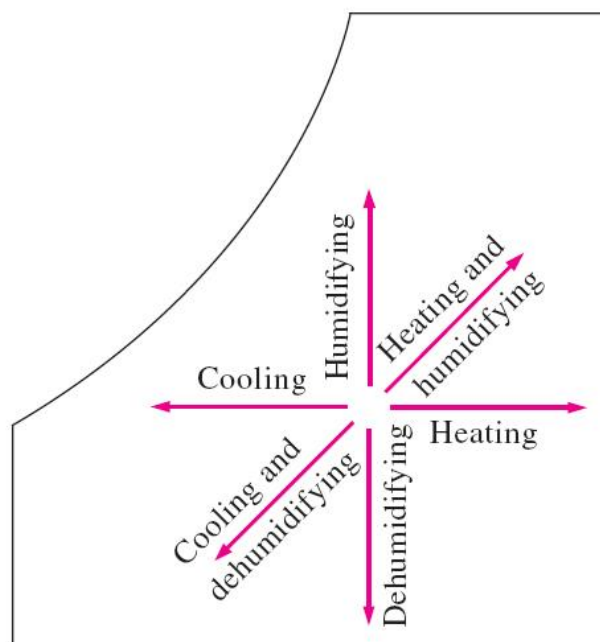


รูปที่ 1.7 แผนภาพของแผนภูมิอากาศ



รูปที่ 1.8 ไชโครเมตริกชาร์ทสำหรับอากาศอิมิตัว อุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก และจุดน้ำค้างจะเท่ากัน

นอกจากนี้แผนภูมิอากาศ ยังสามารถทำให้มองเห็นภาพของกระบวนการปรับอากาศได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น กระบวนการทำความร้อน (Heating) หรือกระบวนการทำความเย็น (Cooling) จะปรากฏเป็นเส้นแนวนอนบนแผนภูมิ ถ้าไม่มีกระบวนการเพิ่มความชื้น (Humidification) หรือกระบวนการลดความชื้น (Dehumidification) เข้ามาเกี่ยวข้อง (นั่นคือ ค่าความชื้นจำเพาะคงที่) และถ้ามีการเบี่ยงเบนจากเส้นแนวนอนแล้วจะชี้ให้เห็นว่ามีการเพิ่มความชื้น หรือเอาความชื้นออกจากอากาศในระหว่างกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 กระบวนการปรับอากาศ

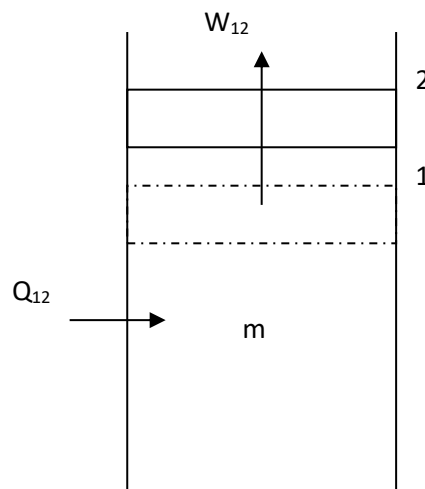
1.3 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (First Law of Thermodynamics)

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือกฎอนุรักษ์พลังงาน มีหลักการว่า “พลังงานสามารถเปลี่ยนรูป หรือถูกถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ หรือทำลายให้สูญสลายไปได้” ดังนั้นเมื่อพิจารณาการถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมแล้ว จะพบว่าพลังงานรวมของระบบกับสิ่งแวดล้อมจะมีค่าคงที่ ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการที่ระบบได้รับพลังงานจากสิ่งแวดล้อมนั้น ปริมาณพลังงานที่ระบบได้รับจะเท่ากับปริมาณพลังงานที่สิ่งแวดล้อมสูญเสีย โดยสามารถเขียนเป็นสมการแสดงการถ่ายโอนพลังงานของระบบใดๆ ได้ดังนี้

$$\text{พลังงานที่เข้าสู่ระบบ} - \text{พลังงานที่ออกจากระบบ} = \text{พลังงานรวมในระบบที่เปลี่ยนแปลง}$$

1.3.1 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบปิด

สสารที่มีอุณหภูมิค่าหนึ่งอาจกล่าวได้ว่า สสารนั้นมีพลังงานความร้อนอยู่ในตัว ซึ่งอาจกำหนดค่าคุณสมบัติอย่างหนึ่งขึ้นมาเพื่อแสดงปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในสสารเหล่านั้น คุณสมบัติที่ใช้ในกรณีนี้เรียก “พลังงานภายใน (Internal energy)” สสารที่มีมวล m [kg] จะมีพลังงานภายในเป็น U , และพลังงานภายในต่อมวลของสสารนั้นๆ 1 kg จะเรียกว่า “พลังงานภายในจำเพาะ” ใช้สัญลักษณ์เป็น u ในวิชาเทอร์โมไดนามิกส์นั้นพลังงานภายในเป็นคุณสมบัติของสสารที่สำคัญอย่างหนึ่ง



รูปที่ 1.10 การเปลี่ยนแปลงของสภาวะ

ในรูปที่ 1.10 เมื่อพิจารณาให้เป็นระบบปิด ภายในมีมวล m [kg] เมื่อใส่ปริมาณความร้อน Q_{12} จากภายนอกเข้าไป พลังงานภายในของสสารนั้นๆ จะเปลี่ยนจาก U_1 ไปเป็น U_2 และได้งาน W_{12} ออกมาจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12} \quad (1.15)$$

ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องพิจารณาทิศทางของการถ่ายเท Q_{12} และ W_{12} ซึ่งกระทำ โดยการใส่เครื่องหมาย (บวกหรือลบ) ให้กับค่าความร้อน (Q) และงาน (W) ที่เกี่ยวข้อง ถ้าใส่ความร้อนเข้าไปในระบบ และมีงานออกมาจากระบบจะใช้เครื่องหมาย (+) กับ Q และ W และเมื่อหาค่าความเปลี่ยนแปลง ของสมการ ที่ (1.15) จะได้สมการดังต่อไปนี้คือ

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad (1.16)$$

และเมื่อคิดต่อมวลสาร 1 kg จะได้ปริมาณความร้อน และงาน โดยใช้เป็นอักษรตัวเล็กคือ

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} \quad (1.15)$$

$$\Delta q = \Delta u + \Delta w \quad (1.16)$$

1.3.2 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิด

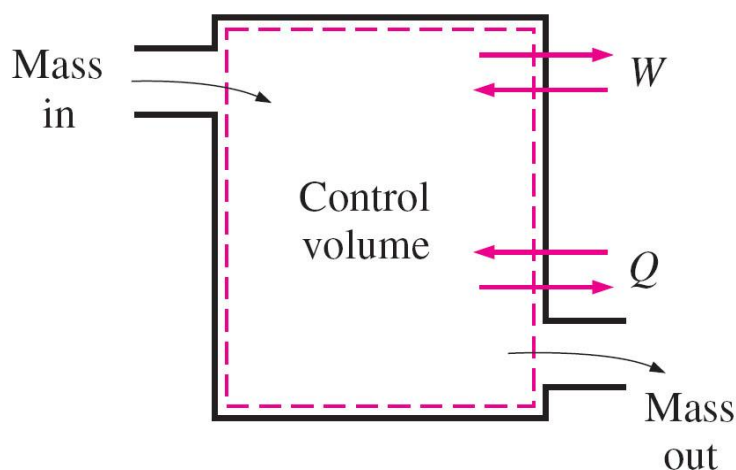
ระบบเปิดเป็นระบบที่มีการเคลื่อนที่ของมวลผ่านขอบเขตระบบสามารถพิจารณากระบวนการได้ เป็น 2 ลักษณะ คือ กระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว (Steady-flow process) และกระบวนการที่มีการไหล แบบไม่คงตัว (Unsteady-flow process) ในที่นี้เราจะพิจารณาเฉพาะการไหลแบบคงตัวเท่านั้น

กระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว (Steady-flow process)

เมื่อนำกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้คำนวณในระบบเปิดดังรูปที่ 1.11 ในระบบเปิดนั้น มวลสารในระบบมีการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าปริมาณมวลสารที่เข้าสู่ระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา เราจะ เรียกว่าเป็น “การไหลแบบคงตัว” ระบบที่เป็นการไหลแบบคงตัวนั้น งานและพลังงานความร้อนในระบบเปิด ที่พิจารณาจะคิดเป็นต่อหน่วยของเวลา โดยปริมาณต่อหน่วยของเวลาจะใช้สัญลักษณ์เป็น $[\cdot]$ ที่ข้างบน รวมไปถึงพลังงานที่เข้าและที่ออกด้วย และจากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$\dot{m} \left(u_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) + \dot{Q} = \dot{m} \left(u_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) + \dot{W} + P_2 \dot{V}_2 - P_1 \dot{V}_1 \quad (1.17)$$

ในสมการนี้ w_1 และ w_2 เป็นความเร็วที่ไหลเข้าและไหลออก $P_1 \dot{V}_1$ เป็นงานของมวลสารที่เข้าไป ในระบบ ขณะที่ $P_2 \dot{V}_2$ เป็นงานของมวลสารที่ออกจากระบบ $\dot{W}$ เป็นงานที่เกิดเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลง สภาวะของสารในระบบ



รูปที่ 1.11 การไหลแบบคงตัว

ถ้าจัดเทอมของค่าคุณสมบัติสำหรับทางเข้าไว้ทางซ้ายมือ และจัดเทอมของค่าคุณสมบัติสำหรับทางออกไว้ที่ทางขวามือ จะสามารถสร้างสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\dot{m} \left(u_1 + P_1 v_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) + \dot{Q} = \dot{m} \left(u_2 + P_2 v_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) + \dot{W} \quad (1.18)$$

เอนทัลปี (Enthalpy)

จากสมการนี้เราจะเห็น $u + Pv$ เป็นค่าคุณสมบัติ ที่เกิดในระบบของการไหล ซึ่งจะเรียกว่าเป็นค่า “เอนทัลปี (Enthalpy)” ค่าเอนทัลปีต่อมวล 1 [kg] จะเรียกว่าค่า “เอนทัลปีจำเพาะ” ใช้สัญลักษณ์เป็น h ดังสมการ

$$h = u + Pv \quad (1.19)$$

และเมื่อใช้ค่าเอนทัลปีแทนเข้าไปในสมการที่ (1.18) เราจะได้สมการใหม่เป็น

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) + \dot{Q} = \dot{m} \left(h_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) + \dot{W} \quad (1.20)$$

สมการนี้เป็นการแสดงการใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ที่ครอบคลุมไปถึงระบบเปิด และเรียกสมการนี้ว่า “สมการพลังงาน (Energy equation)”

1.4 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ (Second Law of Thermodynamics)

กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวไว้ว่า กระบวนการจะเกิดขึ้นในทิศทางที่แน่นอน และพลังงานจะเป็นค่าที่มีทั้งคุณภาพ และปริมาณ กระบวนการจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าไม่เป็นไปตามทั้งกฎข้อ

ที่หนึ่ง และสองของเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อที่จะทำให้ความร้อน และงานสามารถเปลี่ยนแปลงไปมาหากันได้อย่างต่อเนื่อง จะต้องทำให้ของไหลมีการเปลี่ยนสภาวะอย่างต่อเนื่องเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงในหนึ่งวัฏจักรนั้น สิ่งที่สำคัญที่สุดคือระบบจะต้องกลับมาสู่สภาวะเดิมตอนเริ่มต้น การเปลี่ยนแปลงครบหนึ่งรอบแบบนี้ จะเรียกว่า วัฏจักร ส่วนของไหลที่ได้รับการเปลี่ยนสภาวะแบบนี้จะเรียกว่า “ของไหลทำงาน (Working fluid)”

วัฏจักรตั้งแต่ 2 วัฏจักรซึ่งเข้ามาเกี่ยวข้องกัน และการเปลี่ยนแปลงสภาวะทั้งหมดเป็นแบบที่สามารถเปลี่ยนแปลงย้อนกลับได้ วัฏจักรแบบนี้จะถูกเรียกว่า “วัฏจักรที่ย้อนกลับได้ (Reversible cycle)” แต่ถ้ามีสภาวะใดสภาวะหนึ่งไม่สามารถย้อนกลับได้ วัฏจักรนั้นจะถูกเรียกว่า “วัฏจักรย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible cycle)”

1.4.1 เอนโทรปีและกระบวนการก๊าซอุดมคติ

เอนโทรปี (Entropy, S)

เอนโทรปีเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นตัวบ่งชี้ความไม่มีระเบียบของโมเลกุล ซึ่งจะเห็นได้จากของแข็งจะมีค่าน้อยที่สุด และจะมากที่สุดในก๊าซ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าของเอนโทรปีของกระบวนการย้อนกลับได้ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$dS = dQ/T \quad (1.21)$$

เนื่องจากเอนโทรปีเป็นคุณสมบัติที่เหมือนกับคุณสมบัติอื่นๆ จึงมีค่าที่ขึ้นกับสภาวะ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (dS) ระหว่าง 2 สภาวะ จึงมีค่าเท่ากันไม่ว่าเส้นทางของกระบวนการจะเป็นแบบย้อนกลับได้ หรือย้อนกลับไม่ได้ก็ตาม

กระบวนการก๊าซอุดมคติ

เมื่อก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ คุณสมบัติอย่างอื่นของก๊าซก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย เช่น P, V, T การเปลี่ยนแปลงสภาวะของก๊าซอุดมคติมีหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการความดันคงที่ กระบวนการปริมาตรคงที่ เป็นต้น

กระบวนการปริมาตรคงที่ (Constant volume หรือ Isometric process)

คือการเปลี่ยนแปลงสภาวะของก๊าซเมื่อปริมาตรคงที่งาน (work, W) สำหรับกระบวนการที่ไม่มีการไหล

$$W_n = \int_1^2 PdV = 0 \quad (1.22)$$

ตอนที่ 2 บทที่ 1 ความร้อนเบื้องต้น

ความร้อน (heat, Q)

$$Q_{12} = mc_v dT \quad (1.23)$$

การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี

$$dS = mc_v \ln(T_2/T_1) = mc_v \ln(P_2/P_1) \quad (1.24)$$

กระบวนการความดันคงที่ (Constant pressure หรือ Isobaric process)

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของก๊าซตามกระบวนการนี้ คุณสมบัติต่างๆ ของก๊าซจะเปลี่ยนไปแต่ความดันจะคงที่ตลอดการเปลี่ยนแปลงสถานะงานของระบบที่ไม่มีการไหล

$$W_{12} = mR(T_2 - T_1) \quad (1.25)$$

ความร้อน

$$Q_{12} = dh = c_p(T_2 - T_1) \quad (1.26)$$

กระบวนการอุณหภูมิคงที่ (Constant temperature หรือ Isothermal process)

กระบวนการอุณหภูมิคงที่ คือการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงานเมื่ออุณหภูมิคงที่งานของระบบที่ไม่มีการไหล

$$W_{12} = mRT_1 \ln(V_2/V_1) = mRT_1 \ln(P_1/P_2) \quad (1.27)$$

ความร้อน

$$\begin{aligned} Q_{12} &= P_1 V_1 \ln(V_2/V_1) &= P_1 V_1 \ln(P_1/P_2) \\ &= mRT_1 \ln(V_2/V_1) &= mRT_1 \ln(P_1/P_2) \end{aligned} \quad (1.28)$$

ในส่วนของกระบวนการเอนโทรปีคงที่ (Constant entropy หรือ Isentropic process) จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

1.4.2 วัฏจักรคาร์โนต์ (The Carnot Cycle)

จากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ได้กล่าวเอาไว้ว่า ไม่มีทางที่ความร้อนจากแหล่งความร้อนหนึ่งๆ สามารถเปลี่ยนไปเป็นงานได้ทั้งหมด จะต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งให้แก่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ ดังนั้นเราจำเป็นที่จะต้องทราบปริมาณความร้อนที่แหล่ง (ให้) ความร้อนอุณหภูมิสูง กับแหล่ง (รับ) ความร้อน

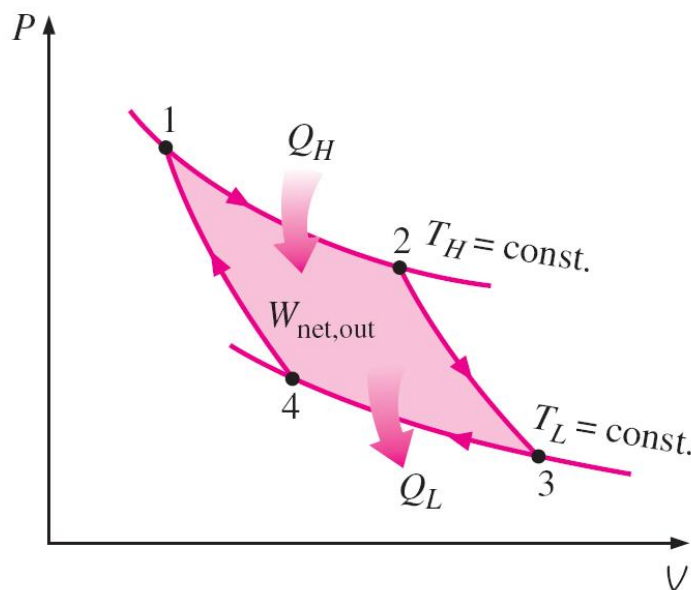
อุณหภูมิต่ำ เพื่อที่จะหาค่า “ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)” ได้ ค่านี้เป็นค่าที่สำคัญมากค่าหนึ่ง วัฏจักรคาร์โนต์เป็นวัฏจักรที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดซึ่งจัดได้ว่าเป็นวัฏจักรในอุดมคติ จากรูปที่ 1.12 จะเห็นได้ว่าวัฏจักรที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดนี้ ประกอบไปด้วย กระบวนการเปลี่ยนแปลงแบบแอเดียแบติก 2 กระบวนการ และกระบวนการเปลี่ยนแปลงแบบอุณหภูมิคงที่อีก 2 กระบวนการ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของ ของไหลทำงาน ดังนั้นเมื่อพิจารณาให้ของไหลทำงานเป็นเสมือนก๊าซในอุดมคติแล้วก็จะสามารถคำนวณวิเคราะห์เป็นวัฏจักรคาร์โนต์ได้

ในวัฏจักรคาร์โนต์นี้จะมีความร้อนเข้า-ออกจากระบบ มีกระบวนการเปลี่ยนแปลงแบบอุณหภูมิคงที่อยู่อีก 2 กระบวนการ โดยจะกำหนดให้อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็น T_H และให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำเป็น T_L ส่วน Q_H และ Q_L เป็นปริมาณความร้อนที่เข้าและออกจากกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ เราสามารถสร้างสมการได้ดังต่อไปนี้

$$Q_L/Q_H = T_L/T_H \quad (1.29)$$

ดังนั้นจากสมการนี้สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์ ในรูปแบบที่ง่าย ๆ ได้ดังนี้

$$\eta_{th} = 1 - Q_L/Q_H = 1 - T_L/T_H \quad (1.30)$$



รูปที่ 1.12 วัฏจักรคาร์โนต์

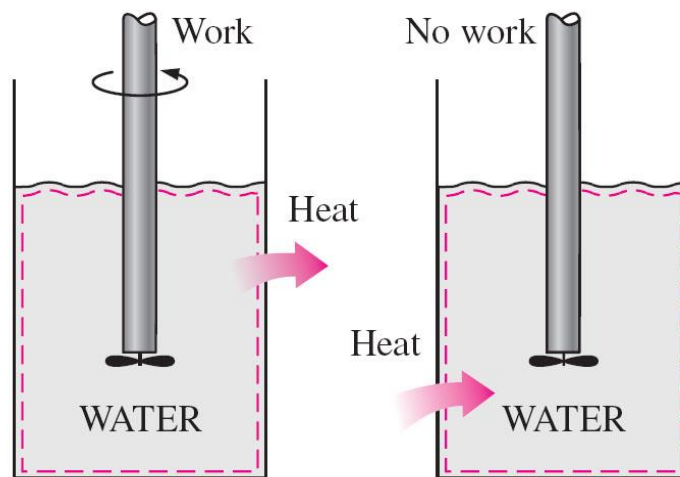
กล่าวคือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์ จะถูกกำหนดมาจากอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนอุณหภูมิสูง และแหล่งรับความร้อนอุณหภูมิต่ำเท่านั้น เมื่อต้องการหา สัมประสิทธิ์ของการทำงาน (สัมประสิทธิ์บอกสมรรถนะ) ของวัฏจักรคาร์โนต์ สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (1.30) และต่อจากนั้นจะได้ว่า

$$\epsilon_r = Q_L/(Q_H - Q_L) = T_L/(T_H - T_L) \quad (1.31)$$

$$\mathcal{E}_h = Q_H / (Q_H - Q_L) = T_H / (T_H - T_L) \quad (1.32)$$

1.5 เครื่องยนต์ความร้อน (Heat engine)

งานสามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่นได้ง่าย แต่การเปลี่ยนพลังงานรูปอื่นไปเป็นงานนั้นไม่่ง่ายนัก ตัวอย่างเช่น งานเชิงกลที่กระทำโดยเพลากับวัตถุในของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 1.13 สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานภายในของน้ำ หลังจากนั้นพลังงานนี้อาจจะหนีออกจากน้ำในรูปของความร้อน โดยประสบการณ์ เราจะทราบว่าความพยายามในการทำให้กระบวนการนี้ย้อนกลับมักจะประสบกับความล้มเหลว กล่าวคือ การถ่ายโอนความร้อนไปยังน้ำจะไม่สามารถทำให้เพลากลับมาเดิมได้ ด้วยเหตุผลนี้จึงอาจจะกล่าวสรุปได้ว่า งานสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนได้โดยตรง อย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าต้องการเปลี่ยนความร้อนไปเป็นงานนั้นจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษบางอย่าง อุปกรณ์ที่ว่านี้คือ เครื่องยนต์ความร้อน (Heat engine)



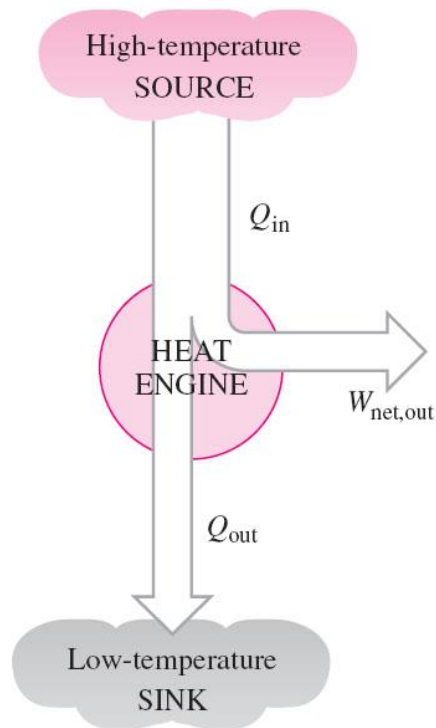
รูปที่ 1.13 แสดงการเปลี่ยนไปมาระหว่างงานกับความร้อน

เครื่องยนต์ความร้อนชนิดต่างๆ อาจจะแตกต่างกันบ้าง แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีคุณสมบัติที่เหมือนกันดังนี้คือ (รูปที่ 1.14)

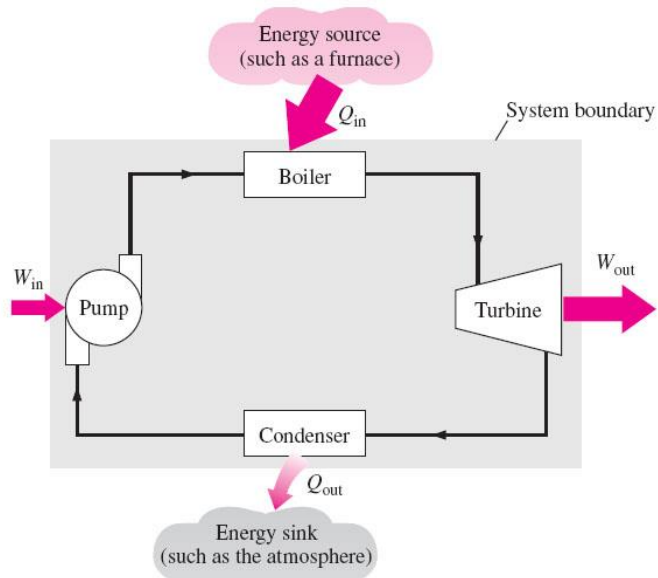
1. อุปกรณ์เหล่านี้จะรับความร้อนจากแหล่งพลังงานที่มีอุณหภูมิสูง (Source) (แสงอาทิตย์ เตาเผา เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นต้น)
2. อุปกรณ์เหล่านี้จะเปลี่ยนความร้อนบางส่วนที่ได้รับไปเป็นงาน (ปกติเป็นการหมุนเพลาลูกสูบ)
3. อุปกรณ์เหล่านี้จะทิ้งความร้อนที่เหลือไปยังแหล่งพลังงานที่มีอุณหภูมิต่ำ (Sink) (บรรยากาศ แม่น้ำ เป็นต้น)
4. กระบวนการต่างๆ จะทำงานเป็นวัฏจักร

ในบางครั้งเครื่องยนต์ความร้อนอาจหมายรวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้งานบางอย่างที่ไม่ได้ทำงานเป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น เครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายใน อุปกรณ์เหล่านี้จะทำงานเป็นวัฏจักรในเชิงกลศาสตร์แต่ไม่ได้ทำงานเป็นวัฏจักรในเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ เพราะว่าของไหลที่ทำงานในระบบนั้น จะถูกเผาไหม้ไป อาทิตัวรถ เชื้อเพลิง ทำให้ไม่ได้ไหลวนอยู่ในวัฏจักรตลอด แต่ถูกปล่อยออกมาเป็นไอเสีย เพื่อทำให้ระบบเย็นตัวลง และถูกแทนที่ด้วยอากาศกับเชื้อเพลิงใหม่แทน

ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ผลิตงานโดยที่ตัวมันเองทำงานเป็นวัฏจักรเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น โรงจักรกำลังไอน้ำ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีการสันดาปภายนอก กล่าวคือ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นภายนอก และพลังงานความร้อนถูกถ่ายเทให้กับไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1.15



รูปที่ 1.14 แสดงวัฏจักรเครื่องยนต์ความร้อน



รูปที่ 1.15 แผนภาพของโรงจักรกำลังไอน้ำ

จากรูปสัญลักษณ์ต่างๆ ที่แสดงมีความหมายดังนี้คือ

Q_{in} คือ ปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับไอน้ำภายในหม้อไอน้ำ (Boiler) จากแหล่งพลังงานที่มีอุณหภูมิสูง (Source)

Q_{out} คือ ปริมาณความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากไอน้ำภายในเครื่องควบแน่น (Condenser) ไปยังแหล่งพลังงานที่อุณหภูมิต่ำ (Sink)

W_{in} คือ ปริมาณงานที่ต้องใช้ในการปั๊มน้ำไปยังหม้อไอน้ำ

W_{out} คือ ปริมาณงานที่ได้จากการขยายตัวของไอน้ำภายในกังหัน (Turbine)

งานสุทธิที่ได้ ($W_{net, out}$) จากโรงจักรกำลังนี้คือ ความแตกต่างระหว่างงานทั้งหมดที่ได้ออกมากับงานทั้งหมดที่ป้อนเข้าไป

$$W_{net, out} = W_{out} - W_{in} \quad (1.33)$$

นอกจากนี้งานสุทธียังหาได้จากการถ่ายเทความร้อน กล่าวคือ เมื่อพิจารณาวัฏจักรความร้อนจะพบว่าเป็นระบบปิดเพราะไม่มีการถ่ายโอนมวลเข้าหรือออกจากวัฏจักร และเนื่องจากการทำงานเป็นแบบวัฏจักร ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจึงมีค่าเป็นศูนย์ งานสุทธิที่ได้จากระบบจึงมีค่าเท่ากับการถ่ายโอนความร้อนสุทธิของระบบ

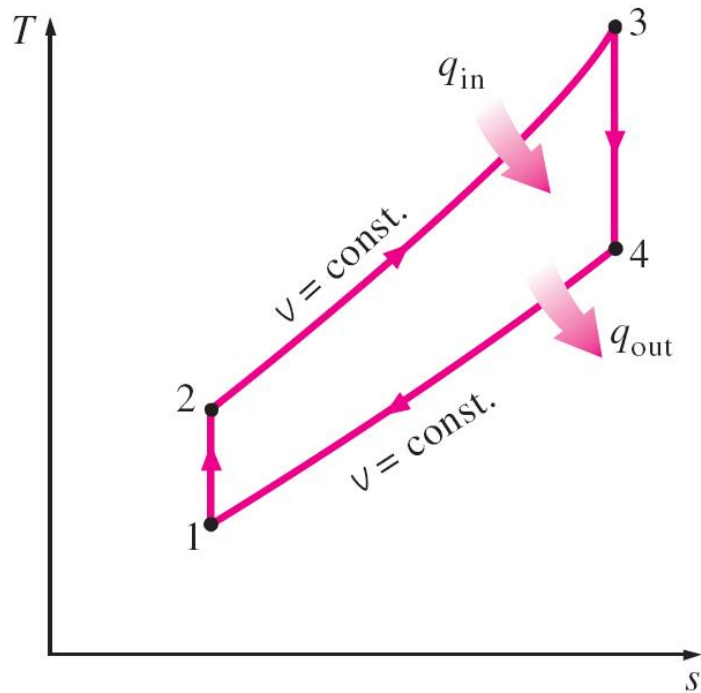
$$W_{net, out} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1.34)$$

1.6 วัฏจักรก๊าซ วัฏจักรไอน้ำ วัฏจักรทำความเย็นและวัฏจักรปั๊มความร้อน

1.6.1 วัฏจักรก๊าซ (Gas cycle)

วัฏจักรออตโต (Otto cycle)

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน หรือเครื่องยนต์เบนซินที่ใช้การจุดระเบิดของหัวเทียนในการติดเครื่อง (Spark ignition engine) และมีวัฏจักรเป็นไปตามทฤษฎีซึ่งเรียกว่า “วัฏจักรออตโต (Otto cycle)” หรือเรียกว่า “วัฏจักรปริมาตรคงที่” วัฏจักรนี้แสดงดังในรูปที่ 1.16 ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการแอเดียแบติก 2 กระบวนการ และการเปลี่ยนแปลงแบบปริมาตรคงที่อีก 2 กระบวนการ จากการเปลี่ยนแปลงแบบแอเดียแบติก ของผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงจะถูกดูดเข้าไปที่กระบอกสูบ และถูกอัดจนถึงตำแหน่งที่ 2 จากนั้นก็จะจุดระเบิดในระยะเวลาสั้นๆ ชั่วพริบตา เนื่องจากการเผาไหม้ดำเนินไปในระยะเวลาสั้นจึงสามารถพิจารณาให้เป็นการให้ความร้อนแบบปริมาตรคงที่ (กระบวนการที่ 2-3) ณ สภาวะที่ 3 ก๊าซเผาไหม้ที่ได้รับการเพิ่มความร้อนนี้จะมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นก็จะเกิดการขยายตัวแบบแอเดียแบติกโดยจะมีการส่งผ่านงานไปยังลูกสูบ จนกระทั่งมาถึงสภาวะที่ 4 (ตำแหน่งที่ 4) ลิ้นไอเสีย (Exhaust valve) ก็จะเปิดเป็นช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อปล่อยไอเสียออกมา



รูปที่ 1.16 วัฏจักรออตโต

การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรนี้ จะกำหนดให้ของไหลทำงานเป็นเสมือนของไหลในอุดมคติ และคิดมวลของของไหลทำงานเป็น m [kg] ดังนั้นใน 1 วัฏจักรความร้อนที่เข้า-ออกภายใต้ปริมาตรคงที่สามารถหาได้จาก

$$Q_1 = mc_v(T_3 - T_2) \quad (1.35)$$

$$Q_2 = mc_v(T_4 - T_1) \quad (1.36)$$

ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีจะสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$\eta_{th} = 1 - Q_2/Q_1 = 1 - (T_4 - T_1)/(T_3 - T_2) \quad (1.37)$$

จากสมการนี้ อุณหภูมิของทุกๆ จุดจะสามารถหาได้จากการเปลี่ยนแปลงสถานะของก๊าซในอุดมคติ โดยจากสถานะที่ 1 ไปยังสถานะที่ 2 จะเป็นกระบวนการแอดิเอแบติกที่ย้อนกลับได้ (กระบวนการไอเซนทรอปิก) ดังนั้น T_2 หาได้จากสมการ

$$T_2 = T_1(V_1/V_2)^{\gamma-1} \quad (1.38)$$

จากสมการนี้ V_1/V_2 จะเรียกว่า “อัตราส่วนการอัด (Compression ratio)” แสดงได้ด้วย ϵ ส่วน $V_s = V_1 - V_2$ จะเรียกว่า “ปริมาตรช่วงชัก” (Displacement volume) หรือ “ปริมาตรสโตรก (Stroke volume)” และ V_2 จะเรียกว่า “ปริมาตรช่องว่าง (Gap volume) หรือ Clearance volume” จากกระบวนการปริมาตรคงที่ จากสถานะที่ 2 ไปยังสถานะที่ 3 ซึ่ง T_3 จะหาได้จาก

$$T_3 = T_2(P_3/P_2) = T_1\epsilon^{k-1}\xi \quad (1.39)$$

ในสมการนี้ $\xi = P_3/P_2$ ซึ่งเป็นการเพิ่มความดันเนื่องมาจากการให้ความร้อนเข้าไป และจะเรียกว่า “อัตราส่วนการเพิ่มความดัน” เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่ 3 ไปยังสถานะที่ 4 เป็นกระบวนการแบบแอเดียแบติก ดังนั้น T_4 จะสามารถหาได้จาก

$$T_4 = T_3(V_1/V_2)^{k-1} \quad (1.40)$$

จากสมการนี้เราใช้ค่า

$$T_4 = T_1\epsilon^{k-1}\xi(1/\epsilon)^{k-1} = T_1\xi \quad (1.41)$$

แทนค่านี้กลับลงไปในสมการที่ (1.37) จะได้ว่า

$$\eta_{th} = 1 - (T_4 - T_1)/(T_3 - T_2) = 1 - T_1(\xi - 1)/(T_1\epsilon^{k-1}(\xi - 1)) = 1 - 1/\epsilon^{k-1} \quad (1.42)$$

จากสมการนี้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรออตโตจะถูกกำหนดให้ขึ้นกับค่าอัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ k ของก๊าซกับค่าอัตราส่วนการอัด ϵ เท่านั้น ยิ่งอัตราส่วนการอัด และค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะมีค่ามากเท่าไร ก็จะทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีสูงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าอัตราส่วนการอัดสูงมากเกินไปจะทำให้เกิดการเผาไหม้แบบไม่ปกติเกิดขึ้น กำลังที่ออกมาจะลดลง โดยทั่วไปอัตราส่วนการอัดจะอยู่ที่ประมาณ 8-12

สำหรับเครื่องยนต์ความร้อนนั้นค่าที่สำคัญไม่เพียงแต่เฉพาะประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่านั้น งานต่อปริมาตรช่วงชักก็เป็นสิ่งที่สำคัญเช่นเดียวกัน ซึ่งจะเรียกว่า “ความดันประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean effective pressure, P_m)” ความดันประสิทธิผลเฉลี่ยสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

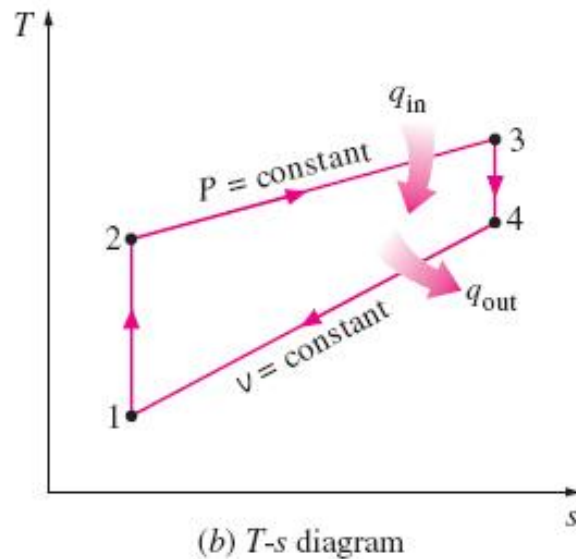
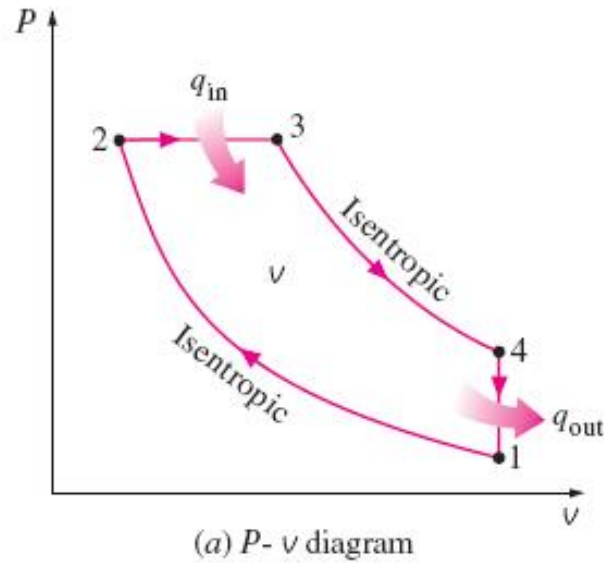
$$\begin{aligned} P_m &= W/V_s = (Q_1 - Q_2)/(V_1 - V_2) \\ &= mc_v[(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)]/(V_1 - V_2) \\ &= P_1(\xi - 1)(\epsilon^k - \epsilon)/(k - 1)(\epsilon - 1) \end{aligned} \quad (1.43)$$

วัฏจักรดีเซล (Diesel cycle)

วัฏจักรนี้เป็นวัฏจักรที่คล้ายคลึงกับวัฏจักรออตโต โดยทำการเปลี่ยนกระบวนการเพิ่มความร้อนแบบปริมาตรคงที่เป็นการเพิ่มความร้อนแบบความดันคงที่เข้าไปแทน วัฏจักรนี้เป็นวัฏจักรทางทฤษฎีของเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบต่ำ กล่าวคืออากาศจะถูกดูดเข้าไปที่กระบอกสูบ โดยการอัดตัวแบบ แอเดียแบติก ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นประมาณ 600°C และเชื้อเพลิงก็จะถูกฉีดเข้าไปเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ แผนภาพของวัฏจักรสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 1.17 เนื่องจากภายหลังจากการอัดแล้วเชื้อเพลิงจะค่อยๆ ถูกฉีดพ่นเข้าไปอย่างช้าๆ ดังนั้นกระบวนการให้ความร้อนนี้สามารถพิจารณาเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้ความดันคงที่ได้จนกระทั่งถึงสถานะที่ 3 ก็จะหยุดการจ่ายเชื้อเพลิง การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการขยายตัวแบบแอเดียแบติกขึ้นจากสถานะที่ 3 ไปยังสถานะที่ 4 ในวัฏจักรนี้ค่าอัตราส่วนการอัด กับค่าอัตราส่วนการขยายจะไม่เท่ากัน

การคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีจะใช้วิธีการคำนวณเหมือนกันกับกรณีของวัฏจักรออตโต ซึ่งจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{th} = 1 - (T_4 - T_1)/k(T_3 - T_2) = 1 - (1/\epsilon^{k-1}) (\rho^{k-1}/k(\rho - 1)) \quad (1.44)$$



รูปที่ 1.17 วัฏจักรดีเซล

ในสมการนี้ $\rho = V_3/V_2$ ซึ่งจะเรียกว่า “อัตราส่วนการตัด (cut off ratio)” การเปลี่ยนแปลงปริมาตรก็จะเกิดจากกระบวนการเพิ่มความร้อนเข้าไป ประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีของวัฏจักรดีเซลจะเป็นฟังก์ชันของ อัตราส่วนการอัด (ϵ) ค่าอัตราส่วนของความดันจำเพาะ (k) ค่าอัตราส่วนการตัด (ρ) โดยที่ค่า ϵ และ k ยิ่งมีค่ามากเท่าไร ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนก็จะสูงมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งจะเห็นว่าค่า ρ ยิ่งมีค่าน้อย ยิ่งดี กล่าวคือค่าอัตราส่วนการอัดมีค่ามาก ค่าอัตราส่วนการตัดออกมีค่าเข้าใกล้ 1 ก็จะทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น เมื่อค่าอัตราส่วนการตัดมีค่าเป็น 1 วัฏจักรนี้ก็เหมือนกันกับวัฏจักรออตโต วัฏจักรดีเซลนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัฏจักรออตโตที่ภายใต้อัตราส่วนการอัดที่เท่ากันแล้ว จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่า แต่เนื่องจากว่าในวัฏจักรดีเซลนั้นค่าอัตราส่วนการอัด มีค่าสูงกว่ากรณีของวัฏจักรออตโตได้

ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์จริงๆ แล้วจะดีกว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน ค่าความดันประสิทธิผลเฉลี่ย (P_m) ของวัฏจักรดีเซลสามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} P_m &= m\{c_p(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)\}/(V_1 - V_2) \\ &= P_1(\epsilon_k k(p-1) - \epsilon(p^k-1))/(k-1)(\epsilon-1) \end{aligned} \quad (1.45)$$

วัฏจักรเบรตัน (Brayton cycle)

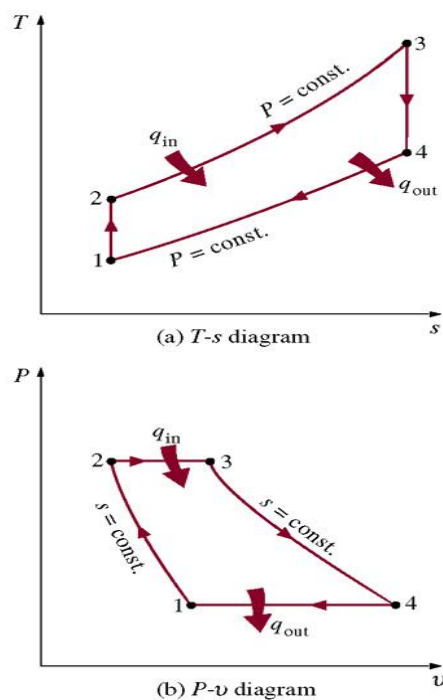
วัฏจักรเบรตัน หรือ อาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “วัฏจักรจูล” วัฏจักรนี้แสดงในรูปที่ 1.18 จะประกอบไปด้วย กระบวนการความดันคงที่ 2 กระบวนการและ กระบวนการแบบแอเดียแบติก 2 กระบวนการ การให้ความร้อนและความร้อนที่ออกมาจะเกิดขึ้นภายใต้กระบวนการความดันคงที่ ในวัฏจักรนี้เนื่องจาก $P_2 = P_3$, $P_1 = P_4$ ดังนั้นค่าอัตราส่วนความดัน (pressure ratio, ϕ) หาได้จาก

$$\phi = P_2/P_1 = P_4/P_3 \quad (1.46)$$

ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีสามารถหาได้ดังนี้

$$\eta_{th} = 1 - (T_1/T_2)((T_4/T_1)-1)/((T_3/T_2)-1) = 1 - T_1/T_2 = 1 - (1/\phi)^{(k-1)/k} \quad (1.47)$$

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่าวัฏจักรเบรตันนั้นค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนความดัน ϕ และค่านี้ถ้ายังมีค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 1.18 วัฏจักรเบรตัน

วัฏจักรอีริกสัน (Ericsson cycle)

วัฏจักรที่เรียกว่า “วัฏจักรอีริกสัน” ก็จะคล้ายคลึงกับวัฏจักรเบรตันโดยการแทนที่กระบวนการอัดและขยายตัวภายใต้กระบวนการแอเดียแบติกในวัฏจักรเบรตันด้วยกระบวนการแบบอุณหภูมิคงที่ แผนภาพของวัฏจักรนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1.19 ถ้ากำหนดให้ อัตราส่วนอุณหภูมิ (τ) มีค่าเป็น

$$\tau = T_1/T_4 = T_2/T_3 \quad (1.48)$$

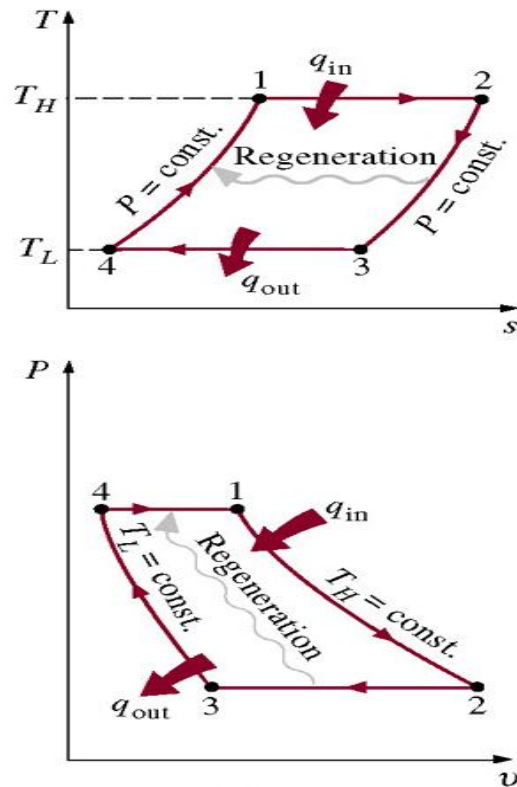
แล้ว ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎี สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{th} = \frac{(k-1)(\tau-1)\ln(\phi)}{[k(\tau-1) + \tau(k-1)\ln(\phi)]} \quad (1.49)$$

เนื่องจากในวัฏจักรนี้ค่า $T_1-T_4 = T_2-T_3$ ซึ่งจะทำให้ $q_{in} = q_{out}$ ภายใต้กระบวนการความดันคงที่ที่ตัว Regenerative ถ้าความร้อนที่ปล่อยออกมาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และการเพิ่มความร้อนและการคายความร้อนเกิดภายใต้กระบวนการอุณหภูมิคงที่แล้ว ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{th} = 1 - T_1/T_4 \quad (1.50)$$

ซึ่งก็จะเท่ากับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์ กล่าวคือ เมื่อใช้ตัว Regenerative การคายความร้อนที่เกิดจากกระบวนการความดันคงที่ จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด ประสิทธิภาพของวัฏจักรอีริกสันก็จะเท่ากับวัฏจักรคาร์โนต์ การทำงานก็จะขึ้นอยู่กับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของทั้งสองแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง และแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ จากแผนภาพ T-s พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งเอียงจะมีขนาดที่เท่ากันแต่เนื่องจากในเครื่องอัด (Compressor) การอัดที่อุณหภูมิคงที่ หรือการขยายตัวที่ความดันคงที่ในเครื่องกังหันนั้นเป็นไปได้ วัฏจักรอีริกสันในความเป็นจริงแล้วจะไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้

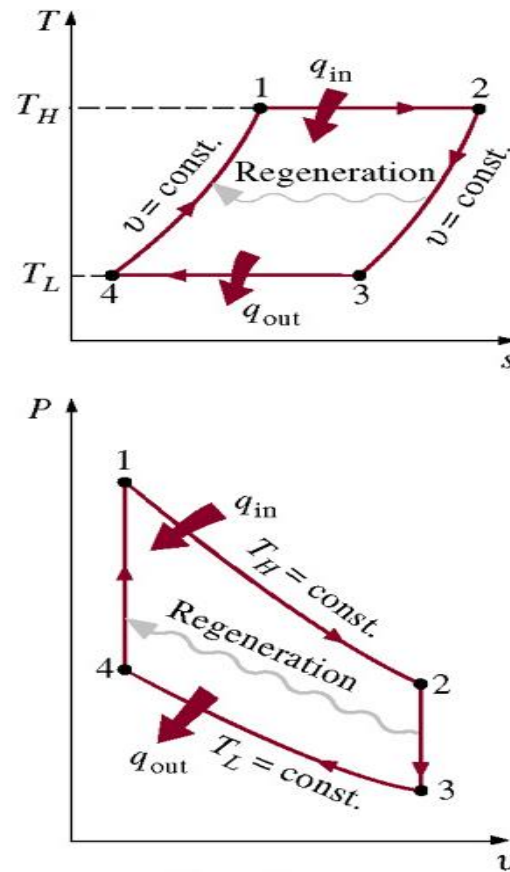


รูปที่ 1.19 วัฏจักรออตโต

วัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling cycle)

วัฏจักรสเตอร์ลิงแสดงดังรูปที่ 1.20 ซึ่งเป็นการแทนที่กระบวนการความดันคงที่ 2 กระบวนการในวัฏจักรออตโตด้วย การเปลี่ยนแปลงแบบปริมาตรคงที่นี้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{th} = \frac{(k-1)(\tau-1)\ln\epsilon}{[(\tau-1) + \tau(k-1)\ln\epsilon]} \quad (1.51)$$



รูปที่ 1.20 วัฏจักรสเตอร์ลิง

ซึ่งก็จะคล้ายคลึงกับในกรณีของวัฏจักรอีริคสัน ภายใต้กระบวนการปริมาตรคงที่ เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เพิ่มเข้าไป และปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจะเท่ากัน ถ้าที่ตัว Regenerative สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ได้ทั้งหมด การให้และรับความร้อนก็จะกลายเป็นกระบวนการอุณหภูมิกคงที่ ซึ่งประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีของวัฏจักรนี้ก็จะเท่ากับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์

วัฏจักรสเตอร์ลิงเป็นวัฏจักรที่มีประวัติอันยาวนาน แต่จะมีปัญหาทางด้านเทคนิคอยู่ ดังนั้นจึงไม่ค่อยนิยมถูกนำมาใช้งานมากนัก ในการใช้งานจริงของไหลทำงานที่ใช้กันในวัฏจักรนี้ได้แก่ อากาศ ฮีเลียม และไฮโดรเจน ในปัจจุบันก็จะใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) หรือความร้อนทั้งเป็นแหล่งให้ความร้อน เครื่องสเตอร์ลิงนี้จัดว่าเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกชนิดหนึ่ง

1.6.2 วัฏจักรไอน้ำ (Steam cycle)

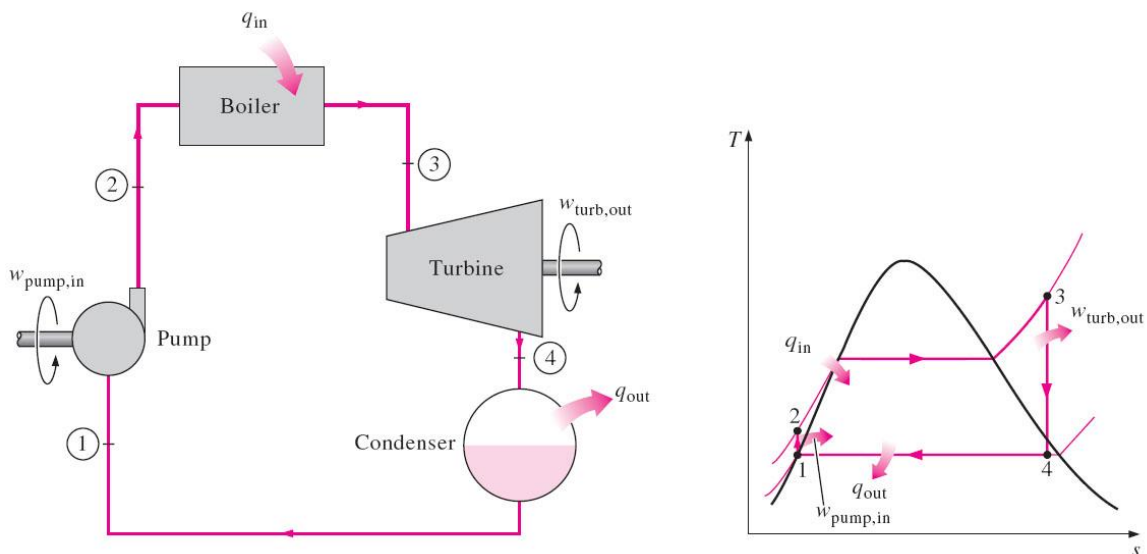
วัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle)

อุปกรณ์ที่ให้งานออกมาโดยการใช้ไอน้ำเป็นของไหลทำงานจะเรียกว่า “โรงจักรกำลังไอน้ำ (Steam power plant) หรือ Steam plant” วัฏจักรที่เป็นพื้นฐานของโรงจักรกำลังไอน้ำเรียกว่า “วัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle)” หรือเรียกว่า “วัฏจักรคลอเซียส (Clausius cycle)” ของไหลทำงานที่ใช้ในโรงจักรสร้างกำลังส่วนมากแล้วจะเป็นน้ำ ในระหว่างที่วัฏจักรดำเนินไปนั้นจะมีการระเหย และการควบแน่นของไอน้ำสลับกันไป ในกรณีที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ก็อาจจะใช้ของไหลทำงานที่เป็นพวกสารอินทรีย์ (organic matter) ที่มีจุดเดือดต่ำๆ

โครงสร้างพื้นฐานของโรงจักรกำลังไอน้ำ ได้แสดงให้ดูดังในรูปที่ 1.21 ซึ่งก็จะประกอบไปด้วย หม้อไอน้ำ (Boiler) กังหันไอน้ำ (Steam turbine) เครื่องควบแน่น (Condenser) และปั๊มน้ำ (Pump) ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ และที่ความดันสูงที่เกิดที่หม้อไอน้ำ จะให้งานโดยการขยายตัวแบบแอดิเอแบติกที่ย้อนกลับได้ที่กังหันไอน้ำ และไอน้ำที่ออกมาจากกังหันไอน้ำก็จะถูกทำให้เย็นตัวลง และควบแน่นกลายเป็นน้ำอัดตัวที่สภาวะที่ 1 น้ำอัดตัวนี้ก็จะถูกปั๊ม ทำให้เกิดการอัดตัวแบบแอดิเอแบติกที่ย้อนกลับได้ กลายเป็นน้ำอัดตัวความดันสูงก่อนเข้าสู่หม้อไอน้ำ อีกครั้งที่สภาวะที่ 2 ภายในหม้อไอน้ำ จะมีการให้ความร้อนภายใต้ความดันคงที่ ก็จะกลายเป็นของเหลวอัดตัว ต่อจากนั้น ก็จะกลายเป็นไอน้ำอัดตัว และไอน้ำร้อนยิ่งยวดในสภาวะที่ 3 อีกครั้ง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีของวัฏจักรแรงคิน หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\eta_{th} &= \frac{W}{Q_1} = \frac{(W_t - W_p)}{Q_1} = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \\ &= \frac{[(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)]}{(h_3 - h_2)} = 1 - \frac{(h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)}\end{aligned}\quad (1.52)$$



รูปที่ 1.21 วัฏจักรอุดมคติ แรงคิน

ในวัฏจักรแรงคิน งานของปั๊มน้ำนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับงานที่เกิดมาจากกังหันแล้วถือว่าน้อยมาก ในเวลาคำนวณสามารถตัดงานที่ใส่เข้าปั๊มทิ้งไปได้ ซึ่งจะได้ว่า $h_2 = h_1$ ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการ

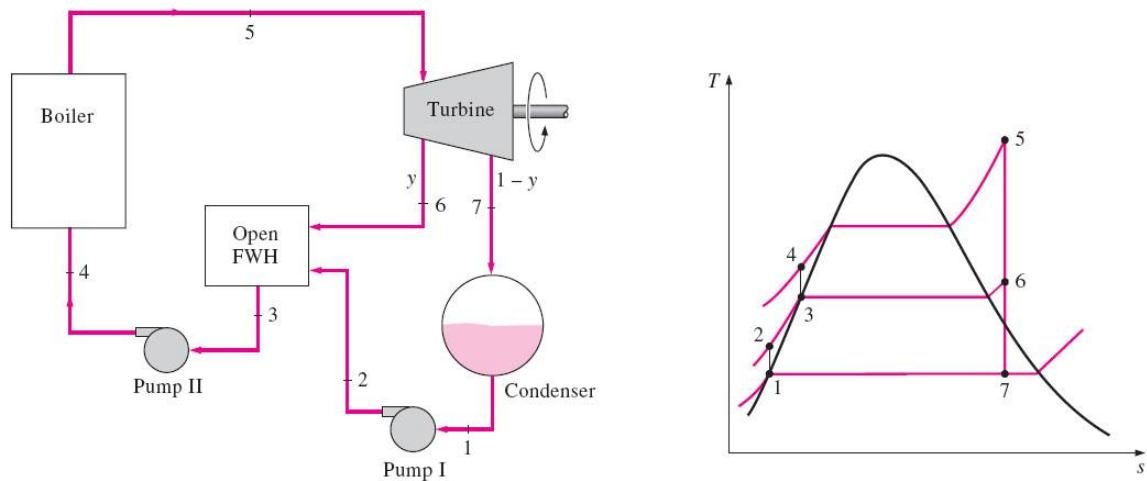
$$\eta_{th} = W_t/Q_t = (h_3 - h_4)/(h_3 - h_2) \quad (1.53)$$

จากสมการดังกล่าว จะเห็นว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรแรงคินนั้นสามารถคำนวณได้จากค่าเอนทัลปีจำเพาะที่ตรงทางเข้า และทางออกของวัฏจักร ที่ทางเข้าหม้อไอน้ำ จะพยายามทำให้ค่าเอนทัลปีจำเพาะ h_3 ที่ตรงทางเข้าของกังหันไอน้ำมีค่ามากเข้าไว้ และพยายามทำให้ค่าเอนทัลปีจำเพาะ h_4 ที่ตรงบริเวณทางออกของกังหัน หรือตรงบริเวณที่ทางเข้าของเครื่องควบแน่น ให้น้อยเท่าที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งก็จะพบว่าจะทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรมีค่าสูงขึ้นได้ โดยทั่วไปสถานะตรงทางเข้ากังหันไอน้ำจะเรียกว่า “สถานะเริ่มต้น” ส่วนความดัน P_3 ณ สถานะนี้จะเรียกว่า “ความดันเริ่มต้น” อุณหภูมิ T_3 ก็เรียกว่า “อุณหภูมิเริ่มต้น” เพื่อที่จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรแรงคินเพิ่มสูงขึ้น ควรจะทำความดันและอุณหภูมิเริ่มต้นสูงๆ เอาไว้ก่อน และควรจะทำความดันที่เครื่องควบแน่น (Condenser) (ความดันที่จะทิ้งไป) ต่ำเข้าไว้จะทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นได้

วัฏจักรรีเจนเนอเรชั่น (Regeneration cycle)

ในวัฏจักรแรงคิน เมื่อไอน้ำควบแน่นที่เครื่องควบแน่น (Condenser) จะมีปริมาณความร้อนเป็นจำนวนมากถูกทิ้งไปกับน้ำหล่อเย็น ซึ่งถ้าเราสามารถลดปริมาณความร้อนทิ้งนี้ให้มีค่าน้อยลงแล้วก็สามารถคาดหวังได้ว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนก็จะสูงขึ้นด้วย ดังนั้นปริมาณไอน้ำที่ขยายตัวที่กังหันและต้องถูกควบแน่นที่เครื่องควบแน่นนี้ ถ้าเรานำความร้อนจากไอน้ำที่กำลังขยายตัวนี้ไปอุ่น หรือเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำที่เย็นกว่า ก่อนที่จะเข้าหม้อต้ม ซึ่งจะเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำต่างสถานะ วัฏจักรที่ใช้ความร้อนเหล่านี้นำไปอุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อต้มเรียกว่า “วัฏจักรรีเจนเนอเรชั่น (Regeneration cycle)” ในระหว่างที่ไอน้ำกำลังขยายตัวเราพบว่า งานที่ได้รับจากกังหันจะมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถลดปริมาณความร้อนทิ้งลงไปได้ และสามารถลดได้มากกว่าปริมาณงานที่ลดลงจากกังหันเสียอีก

ดังนั้นในวัฏจักรรีเจนเนอเรชั่นประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นกว่าวัฏจักรแรงคินธรรมดา ในการที่จะคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรรีเจนเนอเรชั่น ให้พิจารณาวัฏจักรรีเจนเนอเรชั่นของการดึงไอน้ำออกมาเป็น 2 จุด ที่จุด 6 ในรูปที่ 1.22 จะมีการดึงไอน้ำร้อนยิ่งยวดออกมา (ความร้อน) และจะถูกส่งไปเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อุปกรณ์เพิ่มความร้อนของน้ำที่มีความดันสูง



รูปที่ 1.22 วัฏจักรรีเจนเนอเรชั่นแบบ 2 ชั้น

ไอน้ำก็จะควบแน่น และเข้าสู่สภาวะ 3 ไอน้ำส่วนที่เหลืออยู่ภายหลังจากการถูกดึงออกไปใช้จุดที่ 6 จะขยายตัวที่กังหันช่วงที่เหลือ ขยายตัวเสร็จก็จะเข้าไปสู่เครื่องควบแน่น หลังจากถูกควบแน่นแล้วก็จะกลายเป็นน้ำอัดตัวที่จุด 1 น้ำอัดตัวนี้จะถูกเพิ่มความดันทำให้กลายเป็นน้ำอัดตัวจุดที่ 2 โดยปั๊มน้ำ และถูกส่งเข้าไปเพิ่มอุณหภูมิที่ Feed heater เพื่อรับความร้อนได้น้ำอัดตัวที่จุด 3 ก่อนถูกปั๊มส่งเข้าไปยังหม้อไอน้ำต่อไป

การดึงไอน้ำออกมานั้นสามารถทำได้มากถึง n ครั้ง ปริมาณไอน้ำที่ถูกดึงออกมาในแต่ละครั้งให้เป็น m_i [kg] ต่อปริมาณไอน้ำที่เข้ากังหัน 1 kg ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรรีเจนเนอเรชั่นสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{th} = \frac{(h_5 - h_6) - m_6(h_6 - h_7) - m_1(h_2 - h_1) - m_3(h_4 - h_3)}{(h_5 - h_4)} \quad (1.54)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการนี้ จะเห็นว่า ยิ่งค่าจำนวนครั้งของ n เพิ่มขึ้นก็ยิ่งจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีสูงมากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่า n มากขึ้นจะทำให้อัตราส่วนการเพิ่มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นไม่มาก โดยทั่วไปจะใช้ค่า n ที่มากที่สุดเป็น 8

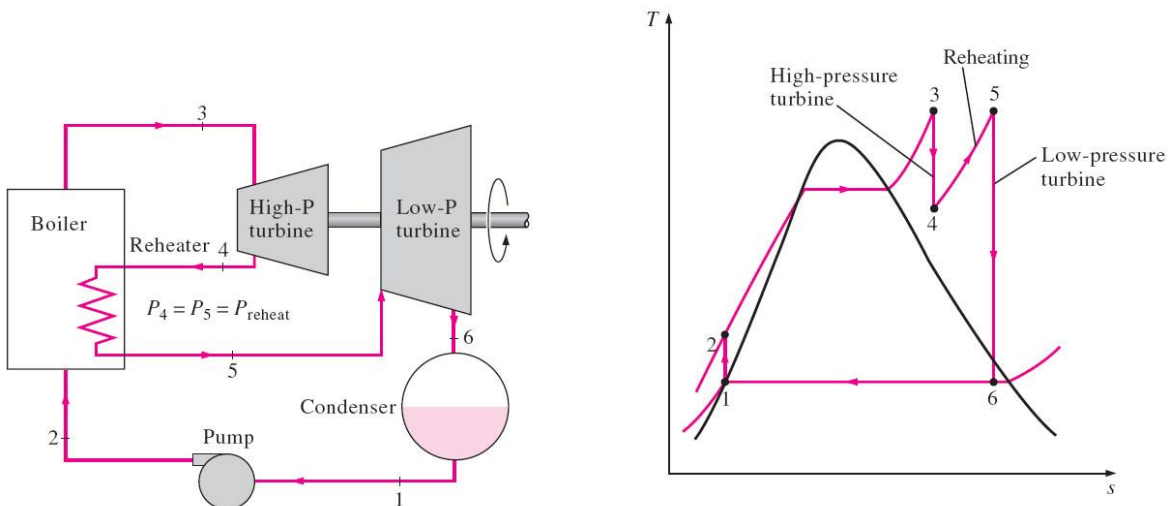
วัฏจักรรีฮีท (Re-heat cycle)

ในวัฏจักรแรงคินนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะสูงขึ้นถ้าทำให้ความดันเริ่มต้นสูง แต่จะทำให้ไอน้ำที่ทางออกของกังหันเปียกมากขึ้นซึ่งถือเป็นข้อเสีย ดังนั้นเพื่อที่ไม่ทำให้คุณภาพไอน้ำที่ตรงทางออกของกังหันลดลงเราจึงนำไอน้ำที่ทางออกจากกังหันช่วงแรกส่งไปรับความร้อนที่เตาหม้อไอน้ำ และภายหลังจากที่ได้เพิ่มความร้อนซ้ำให้แล้ว ก็จะทำให้ไปขยายตัวที่กังหันต่อไป วัฏจักรแบบนี้จะเรียกว่า “วัฏจักรรีฮีท (Re-heat cycle)” วัฏจักรรีฮีทนอกจากจะทำให้ปริมาณความร้อนที่หม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นแล้ว งานที่ได้จากกังหันก็ยังจะเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นจะเห็นว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของทั้งระบบโดยรวมแล้วจะดีขึ้น

รูปที่ 1.23 เป็นรูปที่แสดงแผนภาพ T-s ในกรณีของการทำรีฮีทครั้งที่หนึ่งที่กังหัน เมื่อไอน้ำขยายตัวจากสถานะที่ 3 ไปสู่สถานะที่ 4 นำไอน้ำที่ไหลออกไปเพิ่มความร้อนซ้ำอีกที่อุปกรณ์รีฮีทที่หม้อไอน้ำ หลังจากนั้นก็จะส่งกลับไปที่กังหัน เพื่อขยายตัวในช่วงต่อไป สถานะที่ทางออกของกังหันจะเป็นสถานะที่ 6 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางทฤษฎีสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{th} = \frac{(h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)}{[(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)]} \quad (1.55)$$

ในกรณีนี้ก็เหมือนกันกับหัวข้อที่แล้ว ซึ่งถ้าทำให้จำนวนครั้งของการรีฮีทเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากจำนวนครั้งที่เพิ่มขึ้น พบว่าต้องมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มตามไปด้วย ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วจะรีฮีทประมาณ 1 – 2 ครั้ง แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพอาจจะลดลงได้ถ้าความดันของการรีฮีทมีค่าต่ำ ดังนั้นในการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพจำเป็นที่จะต้องเลือกความดันที่ใช้ในการทำรีฮีทด้วย ความดันขั้นต่ำของการทำรีฮีทที่จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นจะอยู่ที่ประมาณ 15-30% ของความดันเริ่มต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้ค่านี้เป็นมาตรฐานกันโดยทั่วไป



รูปที่ 1.23 การทำรีฮีท 1 ครั้ง ของวัฏจักรรีฮีท

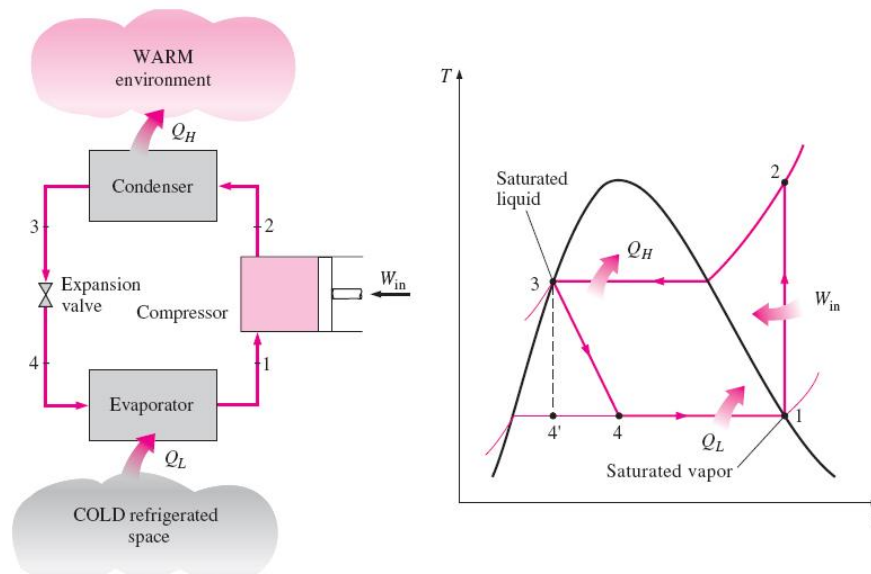
1.6.3 วัฏจักรทำความเย็นกับวัฏจักรปั๊มความร้อน (Refrigerating cycle and heat pump cycle)

การที่ระบบรับงานจากภายนอกมาเพื่อใช้ในการเคลื่อนย้ายโอนความร้อน จะเรียกว่า “วัฏจักรทำความเย็น หรือ วัฏจักรปั๊มความร้อน (Refrigerating cycle and heat pump cycle)” วัฏจักรของเครื่องทำความเย็นกับวัฏจักรของปั๊มความร้อนนั้นจะคล้ายคลึงกับวัฏจักรแรงคิน เพียงจะแตกต่างกันที่ทิศทางเท่านั้น ดังนั้นในบางครั้งจึงอาจจะเรียกววัฏจักรนี้ว่า “วัฏจักรแรงคิน ย้อนกลับได้ (Reversible rankine cycle)” ในวัฏจักรของเครื่องทำความเย็น และปั๊มความร้อนนั้นต้องการ Compression stroke ซึ่งจะแยกออกเป็น การอัดโดยเครื่องอัด (Compressor) ซึ่งเรียกว่า “วัฏจักรทำความเย็นอัดไอ (Vapor compression refrigerating cycle)” กับวัฏจักรแบบ “Absorption refrigerant cycle” ซึ่งเป็นวัฏจักรที่ใช้การเปลี่ยนแปลงของความดันไออันเนื่องมาจากความเข้มข้นกับอุณหภูมิของ Aqueous solution ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะ วัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอเท่านั้น

วัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ (vapor compression refrigerating cycle)

โครงสร้างของวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 1.24 ซึ่งก็คล้ายกันกับวัฏจักรแรงคิน ที่เครื่องระเหย (Evaporator) ไอของสารทำความเย็น (Refrigerant) จะถูกอัดโดยกระบวนการอัดแบบติดกลายเป็นไอร้อนยิ่งยวดที่มีอุณหภูมิและความดันสูง จากนั้นจะไปถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (Condenser) โดยกระบวนการความดันคงที่ แล้วกลายเป็นของเหลว แล้วผ่านไปสู่เครื่องรับของเหลวแล้วเข้าไปสู่วาล์วขยายตัว (Expansion valve) ที่วาล์วขยายตัวจะเกิดการขยายตัวแบบทรอตลิง (การขยายตัวแบบลดความดัน Throttling) กลายเป็นของผสมอิ่มตัวนี้ก็จะเข้าสู่เครื่องระเหย ทำการรับความร้อน และขยายตัวแบบความดันคงที่ จากนั้นก็จะกลายเป็นไออิ่มตัวอีกครั้ง

แผนภาพ T-s ของการทำความเย็นแบบอัดไอแสดงดังในรูปที่ 1.24 จากสถานะที่ 1 สู่สถานะที่ 2 จะเป็นกระบวนการอัดไอเซนโทรปิก จากสถานะที่ 2 สู่สถานะที่ 3 ที่เครื่องควบแน่นจะเป็นการคายความร้อนแบบความดันคงที่ จากสถานะที่ 3 สู่สถานะที่ 4 ที่วาล์วทรอตลิง (วาล์วลดความดัน) จะเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเอนทัลปีคงที่ ที่สถานะที่ 4 สู่สถานะที่ 1 ที่เครื่องระเหยก็จะเป็นการให้ความร้อนแบบความดันคงที่



รูปที่ 1.24 วัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ

การหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในวัฏจักรนี้ จากรูปจะแสดงให้เห็นว่า ที่สถานะที่ 1 ไปสู่สถานะที่ 2 จะเป็นการอัดจากสถานะไออิ่มตัว ความร้อนที่เข้า-ออกจากส่วนต่างๆ ของระบบสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ เมื่อให้มวลสารทำความเย็นที่หมุนเวียนในระบบเป็น $\dot{m}$ [kg/s]

$$\begin{aligned} \text{ที่เครื่องระเหย (evaporator)} \quad \dot{Q}_e &= \dot{m}q_e = \dot{m}(h_1 - h_4) \\ \text{ที่เครื่องควบแน่น (condenser)} \quad \dot{Q}_c &= \dot{m}q_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \\ \text{ที่เครื่องอัด (compressor)} \quad \dot{W} &= \dot{m}(h_2 - h_1) \end{aligned} \quad (1.56)$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทที่เครื่องระเหย (evaporator) ต่อ 1 kg ของสารทำความเย็น q_e จะเรียกว่า “โหลดของการทำความเย็น (refrigerating effect)” สัมประสิทธิ์การทำงานของเครื่องทำความเย็น (หรือเรียกว่า “Coefficient of Performance [COP]”) $\mathcal{E}_r$ สามารถแสดงเป็นสมการได้ว่า

$$\mathcal{E}_r = \dot{Q}_e / \dot{W} = (h_1 - h_4) / (h_2 - h_1) \quad (1.57)$$

ในกรณีของปั๊มความร้อน ปริมาณความร้อนที่คายออกมาที่เครื่องควบแน่น กล่าวคือ Q_c จะเป็นค่าที่สำคัญ โดยสัมประสิทธิ์การทำงานของปั๊มความร้อน $\mathcal{E}_h$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathcal{E}_h = \dot{Q}_c / \dot{W} = (h_2 - h_3) / (h_2 - h_1) \quad (1.58)$$

สมรรถนะการทำความเย็นและปั๊มความร้อน (Coefficient of performance, COP)

สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น คือ อัตราส่วนขององค์ประกอบการทำความเย็น (การดูดซึมความร้อน) ต่องานที่ใช้ในการอัด

สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของปั๊มความร้อน คือ อัตราส่วนของความร้อนที่ระบบคายให้กับสิ่งแวดล้อม ต่องานที่ใช้ในการอัด

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของทั้งเครื่องทำความเย็น และปั๊มความร้อนสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\text{COP}_R = \text{RE} / W \quad (1.59)$$

เมื่อ	COP_R	คือ	สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น
	RE	คือ	ผลของการทำความเย็น
	W	คือ	งานที่ใช้ในการอัด (Work of compressor)
	COP_{HP}		$= Q_R / W$

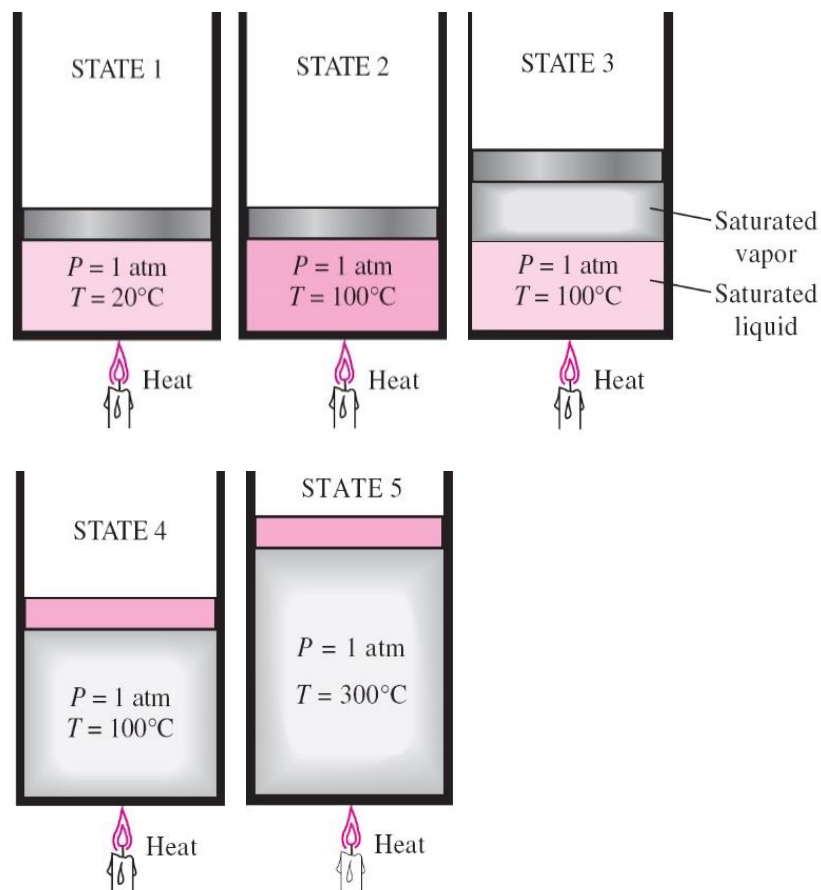
(1.60)

เมื่อ	COP_{HP}	คือ	สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของปั๊มความร้อน
	Q_R	คือ	ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อม

1.7 ตารางไอน้ำ (Stream table)

1.7.1 คุณสมบัติของไอน้ำ (Properties of stream)

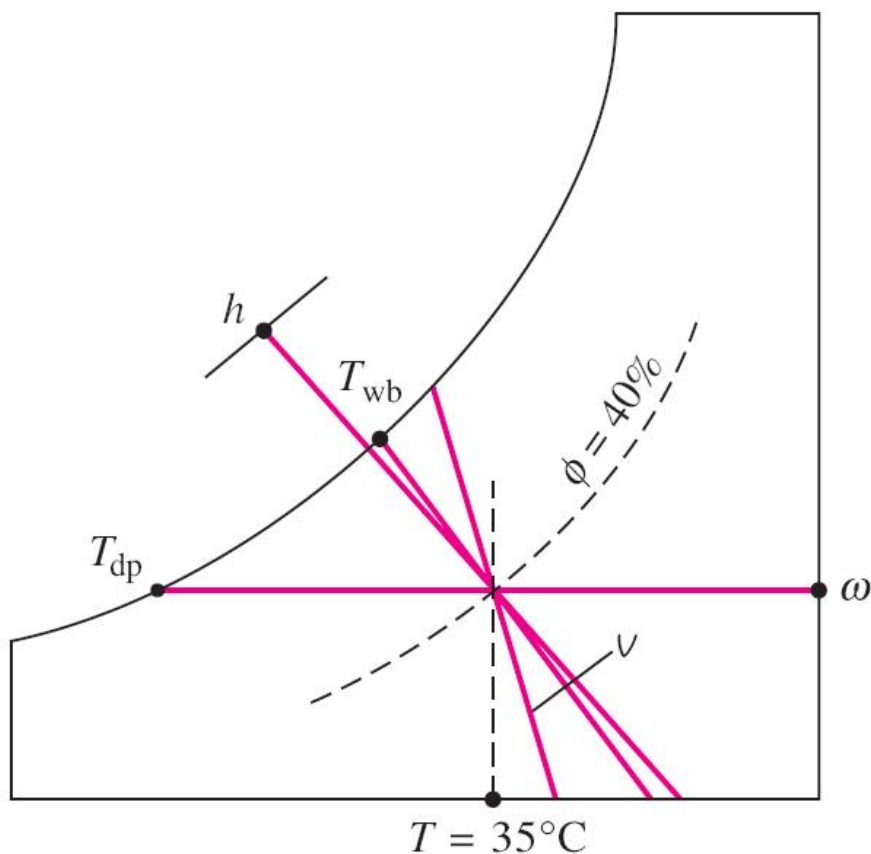
ในเทอร์โมไดนามิกส์นั้น งานที่ได้ส่วนใหญ่ได้มาจากการขยายตัวของก๊าซเป็นส่วนมาก ในบรรดาก๊าซทั้งหลาย ก็จะมีก๊าซในอุดมคติที่สามารถแสดงสมการออกมาเป็นสมการของสภาวะ (Equation of state) ได้แต่ในความเป็นจริงแล้วจะมีก๊าซที่ไม่สามารถแสดงได้ด้วยสมการง่ายๆ ดังเช่นก๊าซในอุดมคติ ซึ่งจะเรียกก๊าซเหล่านั้นว่า “ก๊าซจริง (Real gas)” เมื่อพูดถึงก๊าซจริงแล้วสำหรับวิศวกรผลิตกำลังโดยทั่วไปจะกล่าวถึงไอน้ำ ความสัมพันธ์ทางสภาวะของไอน้ำค่อนข้างที่จะยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากไม่สามารถแสดงออกมาในรูปสมการสภาวะอย่างง่ายได้ ดังนั้นส่วนมากจึงนิยมแสดงโดยใช้แผนภาพ หรือตาราง ดังที่แสดงในรูปที่ 1.25 ของเหลว (น้ำ) เมื่อได้รับความร้อน ปริมาตรจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง แต่อุณหภูมิ (ของน้ำ) จะเพิ่มขึ้น (สภาวะที่ 1 ไปยังสภาวะที่ 2) แต่เมื่อเพิ่มความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง (จุดเดือด) อุณหภูมิของของเหลวจะไม่เพิ่มขึ้น ที่สภาวะนี้ ถ้ายังคงเพิ่มความร้อนเข้าไปอีก อุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลงแต่ปริมาณไอน้ำจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังสภาวะที่ 3 ในรูปในภาชนะที่บรรจุของเหลวนั้น เมื่อของเหลวระเหยกลายเป็นไอหมดแล้วดังสภาวะที่ 4 เพิ่มความร้อนเข้าไปอีกปริมาตรก็จะเพิ่มมากขึ้นอีกด้วยแต่สถานะยังคงเป็นไอเหมือนเดิม



รูปที่ 1.25 การเกิดไอน้ำภายใต้สภาวะความดันคงที่

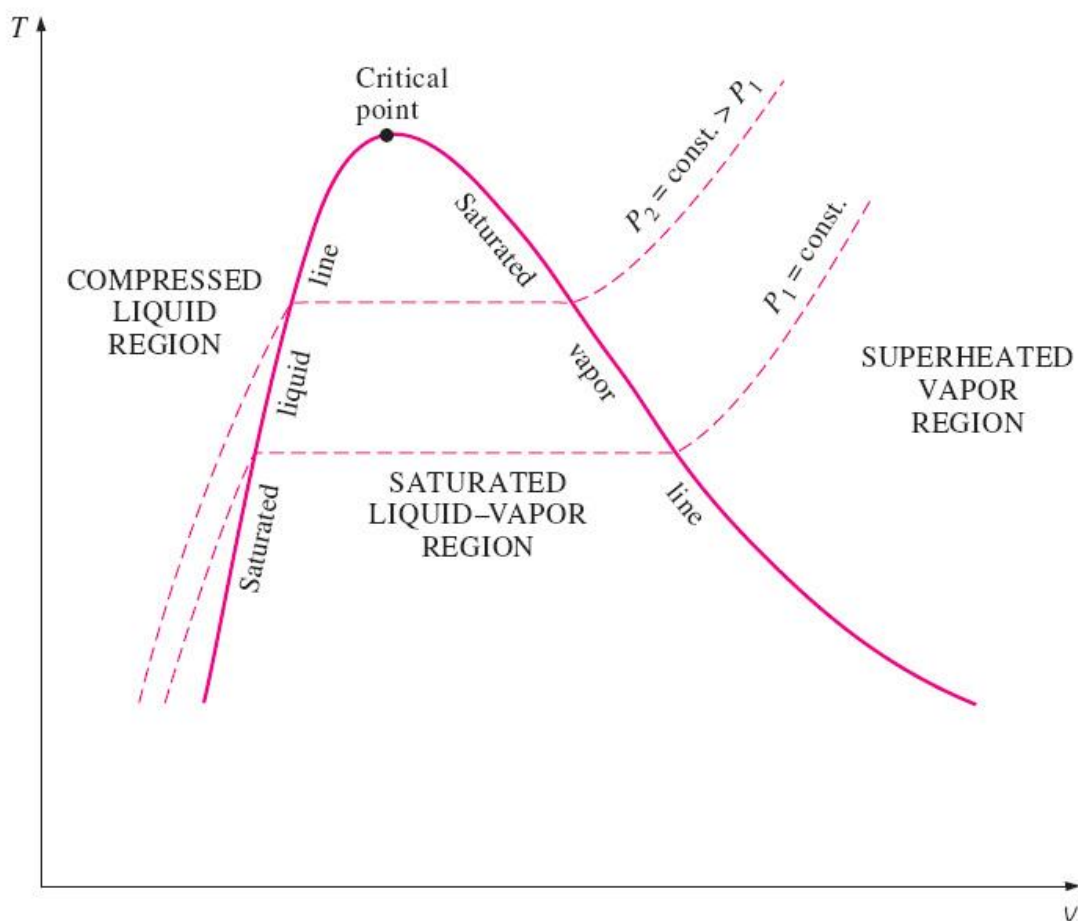
การเพิ่มความร้อนให้กับน้ำในสถานะของเหลวภายใต้สภาวะความดันคงที่ ณ อุณหภูมิใดๆ เมื่ออุณหภูมิของน้ำคงที่จะเกิดไอน้ำขึ้นอุณหภูมิที่จุดนี้จะถูกเรียกว่า “อุณหภูมิอิ่มตัว (Saturated temperature)” และของเหลวที่อุณหภูมิอิ่มตัวนี้เรียกว่า “ของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid)” ของเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอิ่มตัวนี้จะถูกเรียกว่า “ของเหลวอัด (Compressed liquid)” ถ้าของไหลนี้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว ณ ความดันเดียวกัน อุณหภูมิอิ่มตัวนี้จะเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับความดัน โดยถ้าความดันสูงอุณหภูมิอิ่มตัวก็จะสูงตามไปด้วย

ภายหลังจากที่มีไอน้ำเกิดขึ้นภายในภาชนะที่บรรจุไอน้ำจะมีทั้งไอน้ำ และของเหลวผสมกันอยู่สถานะนี้ถูกเรียกว่าสถานะของผสมอิ่มตัว (Saturated mixture) เปอร์เซ็นต์ของไอน้ำที่ผสมอยู่ในของผสมอิ่มตัวถูกกำหนดด้วยค่าคุณภาพของไอ (Quality) โดยที่ค่าคุณภาพมีค่าเป็นศูนย์สำหรับของเหลวอิ่มตัว (ตำแหน่งที่ 2) และมีค่าเป็นหนึ่ง สำหรับไออิ่มตัว (Saturated vapor) (ตำแหน่ง 4) ปริมาณความร้อนที่เพิ่มเข้าไปเพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอ โดยอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลง ปริมาณความร้อนนี้เรียกว่า “ความร้อนแฝง” ความร้อนแฝงที่ถูกใช้ในการสร้างไอน้ำนี้จะถูกเรียกว่า “ความร้อนในการระเหย (Heat of evaporation)” หรือเรียกว่า “ความร้อนแฝงในการระเหย (Latent heat of evaporation)” ความร้อนที่ใช้ในการระเหยนั้นจะเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับความดัน (และอุณหภูมิ) ถ้าความดันสูงค่าความร้อนแฝงนี้ก็จะมิต่ำลง



รูปที่ 1.26 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่ความดันคงที่

เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปให้กับไอน้ำอิ่มตัว อุณหภูมิของไอน้ำจะเพิ่มตามเส้นความดันคงที่ไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวนี้เรียกว่า “ไอน้ำร้อนยิ่งยวด หรือ ไอดง (Superheated vapor)” ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิไอน้ำกับอุณหภูมิอิ่มตัวจะเรียกว่า “องศาของความร้อนยิ่งยวด (Degree of superheat)” รูปที่ 1.26 แสดงกระบวนการเกิดไอน้ำในแผนภาพ T-s ของเหลวอัดที่สภาวะที่ 1 เมื่อเพิ่มความร้อนเข้าไปก็จะกลายเป็นของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะที่ 2 หลังจากนั้นมีการเพิ่มปริมาตรอย่างรวดเร็วก็จะกลายเป็นไอน้ำอิ่มตัวที่สภาวะที่ 4 หลังจากนั้น ก็จะกลายเป็นไอน้ำร้อนยิ่งยวดในกรณีที่มีการเพิ่ม หรือลดความดันของไอน้ำเส้นทางการเปลี่ยนแปลงก็จะเปลี่ยนแปลงตามด้วย รูปที่ 1.27 แสดงแผนภาพ T-v สำหรับกรณีอุณหภูมิและความดันใด ๆ เส้นทางซ้ายของโดมจะเรียกว่า “เส้นของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid line)” และเส้นทางขวาจะถูกรเรียกว่า “เส้นไอน้ำอิ่มตัว (Saturated vapor line)” เมื่อความดันสูงขึ้นระยะห่างของทั้งสองเส้นจะเข้าใกล้กันมากขึ้น และจุดที่เส้นสองเส้นนี้รวมตัวกันจะเรียกว่า “จุดวิกฤต (Critical point)” ความดันที่จุดวิกฤตนี้จะเรียกว่า “ความดันวิกฤต (Critical pressure)” ถ้าความดันเกิน ณ.จุดนี้การระเหยจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ ของเหลวจะเปลี่ยนเป็นไอโดยตรง ความดันที่อยู่เหนือย่านนี้ขึ้นไปจะถูกเรียกว่า “ความดันเหนือย่านวิกฤต (Supercritical pressure)” และความดันที่อยู่ต่ำกว่าย่านความดันวิกฤตจะถูกรเรียกว่า “ความดันต่ำกว่าวิกฤต (Sub critical pressure)” และเมื่อเปลี่ยนความดันโดยเพิ่มความร้อนเข้าไปเช่นเดิม ก็จะได้เส้นในลักษณะเดียวกันแต่ที่ความดันมากกว่า และน้อยกว่าก็จะได้เส้นที่อยู่เหนือ และต่ำกว่าเส้นที่แสดงไว้ตามลำดับ



รูปที่ 1.27 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ณ ความดันใดๆ

1.7.2 คุณสมบัติของผสมอิ่มตัว (Properties of saturated liquid)

ค่าคุณสมบัติของของผสมอิ่มตัวขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติ ของของเหลวอิ่มตัวกับค่าคุณสมบัติของไอน้ำอิ่มตัว ดังนั้นในการหาค่าคุณสมบัติของของผสมอิ่มตัวเราจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบอัตราส่วนผสม สมมุติว่าในของผสมอิ่มตัว 1 kg มีไอน้ำอิ่มตัวผสมอยู่เป็นปริมาณ x [kg] และมีของเหลวอิ่มตัวผสมอยู่เป็น ปริมาณ $(1-x)$ kg โดย x จะถูกเรียกว่า “ค่าคุณภาพของไอ” (Quality) สภาวะของของผสมอิ่มตัวจะถูกกำหนด มาโดยใช้ค่าคุณภาพนี้ เมื่อกำหนดค่าคุณภาพมา และใช้ค่าคุณสมบัติของของเหลวอิ่มตัวกับค่าคุณสมบัติของ ไอน้ำอิ่มตัว ค่าคุณสมบัติของของผสมอิ่มตัวจะสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$v = (1-x)v' + xv'' = v' + x(v'' - v') \quad (1.61)$$

$$u = (1-x)u' + xu'' = u' + x(u'' - u') \quad (1.62)$$

$$\begin{aligned} h &= (1-x)h' + xh'' = h' + x(h'' - h') \\ &= h' + x\gamma \end{aligned} \quad (1.63)$$

$$s = (1-x)s' + xs'' = s' + x(s'' - s') \quad (1.64)$$

ในการแทนค่าคุณสมบัติของ ของเหลวอิ่มตัวกับไอ เราจะใช้สัญลักษณ์ $[\cdot]$ สำหรับของเหลวอิ่มตัว และใช้ สัญลักษณ์ $[\cdot]'$ สำหรับไอน้ำอิ่มตัว ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไป นอกจากนั้นจากคำจำกัดความของความร้อนใน การระเหยที่กำหนดว่า $h'' - h' = \gamma$ จากความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \gamma &= h'' - h' = (u'' + Pv'') - (u' + Pv') \\ &= (u'' - u') + P(v'' - v') \end{aligned} \quad (1.65)$$

เทอมที่ 1 ของสมการที่ (1.65) ทางด้านขวามือจะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในที่เกิดขึ้นจาก กระบวนการระเหย ส่วนเทอมที่ 2 จะแสดงถึง งานที่กระทำกับสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรตอนที่เกิดการระเหย กล่าวคือตอนที่เกิดไอน้ำขึ้น ไม่เพียงแค่พลังงานภายในที่เพิ่มเท่านั้น ปริมาตรก็ เพิ่มขึ้น และจากการที่ปริมาตรเพิ่มขึ้นนี้เองงานจากภายนอกจึงเป็นสิ่งจำเป็น การคิดโดยการแบ่ง แยกความ ร้อนของการระเหยออกเป็น 2 ส่วนแบบนี้ เราจะเรียกส่วนของพลังงานภายในที่เพิ่มขึ้นว่าเป็น “ความร้อนของ การระเหยกลายเป็นไอภายใน (Internal heat of vaporization) และเรียก (เทอมที่ 2) งานเชิงปริมาตรว่า เป็น “ความร้อนของการระเหยกลายเป็นไออนอก (External heat of vaporization)” นอกจากนั้น ในกระบวนการระเหยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอิ่มตัวคงที่ ในระหว่างนี้ เมื่อมีความร้อนของการระเหย γ เพิ่ม เข้าไป เอนโทรปี ก็เปลี่ยนแปลงจาก s' เป็น s'' ความร้อนในการระเหยจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$s'' - s' = \gamma/T_s \quad (1.66)$$

โดยที่ T_s จะเป็นอุณหภูมิอิ่มตัว ที่แสดงอยู่ในรูปของอุณหภูมิสมบูรณ์ และถ้าใช้ความสัมพันธ์นี้ สมการที่ (1.64) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$s = s' + x\gamma/T_s \quad (1.67)$$

1.7.3 แผนภาพไอน้ำและตารางไอน้ำ (Stream diagram and stream table)

ตารางไอน้ำนั้นสามารถแบ่งแยกออกเป็นตารางไอน้ำอิ่มตัวกับตารางไอน้ำร้อนยิ่งยวด (ตารางไอน้ำ) ในตารางไอน้ำอิ่มตัวนั้นจะแสดงค่าของ เอนโทรปีจำเพาะ ค่าเอนทัลปีจำเพาะ พลังงานภายในจำเพาะ ค่าปริมาตรจำเพาะของไอน้ำอิ่มตัว และของเหลวอิ่มตัว ส่วนในตารางของไอน้ำร้อนยิ่งยวดนั้นจะแสดงค่า ปริมาตรจำเพาะ ค่าเอนทัลปีจำเพาะ พลังงานภายในจำเพาะ และค่าเอนโทรปีจำเพาะของไอน้ำร้อนยิ่งยวด ในย่านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว โดยทั่วไปแล้วตารางไอน้ำอิ่มตัวนั้นสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ตารางไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันมาตรฐาน และตารางไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิมาตรฐาน ซึ่งจะใช้ใน กรณีที่ในตารางไอน้ำนี้ ค่ามาตรฐานของเอนทัลปีจำเพาะ และค่าเอนโทรปีจำเพาะนั้น จะใช้อ้างอิงที่จุดไตร มาตรของน้ำ (คือที่ 0.01°C , ที่ 4.549 มม. ความดันปรอท) ที่จุดไตรมาตรนี้ จะให้คำจำกัดความว่า $u' = 0$, $s' = 0$ โดยปกติแล้วแผนภาพไอน้ำที่นิยมใช้จะเป็นแผนภาพ P-v และแผนภาพ T-s สำหรับแผนภาพที่ถูก นำไปใช้งานจริงแล้วส่วนมากสำหรับไอน้ำจะเป็นแผนภาพ h-s และสำหรับสารทำความเย็น (Refrigerant) ก็จะใช้แผนภาพ P-h ไอน้ำนั้นโดยส่วนใหญ่แล้วจะถูกนำไปใช้กับกังหัน (turbine) เพื่อผลิตงานออกมา การขยายตัวในกังหันนั้นจะเป็นกระบวนการแอดิเอแบติก เนื่องจากงานที่เกิดขึ้นจะเท่ากับค่าเอนทัลปีที่ เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในการใช้งาน จะใช้แผนภาพที่มีแกนแสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่าเอนทัลปีจำเพาะ กับค่าเอนโทรปีจำเพาะ ซึ่งแผนภาพนี้ตั้งตามชื่อของผู้ที่สนับสนุนแผนภาพนี้ขึ้นมาและเรียกชื่อแผนภาพนี้ว่า “แผนภาพโมลเลอร์ของน้ำ (Mollier chart)” ดังแสดงให้ดูในรูปที่ 1.28 ในแผนภาพนี้จะถูกแบ่งออกเป็น ย่านซ้ายล่างซึ่งเป็นส่วนของ ของเหลวอิ่มตัว กับทางด้านขวาบนซึ่งเป็นย่านของไอน้ำร้อนยิ่งยวด กังหันไอน้ำ (Steam turbine) จะใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวด (เป็นสารทำงาน) และเนื่องจากภายหลังจากการขยายตัวแล้วไอน้ำ ก็จะกลายเป็นไอน้ำเปียกเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นค่าของ ของเหลวอิ่มตัวจึงถูกละเว้นไป ส่วนเส้นของไอน้ำอิ่มตัวถูก ใช้บ่อยๆ ส่วนนี้จึงถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น

สารทำความเย็นส่วนมากจะถูกใช้ในเครื่องทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน ความร้อนที่เข้า-ออก ที่ความดันคงที่เป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นแผนภาพที่ส่วนมากจะนิยมใช้กันจะเป็นแผนภาพ P-h ที่มีแกนตั้งเป็น ความดัน และแกนนอนเป็นค่าเอนทัลปีจำเพาะ

1.7.4 การเปลี่ยนแปลงสถานะของไอน้ำ

กระบวนการความดันคงที่ (Constant pressure process)

ที่หม้อไอน้ำ (Boiler) ไอน้ำร้อนยิ่งยวด เมื่อทำการควบแน่นในภาชนะควบแน่นแล้ว ถ้ากำหนดให้ ความดันมีค่าคงที่แล้ว การเข้า-ออก ของปริมาณความร้อนจะสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{12} = m(h_2 - h_1) \quad (1.68)$$

หมายเหตุ สำหรับไอน้ำอิ่มตัวแล้ว ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงความดันคงที่นั้น อุณหภูมิของไอน้ำจะมีค่าคงที่

กระบวนการปริมาตรคงที่ (Constant volume process)

ภายในภาชนะที่ปิดสนิท ไอน้ำเมื่อได้รับความร้อนหรือถูกทำให้เย็นลง ปริมาณความร้อนที่เข้า-ออกจากภาชนะสามารถหาได้จากสมการ

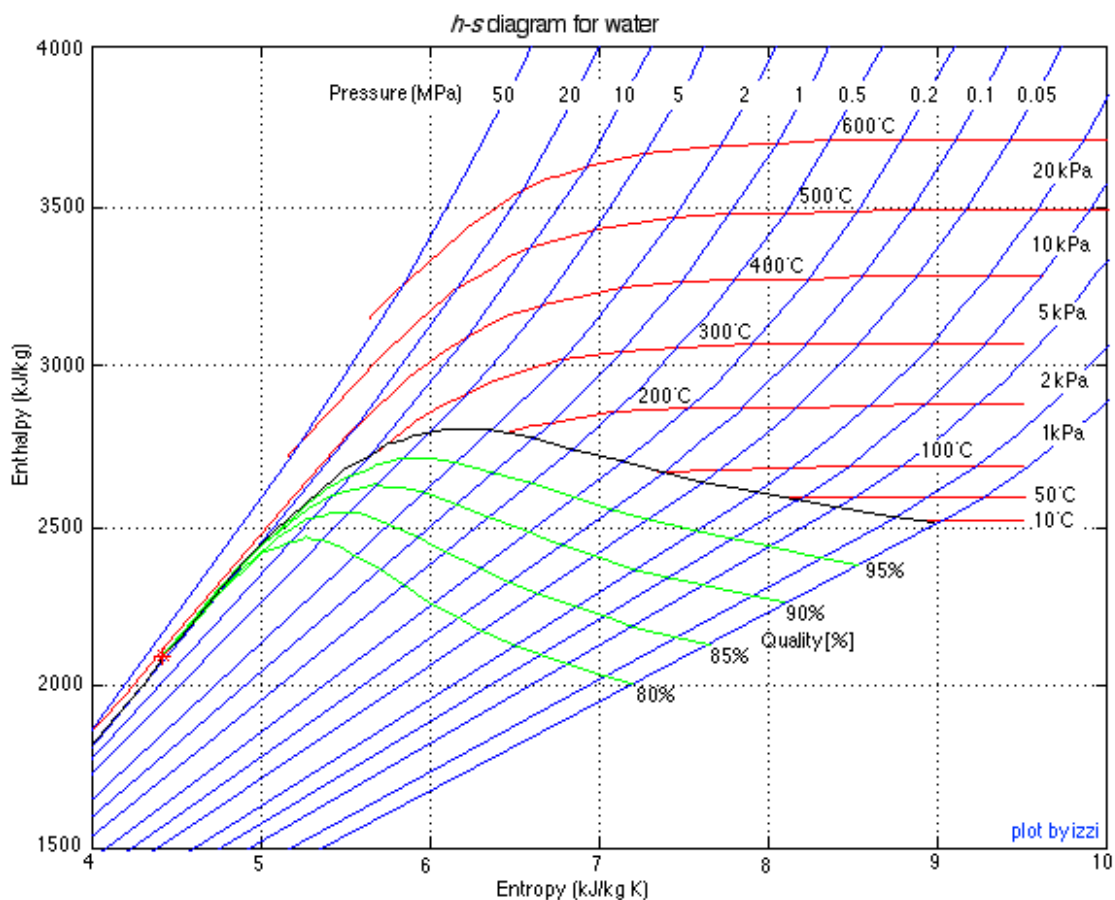
$$Q_{12} = m(u_2 - u_1) \quad (1.69)$$

ค่าพลังงานภายในจำเพาะยังสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$u = h - Pv \quad (1.70)$$

แทนสมการที่ (1.68) ลงไปในสมการที่ (1.67) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{12} &= m(h_2 - P_2v) - (h_1 - P_1v) \\ &= m\{(h_2 - h_1) - v(P_2 - P_1)\} \end{aligned} \quad (1.71)$$



รูปที่ 1.28 แสดงแผนภาพโมเลียร์ของน้ำ

ตารางที่ 1.1 แสดงตารางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอน้ำอิ่มตัว

Press. kPa P	Sat. Temp. °C T _{sat}	Specific volume m ³ /kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg	
		Sat.	Sat.	Sat.	Evap.	Sat.	Sat.	Evap.	Sat.
		Liquid V _f	Vapor V _g	Liqui h _f	h _{fg}	Vapor h _g	Liqui S _f	S _{fg}	Vapor S _g
0.6113	0.01	0.001000	206.14	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2400.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	6.204	271.93	2346.3	2616.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	5.229	283.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564

Press. MPa									
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.46	2558.0	2675.5	1.3206	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6867	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209

ตารางที่ 1.1 แสดงตารางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอน้ำอิ่มตัว (ต่อ)

Press. MPa P	Sat. Temp. °C T _{sat}	Specific volume m ³ /kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg		
		Sat. Liquid	Sat. Vapor	Sat. Liqui	Evap.	Sat.	Sat.	Evap.	Sat.
		V _f	V _g	h _f	h _{fg}	Vapor h _g	Liqui S _f	S _{fg}	Vapor S _g
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2546	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8620	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2404	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	753.02	2023.1	2778.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.1944	762.81	2015.3	2781.7	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.1775	781.34	2000.4	2784.8	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.1633	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.1512	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953
1.40	195.07	0.001149	0.1408	830.30	1959.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001154	0.1317	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001166	0.1134	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001177	0.0996	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001187	0.0887	936.49	1865.2	2801.5	2.5035	3.7937	6.2972

ตารางที่ 1.1 แสดงตารางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอน้ำอิ่มตัว (ต่อ)

Press. MPa P	Sat. Temp. °C T _{sat}	Specific volume m ³ /kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg		
		Sat. Liquid	Sat. Vapor	Sat. Liquid	Evap. h _{fg}	Sat. Vapor	Sat. Liquid	Evap. S _{fg}	Sat. Vapor
		V _f	V _g	h _f		h _g	S _f		S _g
2.5	223.39	0.001197	0.07998	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001217	0.06668	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001235	0.05707	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001252	0.04978	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001286	0.03944	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001319	0.03244	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8895
7	285.88	0.001351	0.02737	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001384	0.02352	1316.64	1441.3	2758.0	3.2069	2.3364	5.7432
9	303.40	0.001418	0.02048	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6722
10	311.06	0.001452	0.018026	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001489	0.015987	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001527	0.014263	1491.3	1193.3	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001567	0.012780	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001611	0.011485	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001658	0.010337	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001711	0.009306	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001770	0.008364	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001840	0.007489	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1844
19	361.54	0.001924	0.006657	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002036	0.005834	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	0.9130	4.9269
21	369.89	0.002207	0.004952	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	0.6938	4.8013
22	373.80	0.002742	0.003568	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	0.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003155	0.003155	2099.3	0	2099.3	4.4296	0	4.4298

สภาวะภายหลังจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายใต้ปริมาตรคงที่ ก็คือการคำนวณหาปริมาตรจำเพาะที่เปลี่ยนแปลงไปของสภาวะก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น เมื่อคิดถึงการเพิ่มความร้อนให้อุณหภูมิที่อยู่ภายในภาชนะที่ปิดสนิท ปริมาตรจำเพาะก่อนกระบวนการเพิ่มความร้อนและภายหลังกระบวนการเพิ่มความร้อนสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$v_1 = v_1' + x_1(v_1'' - v_1') \quad (1.72)$$

$$v_2 = v_2' + x_2(v_2'' - v_2') \quad (1.73)$$

แต่เนื่องจาก $v_1 = v_2$ ดังนั้นจากทั้งสองสมการเราสามารถหาค่า x_2 ได้

$$x_2 = x_1(v_1'' - v_1')/(v_2'' - v_2') + (v_1' - v_2')/(v_2'' - v_2') \quad (1.74)$$

ค่าเอนทัลปี h_2 สามารถหาได้จาก คุณภาพไอ (x_2) และแทนลงไปนในสมการที่ (1.73) ก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เข้า-ออก จากกระบวนการนี้ได้

กระบวนการแอดิแบติก (Adiabatic process)

งานที่ได้จากกังหัน (Turbine) นั้นสำหรับในระบบเปิดสามารถคำนวณหาได้จากสมการพลังงานที่ว่า

$$W = m(h_1 - h_2) \quad (1.75)$$

จากสมการนี้ค่าความแตกต่าง ($h_1 - h_2$) เรียกว่า “ค่าความร้อนที่ลดลง (Heat drop)” ใช้สัญลักษณ์เป็น Δh เนื่องจากการขยายตัวของไอน้ำภายในกังหันเป็นกระบวนการแบบแอดิแบติกที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ ปริมาณงานจริงสามารถหาได้จากการใช้สมการประสิทธิภาพแบบแอดิแบติก ถ้าให้งานที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับไม่ได้ในกระบวนการแอดิแบติกเป็น W_{ad} ประสิทธิภาพแบบแอดิแบติก จะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{ad} = W/W_{ad} = h_1 - h_2/h_1 - h_{ad} \quad (1.76)$$

ในการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับไม่ได้แบบแอดิแบติก ค่าความร้อนที่ลดลง ($h_1 - h_{ad}$) จะถูกเรียกว่า “ค่าความร้อนที่ลดลงในกระบวนการแอดิแบติก (Adiabatic heat drop)” โดยจะใช้สัญลักษณ์เป็น Δ

การเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับได้แบบแอดิแบติก ทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงนั้น ค่าเอนโทรปีจะคงที่ ดังนั้นค่าเอนโทรปีจำเพาะเข้า-ออก ตรง บริเวณทางเข้าและที่ทางออกกังหันจะต้องเท่ากัน จึงสามารถกำหนดสภาวะที่ทางออกของไอน้ำที่กังหันได้ โดยทั่วไปแล้วกังหันไอน้ำจะใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดเป็นส่วนมาก

ตรงที่ทางออกของกังหัน ไอน้ำจะกลายเป็นไอน้ำเปียก ในกรณีนี้คุณภาพ x_{2ad} ของของผสมอิ่มตัวจะเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} s_1 &= s_2 = s' + x_{ad}(s'' - s') \quad \text{ซึ่งจะได้ว่า} \\ x_{ad} &= (s_1 - s')/(s'' - s') \end{aligned} \quad (1.77)$$

ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับไม่ได้แบบแอดเดียแบติก จากค่าคุณภาพ x_{ad} เราสามารถคำนวณหาค่าเอนทัลปีจำเพาะ h_{ad} ที่ตรงบริเวณทางออกของกังหันได้

$$h_{ad} = h' + x_{ad}(h'' - h') \quad (1.78)$$

และจากผลลัพธ์นี้เอง งานที่ได้จากกังหันจะเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$W = \eta_{ad}W_{ad} = \eta_{ad}(h_1 - h_{2ad}) \quad (1.79)$$

ค่าเอนทัลปีจริงตรงที่ทางออกของกังหันสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (1.76) โดยที่

$$h_2 = h_1 - \eta_{ad}(h_1 - h_{2ad}) \quad (1.80)$$

นอกจากนั้น ค่าคุณภาพของไอจริงตรงที่ทางออกของกังหัน สามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการของเอนทัลปีจำเพาะของไอน้ำเปียก ซึ่งจะได้สมการเป็น

$$\begin{aligned} h_2 &= h' + x_2(h'' - h') \\ x_2 &= (h_2 - h')/(h'' - h') \end{aligned} \quad (1.81)$$

กระบวนการ throttling (Throttling process)

วาล์วปรับความดันสามารถช่วยในการควบคุมปริมาณการไหลของไอน้ำได้ ไอน้ำนั้นเมื่อมีการขยายตัวแบบ throttling ค่าเอนทัลปีจะมีค่าคงที่ ไอน้ำเปียกหรือไอน้ำอิ่มตัวถ้าให้มีการขยายตัวจาก throttling จะกลายเป็นไอน้ำร้อนยิ่งยวด โดยการใช้คุณสมบัตินี้เองเราสามารถที่จะหาค่าคุณภาพของไอน้ำเปียกได้ อุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับของความเปียก (Wet degree) จะเรียกว่า “throttling calorimeter” ไอน้ำเปียกภายหลังขยายตัวแบบ throttling ผ่านวาล์ว ก็จะเข้าไปสู่ส่วนที่ใช้ทำการวัดซึ่งก็จะทำการวัดอุณหภูมิและความดัน ถ้าไอน้ำเป็นไอน้ำร้อนยิ่งยวดแล้ว ที่อุณหภูมิและความดันนี้ เมื่อใช้ตารางไอน้ำร้อนยิ่งยวดก็จะสามารถหาค่าเอนทัลปีได้ ส่วนค่าเอนทัลปีจำเพาะของไอน้ำเปียก ถ้าให้ x เป็นค่าคุณภาพของไอ จะสามารถหาได้จากสมการ

$$h = h' + x(h'' - h') \quad (1.82)$$

ถ้าวัดความดันของของผสมอิมิตัว ค่าเอนทัลปีจำเพาะของ ของเหลวอิมิตัว h' กับค่าเอนทัลปีจำเพาะของไออิมิตัว h'' สามารถหาได้จากตารางไอน้ำอิมิตัว ในการเปลี่ยนแปลงแบบทรอตลิง ถ้าให้ค่าเอนทัลปีเป็นค่าคงที่ จะสามารถคำนวณหา ค่าคุณภาพของไอน้ำได้ดังสมการ

$$x = (h_2 - h') / (h'' - h') \quad (1.83)$$

ด้วยวิธีการนี้ ไอน้ำภายหลังจากการเปลี่ยนแปลงแบบทรอตลิงซึ่งไม่ได้เป็นไอน้ำร้อนยิ่งยวดจะไม่สามารถวัดค่าได้ ที่ความดันต่ำกว่า 1 MPa จะเป็นไอน้ำความดันต่ำ และค่าคุณภาพไม่สูงกว่า 0.90 แล้ว การทำไอน้ำนี้ให้เป็นไอน้ำร้อนยิ่งยวด โดยกระบวนการทรอตลิงจะทำได้ยาก ในกรณีนี้จะต้องเพิ่มความร้อนให้แก่ไอน้ำด้วยเครื่องทำความร้อน (Heater) เพื่อให้เป็นไอน้ำร้อนยิ่งยวด และจากปริมาณความร้อนที่เพิ่มเข้าไปกับปริมาณการไหลของไอน้ำที่ใช้ไปในการวัด ก็จะสามารถหาค่าคุณภาพของไอน้ำได้

1.8 สรุป (Summary)

ความร้อนเบื้องต้นก็คือการศึกษาถึงหลักการทาง เทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) ซึ่งจะมีหัวข้อ และเนื้อหาโดยสรุปดังนี้

หลักการเบื้องต้นของเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่องของพลังงาน (Energy) โดยจะมีเนื้อหาครอบคลุมถึงเรื่องของพลังงานในรูปแบบต่างๆ การเปลี่ยนรูปของพลังงาน การถ่ายโอนพลังงาน รวมทั้งสมบัติต่างๆ ของสสารที่ใช้เป็นตัวกลางในการเปลี่ยนแปลงนั้นๆ

อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความร้อนที่สัมผัสได้ ความร้อนแฝง ความร้อนจากปฏิกิริยา แผนภูมิอากาศ และการใช้งาน เป็นการอธิบายถึงค่าพื้นฐานที่ใช้ในคำนวณ พร้อมทั้งอธิบายถึงสเกล หรือหน่วยที่เรียกใช้ ซึ่งมีความสำคัญเพื่อใช้ในการอ้างอิงถึงค่าว่ามีมากน้อยแตกต่างกันอย่างไร รวมถึงการอ่านค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศจากแผนภูมิอากาศ

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือกฎอนุรักษ์พลังงาน มีหลักการว่า “พลังงานสามารถเปลี่ยนรูป หรือถูกถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ หรือทำลายให้สูญสลายไปได้” ดังนั้นเมื่อพิจารณาการถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมแล้ว จะพบว่าพลังงานรวมของระบบกับสิ่งแวดล้อมจะมีค่าคงที่

กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า กระบวนการจะเกิดขึ้นในทิศทางที่แน่นอน และพลังงานจะเป็นค่าที่มีทั้งคุณภาพ และปริมาณ กระบวนการจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าไม่เป็นไปตามทั้ง กฎข้อที่หนึ่ง และสองของเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อที่จะทำให้ความร้อนและงานสามารถเปลี่ยนแปลงไปมาหากันได้อย่างต่อเนื่อง จะต้องทำให้ของไหลมีการเปลี่ยนสภาวะอย่างต่อเนื่องเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงในหนึ่งวัฏจักรนั้น สิ่งที่สำคัญที่สุดคือระบบจะต้องกลับมาสู่สภาวะเดิมตอนเริ่มต้น การเปลี่ยนแปลงครบหนึ่งรอบแบบนี้เรียกว่า วัฏจักร ส่วนของไหลที่ได้รับการเปลี่ยนสภาวะแบบนี้จะเรียกว่า “ของไหลทำงาน (Working fluid)”

เครื่องยนต์ความร้อน (Heat Engine) งานสามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่นได้ง่าย แต่การเปลี่ยนพลังงานรูปอื่นไปเป็นงานนั้นไม่่ง่ายนัก ด้วยเหตุผลนี้จึงอาจจะกล่าวสรุปได้ว่า งานสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนได้โดยตรง อย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าต้องการเปลี่ยนความร้อนไปเป็นงานนั้นจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษบางอย่าง อุปกรณ์ที่ว่านี้คือ เครื่องยนต์ความร้อน

วัฏจักรก๊าซ (Gas cycle) จะเป็นการอธิบายวัฏจักรที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นของไหลทำงานมีวัฏจักรต่างๆ ดังนี้ วัฏจักรออตโต (Otto cycle) วัฏจักรดีเซล (Diesel cycle) วัฏจักรเบรตัน (Brayton cycle) วัฏจักรอีริคสัน (Ericsson cycle) วัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling cycle)

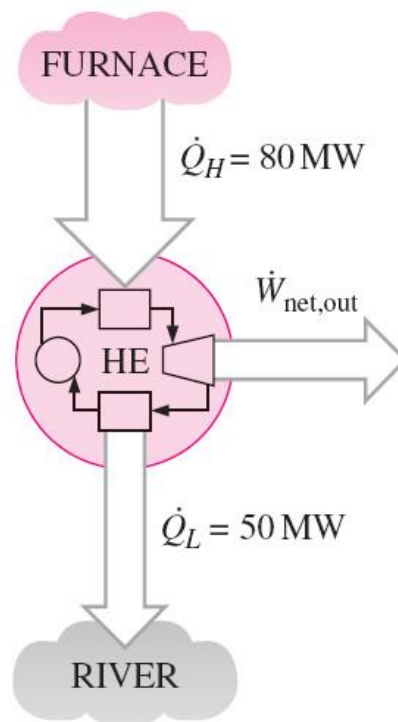
วัฏจักรไอน้ำ (Steam cycle) การใช้ไอน้ำเป็นของไหลทำงานจะเรียกว่า “โรงจักรกำลังไอน้ำ (Steam power plant)” หรือ “Steam plant” วัฏจักรทางทฤษฎีของโรงจักรกำลังไอน้ำเรียกว่า “วัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle)” แต่ถ้าเรานำความร้อนจากไอน้ำที่กำลังขยายตัวนี้ไปอุ่น หรือเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำที่เย็นกว่าก่อนที่จะเข้าหม้อต้ม ซึ่งจะเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำต่างสถานะ วัฏจักรที่ใช้ความร้อนเหล่านี้นำไปอุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อต้มเรียกว่า “วัฏจักรรีเจนเนอเรชั่น (Regeneration cycle)” และการนำไอน้ำจำนวนหนึ่งออกมาในขณะที่ไอน้ำกำลังขยายตัวแล้วส่งไปที่หม้อต้มและภายหลังจากที่ได้เพิ่มความร้อนซ้ำให้แล้วก็จะให้ไปขยายตัวที่กังหันต่อไป วัฏจักรแบบนี้จะเรียกว่า “วัฏจักรรีฮีท (Re-heat cycle)”

วัฏจักรทำความเย็นกับวัฏจักรปั๊มความร้อน (Refrigerating cycle and heat pump cycle) คือ การที่ระบบรับงานจากภายนอกมาเพื่อใช้ในการเคลื่อนถ่ายโอนความร้อนในวัฏจักรของเครื่องทำความเย็นและปั๊มความร้อนนั้นต้องการ Compression stroke การอัดโดยเครื่องอัด (Compressor) ซึ่งเรียกว่า “วัฏจักรทำความเย็นอัดไอ (Vapor compression refrigerating cycle)”

ตารางไอน้ำ (Steam table) จะเป็นการอธิบายถึงการเปลี่ยนสถานะของสารในแผนภาพ T-v การหาคุณสมบัติของสาร การเปลี่ยนแปลงสถานะของไอน้ำที่สถานะและกระบวนการต่าง ๆ

1.9 กรณีศึกษา (Case studies)

ตัวอย่างที่ 1.1 ความร้อนถูกถ่ายเทจากเตาเผาไปยังเครื่องยนต์ความร้อนด้วยอัตรา 80 MW ถ้าอัตราการปล่อยทิ้งพลังงานสูญเสียไปยังแม่น้ำที่อยู่บริเวณใกล้เคียง เท่ากับ 50 MW จงคำนวณหาลำดับสุทธิที่ได้ออกมา



รูปที่ 1.29 ภาพตัวอย่างที่ 1.1

ตอนที่ 2 บทที่ 1 ความร้อนเบื้องต้น

วิธีทำ จากภาพเครื่องยนต์ความร้อนที่แสดงไว้ เตาเผาถือว่าเป็นแหล่งพลังงานความร้อนอุณหภูมิสูง และแม่น้ำถือว่าเป็นแหล่งพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจะได้

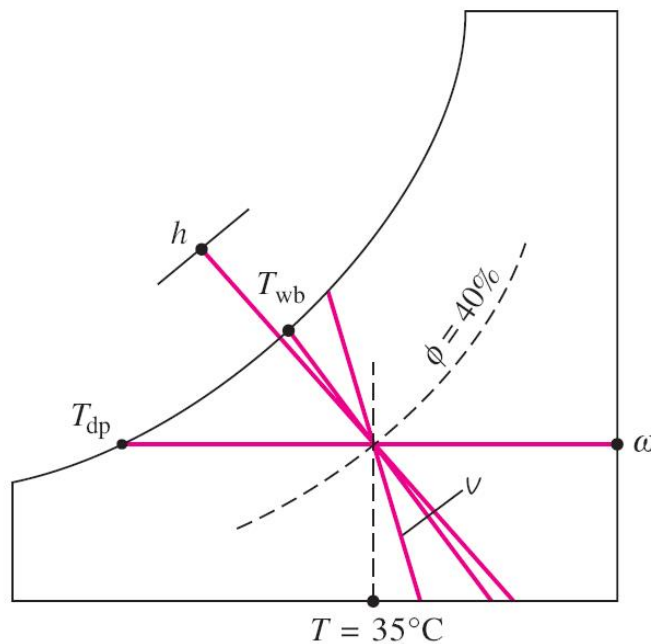
$$\dot{Q}_H = 80 \text{ MW} \quad \text{และ} \quad \dot{Q}_L = 50 \text{ MW}$$

สมมติว่า ความร้อนที่อาจสูญเสียจากของไหลทำงานขณะที่ไหลผ่านท่อ และอุปกรณ์น้อยมาก กำลังสุทธิที่ได้ ออกมาคำนวณได้จากสมการ (1.26)

$$\dot{W}_{\text{net,out}} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = (80 - 50) \text{ MW} = 30 \text{ MW}$$

ตัวอย่าง 1.2 พิจารณาอากาศที่สภาวะ 1 atm, 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 40% ให้ใช้ psychrometric charts ในการหาค่า ความชื้นจำเพาะ ค่าเอนทัลปี (ในหน่วย kJ/kg dry air) อุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และปริมาตรจำเพาะของอากาศ (ในหน่วย m³/kg dry air)

วิธีทำ ทำการหาจุดตัดของอุณหภูมิ กับความชื้นสัมพัทธ์ที่ให้มาแล้วนำจุดดังกล่าวไปอ้างอิงหาค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.30



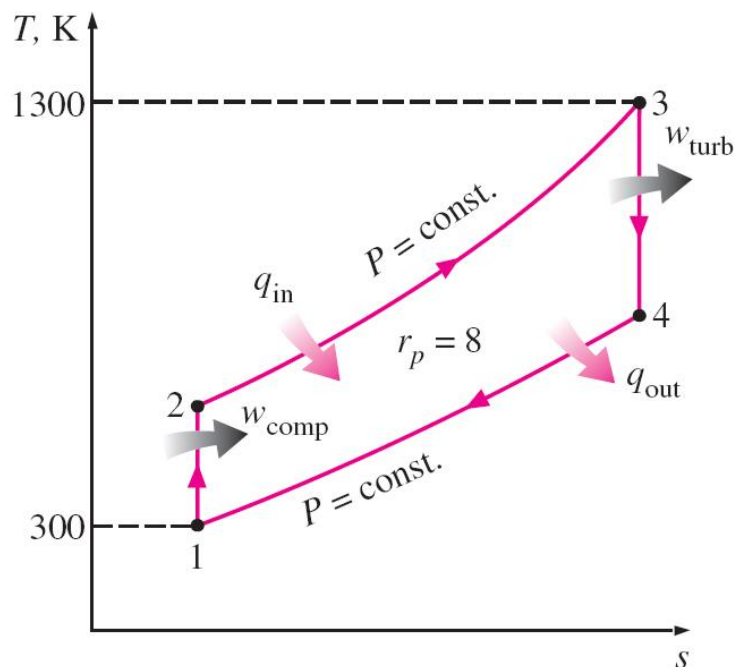
รูปที่ 1.30 ภาพตัวอย่างที่ 1.2

- ความชื้นจำเพาะ (ω) หาได้โดยการลากเส้นแนวนอนจากสภาวะที่ให้ไปทางด้านขวาจนตัดแกนความชื้นจำเพาะ ได้ค่า $\omega = 0.0142 \text{ kg H}_2\text{O/kg dry air}$
- ค่าเอนทัลปี (h) ของอากาศ หาได้โดยการลากเส้นขนานกับเส้น h คงที่ จากสภาวะที่ให้ไปตัดกับสเกลเอนทัลปี ได้ค่า $h = 71.5 \text{ kJ/kg dry air}$

- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (T_{wb}) หาได้โดยลากขนานไปกับเส้น T_{wb} คงที่ จาก สภาวะที่กำหนดไปตัดเส้นอิ่มตัว ได้ค่า $T_{wb} = 24^{\circ}\text{C}$
- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_{dp}) หาได้โดยลากเส้นแนวนอนจากสภาวะที่กำหนดไปด้านซ้ายมือจนตัดกับเส้นอิ่มตัว เราอ่านได้ $T_{dp} = 19.4^{\circ}\text{C}$
- ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (v) หาได้จากการสังเกตระยะห่างระหว่างสภาวะที่กำหนด และเส้นของ v คงที่ทั้งสองด้าน สังเกตดูว่าสภาวะที่กำหนดมาอยู่ระหว่างค่าใดบ้าง และหาค่าโดยประมาณ เราจะได้ $v = 0.893 \text{ m}^3/\text{kg dry air}$

ตัวอย่าง 1.3 วัฏจักรอุดมคติของกังหันก๊าซซึ่งมีอากาศเป็นของไหลทำงานมีอัตราส่วนกำลังอัดมีค่าเท่ากับ 8 อุณหภูมิของก๊าซที่ทางเข้าเครื่องอัดเท่ากับ 300°K และที่ทางเข้ากังหันเท่ากับ 1300°K จงใช้สมมติฐานของอากาศในการคำนวณหา อุณหภูมิของก๊าซที่ทางออกของเครื่องอัด และกังหัน และประสิทธิภาพเชิงความร้อน

วิธีทำ จากรูปที่ 1.31



รูปที่ 1.31 ภาพตัวอย่างที่ 1.3

อุณหภูมิของก๊าซที่ทางออกของเครื่องอัด และกังหัน สามารถคำนวณได้ดังนี้
กระบวนการ 1-2 (กระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก)
ค่าคุณสมบัติของอากาศหาได้จากตารางที่ 1

$$T_1 = 300^{\circ}\text{K} \quad \text{จะได้} \quad h_1 = 300.19 \text{ kJ/kg} \quad \text{และ} \quad Pr_1 = 1.386$$

จากสมการที่ 1.38 จะได้

$$\begin{aligned} Pr_2 &= (P_2/P_1) \cdot Pr_1 = (8)(1.386) = 11.09 \\ \text{จะได้} \quad T_2 &= 540^{\circ}\text{K} \text{ (ทางออกเครื่องอัด)} \\ h_2 &= 544.35 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

ตอนที่ 2 บทที่ 1 ความร้อนเบื้องต้น

กระบวนการ 3-4 (กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก)

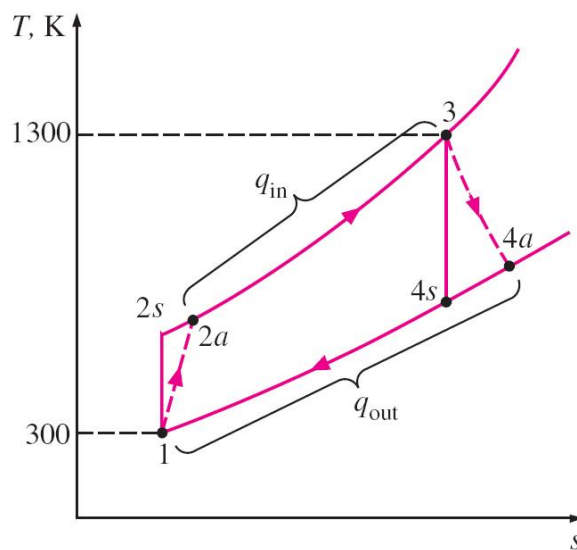
$$\begin{aligned} T_3 &= 1300 \text{ °K} & \text{จะได้ } h_3 &= 1395.97 \text{ kJ/kg} & \text{และ } Pr_3 &= 330.9 \\ Pr_4 &= (P_4/P_3) \cdot Pr_3 & &= (1/8)(330.9) & &= 41.36 \\ \text{ได้ } T_4 &= 770 \text{ °K (ทางออกกังหัน)} \\ h_4 &= 789.11 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

$$\begin{aligned} q_{in} &= h_3 - h_2 & &= (1395.97 - 544.35) \text{ kJ/kg} & &= 851.62 \text{ kJ/kg} \\ W_{net} &= W_{out} - W_{in} & &= (606.86 - 244.16) \text{ kJ/kg} & &= 362.7 \text{ kJ/kg} \\ \text{ดังนั้น } \eta_{th} &= W_{net}/q_{in} & &= 362.7/851.62 & &= 0.426 \end{aligned}$$

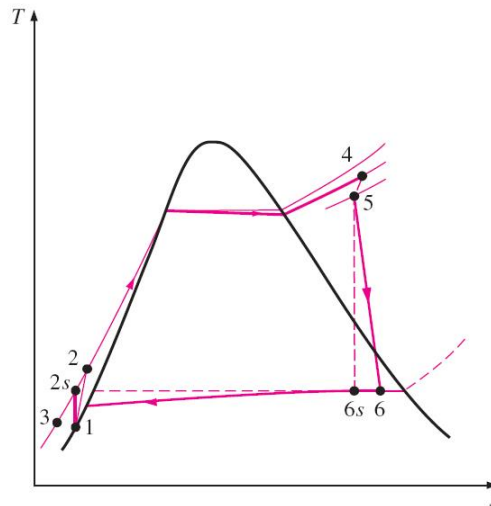
1.10 กิจกรรม (Activities)

1.1 สมมติว่าประสิทธิภาพแอดิเยเบติกของเครื่องอัดเท่ากับ 80% และประสิทธิภาพของกังหันเท่ากับ 85% จงคำนวณหา ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และอุณหภูมิที่ทางออกของกังหัน โดยใช้ข้อมูลจากตัวอย่างที่ 1.3



รูปที่ 1.32 ภาพโจทย์ข้อที่ 1.1

1.2 โรงจักรไอน้ำทำงานตามวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 1.33 ถ้าประสิทธิภาพแอดิเยเบติกของกังหันเท่ากับ 87% และประสิทธิภาพแอดิเยเบติกของปั๊มเท่ากับ 85% จงคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักร และกำลังสุทธิที่ได้ออกมาที่อัตราการไหลเชิงมวล 15 kg/s (กำลังปั๊มสามารถหาได้จากสมการ $w_p = v_1(P_2 - P_1)$)



รูปที่ 1.33 ภาพโจทย์ข้อที่ 1.2

เฉลยแบบฝึกหัด

1.1 วิธีทำ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนคำนวณได้ดังนี้

$$w_{com} = h_{2a} - h_1$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } h_{2a} &= w_{com} + h_1 \\ &= (300.19 + 305.20) \text{ kJ/kg} \\ &= 605.39 \text{ kJ/kg} \text{ จากตารางที่ 1 ได้ } T_{2a} = 598 \text{ }^{\circ}\text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } q_{in} &= h_3 - h_{2a} \\ &= (1395.97 - 605.39) \text{ kJ/kg} \\ &= 790.58 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{net} &= w_{out} - w_{in} \\ &= (515.83 - 305.20) \text{ kJ/kg} \\ &= 210.63 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= w_{net}/q_{in} \\ &= 210.63/790.58 \\ &= 0.266 \text{ (26.6\%)} \end{aligned}$$

1.2 วิธีทำ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{งานที่ป้อนให้ปั๊ม} \quad w'_p &= w_p/\eta_p \\ &= v_1(P_2 - P_1)/\eta_p \\ &= (0.001008 \text{ m}^3/\text{kg})(16000 - 9)\text{kPa}/0.85 \\ &= 19.0 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{งานที่ได้จากกังหัน} \quad w'_t &= \eta_{t,wt} \\ &= \eta_t \cdot (h_5 - h_{6s}) \end{aligned}$$

ตอนที่ 2 บทที่ 1 ความร้อนเบื้องต้น

$$\begin{aligned} &= 0.87(3582.3 - 2115.7) \\ &= 1275.9 \text{ kJ/kg} \\ \text{ความร้อนที่ป้อนให้หม้อต้ม } q_{in} &= h_4 - h_3 \\ &= (3645.7 - 146.7) \\ &= 3499.0 \text{ kJ/kg} \\ \text{ดังนั้น } W_{net} &= w'_t - w'_p \\ &= (1275.9 - 19.0) \text{ kJ/kg} \\ &= 1256.9 \text{ kJ/kg} \\ \eta_t &= w_{net}/q_{in} \\ &= 1256.9/3499.0 \\ &= 0.359 \end{aligned}$$