

Thermodynamics I

Assoc.Prof.Somma Pripem, Ph.D.

Chapter 3 : Work and Heat



บทที่ 3

งานและความร้อน

(Work and Heat)

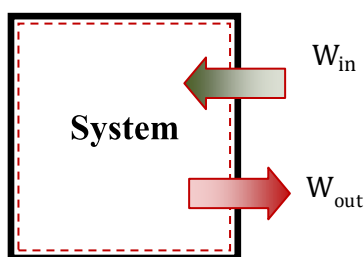
ในบทนี้จะกล่าวถึงงานและความร้อน นักศึกษาจะต้องทำความเข้าใจในคำทั้งสองให้ดีเพราะในการวิเคราะห์ปัญหาทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำให้ถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับการแยกแยะพลังงานทั้งสองรูปนี้ให้ชัดเจน

3.1 คำจำกัดความของงาน (Definition of Work)

โดยปกติแล้วงานหมายถึง ผลคูณของแรงและระยะทางในแนวแรงดังสมการ

$$W = \int_1^2 F \cdot dx \quad (3.1)$$

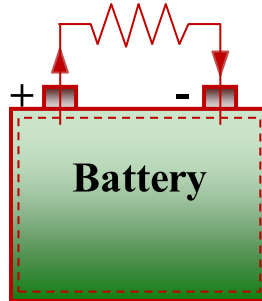
แต่ในระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ บางระบบอาจดูได้ยากว่ามีงานผ่านเข้าหรือออกจากระบบหรือไม่ ซึ่งมีหลักเกณฑ์ในการวิเคราะห์ดังนี้ “ถ้าเราสามารถแทนผลลัพธ์ของระบบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมได้ด้วยการยกน้ำหนัก แสดงว่าระบบได้ให้งานออกมา ” การยกน้ำหนักขึ้นนั้น เป็นผลจากการกระทำของแรงต่อวัตถุ นั่นคือ มีงานที่กระทำโดยระบบ (system) กำหนดให้มีเครื่องหมาย บวก และงานที่กระทำต่อระบบกำหนดให้มีเครื่องหมาย ลบ



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของงานที่ส่งผ่านเส้นล้อมระบบ

เพื่อความกระจ่างพิจารณารูปที่ 3.1 (ก) ซึ่งเป็นระบบที่มีแบตเตอรี่และมอเตอร์ขับเคลื่อน ในกรณีนี้มีงานส่งออกจากระบบผ่านเส้นล้อมระบบหรือไม่ เพื่อตอบคำถามนี้ลองแทนใบพัดด้วยมู่เต้ ซึ่งมีค้อนน้ำหนักห้อยอยู่ดังรูปที่ 3.1 (ข) เมื่อมอเตอร์หมุนค้อนน้ำหนักจะถูกยกให้สูงขึ้น นั่นคือเราสามารถแทนผลลัพธ์ของระบบ ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมได้ด้วยการยกน้ำหนัก จึงสรุปว่ามีการส่งผ่านงานออกจากระบบ

ถ้าให้ระบบคือแบตเตอรี่เท่านั้น ดังรูปที่ 3.2 จะมีงานผ่านออกสู่สิ่งแวดล้อมหรือไม่ พิจารณา เช่นกรณีแรก จะพบว่าผลลัพธ์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมนั้นแทนได้ด้วยการยกน้ำหนัก นั่นคือมีงานส่งออกจากระบบนั่นเอง แต่ในกรณีนี้เป็นงานเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งไหลผ่านเส้นล่อระบบ



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของระบบที่มีงานส่งผ่านออกสู่สิ่งแวดล้อม
เพราะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นล่อระบบ

3.2 หน่วยของงาน (Units of Work)

เนื่องจากงานมีค่าเท่ากับผลคูณของแรงกับระยะทาง ดังนั้นในหน่วยสากล หน่วยของงานจึงเป็น นิวตัน – เมตร (Nm) ซึ่งเรียกว่า จูลล์ (Joule, J)

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$$

กำลังงานคืออัตราในการทำงาน ให้สัญลักษณ์เป็น \dot{W}

$$\dot{W} = \frac{dW}{dt}$$

ดังนั้น หน่วยของกำลังงานจึงเป็น จูลล์ต่อวินาที ซึ่งเรียกว่า วัตต์ (Watt, W)

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

3.3 งานกระทำที่ขอบระบบซึ่งเคลื่อนที่ของระบบปิดกดอัดธรรมดาในกระบวนการสมดุลชั่วขณะ

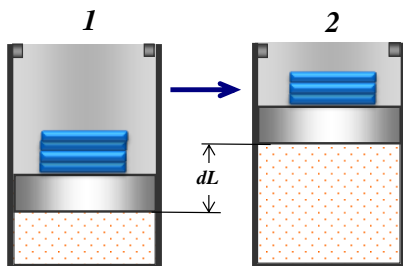
เราได้ศึกษาแล้วว่า งานที่กระทำโดยระบบหรือกระทำต่อระบบมีหลายรูปแบบ เช่น งานเนื่องจากการหมุนของเพลางานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบในกระบอกสูบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเส้นล่อระบบของระบบปิดกดอัดธรรมดา โดยกระบวนการสมดุลชั่วขณะ

พิจารณาระบบในรูปที่ 3.3 แก๊สบรรจุในกระบอกสูบและลูกสูบ เมื่อยกน้ำหนักออกเล็กน้อย ลูกสูบจะเคลื่อนที่สูงขึ้นเป็นระยะทาง dL แรงที่กระทำบนลูกสูบมีค่าเท่ากับ $P \times A$ เมื่อ P คือความดันของแก๊ส และ A คือพื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบซึ่งคงที่ ดังนั้นงานที่ทำโดยระบบ δW คือ

$$\delta W = PA \cdot dL$$

แต่ $A \cdot dL = dV$ (การเปลี่ยนแปลงปริมาตร) ดังนั้น

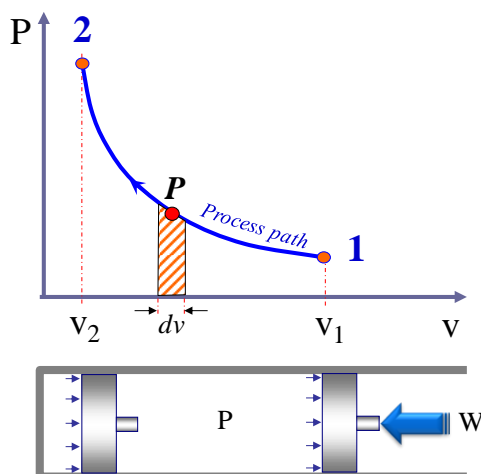
$$\delta W = PdV \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างของงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของเส้นล่อในระบบในกระบวนการสมดุล เสมือน

ปริมาณงานที่ทำเนื่องจากการเคลื่อนที่ของเส้นล่อระบบในการเปลี่ยนแปลงโดยสมดุล จะหาได้โดยการอินทิเกรตสมการ (3.2) แต่ทั้งนี้จะต้องรู้ความสัมพันธ์ของความดันและปริมาตรระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์นี้อาจเขียนเป็นสมการหรือแสดงเป็นเส้นกราฟ

พิจารณาการหาคำตอบโดยวิธีเขียนกราฟ โดยใช้ตัวอย่างของการอัดแก๊สในกระบอกสูบ ตามรูปที่ 3.4 ที่จุดเริ่มต้นของลูกสูบอยู่ที่ตำแหน่ง 1 ซึ่งมีความดันต่ำ สถานะของแก๊สในกระบอกสูบคือสถานะที่ 1 ดังรูป



รูปที่ 3.4 เส้น โถ้งความดัน - ปริมาตรแสดงปริมาณงาน

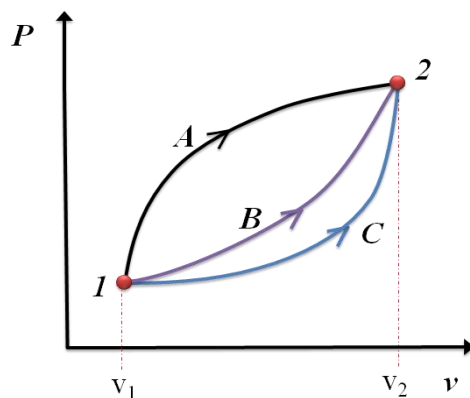
เมื่อกระบวนการอัดสิ้นสุดลูกสูบอยู่ตำแหน่ง 2 และสถานะของแก๊สคือสถานะ 2 ถ้าสมมติให้กระบวนการที่เกิดขึ้นมีการหยุดสมดุลชั่วขณะ ดังนั้นสถานะของระบบในระหว่างการเปลี่ยนแปลงอยู่บนเส้นเชื่อมระหว่างสถานะ 1 กับ 2 งานที่กระทำต่อแก๊สในระหว่างการอัด หาได้โดยการอินทิเกรตสมการ(3.2)

$${}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 P dV \quad (3.3)$$

สัญลักษณ์ ${}_1W_2$ หมายถึง งานที่ให้หรือกระทำต่อระบบ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ 1 ไปเป็นสถานะ 2

จากแผนภาพ P-v รูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าปริมาณงานคือพื้นที่ใต้ส่วนโค้ง 1-2 นั่นคือพื้นที่ $V_1 - 1 - 2 - V_2 - V_1$ แทนปริมาณงานที่กระทำต่อระบบ ถ้าระบบเริ่มเปลี่ยนแปลงจากสถานะ 2 ไปสู่ 1 ในลักษณะเดียวกัน พื้นที่นี้จะแทนงานที่ได้จากระบบ

พิจารณารูปที่ 3.5 ซึ่งจะนำไปสู่การสรุปที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ในการเปลี่ยนแปลงสถานะ ของของไหลจากสถานะ 1 ไปสู่สถานะ 2 สามารถทำได้ด้วยกระบวนการสมดุลชั่วขณะได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธี A B และ C เนื่องจากพื้นที่ใต้ส่วนโค้งนี้แทนปริมาณงาน แสดงว่างานขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงด้วย ไม่ขึ้นกับสถานะเริ่มต้น และสถานะสุดท้ายอย่างเดียว โดยในทางคณิตศาสตร์เรียกว่า เป็น Path function จึงเขียนเป็น δW แสดงการเป็น Inexact differential



รูปที่ 3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่าง differential สองสถานะสามารถทำได้หลายทาง

ตัวอย่างที่ 3.1 ระบบดังรูปที่ 3.6 ซึ่งบรรจุแก๊สและมีก้อนน้ำหนักร้อยๆ จำนวนมากวางอยู่บนลูกสูบ เริ่มแรกมีความดันเป็น 200 kPa และปริมาตรของแก๊ส 0.04 m^3

ตัวอย่างที่ 3.2 กระบอกสูบลูกสูบบรรจุอากาศเริ่มแรกที่ 0.4 m^3 ความดัน 100 kPa และ อุณหภูมิ 80°C จากนั้นอากาศถูกอัดจนความดันเป็น 700 kPa ในระหว่างการอัดนั้นอุณหภูมิของอากาศคงที่ จงหาอุณหภูมิสุดท้ายและปริมาณงานที่กระทำต่อระบบ

วิธีทำ

ระบบ อากาศในกระบอกสูบ เป็นระบบปิด

สมมติฐาน อากาศเป็นก๊าซจินตภาพ

วิเคราะห์ หา V_2 จาก $PV = mRT$

$$\text{หางานได้จาก } {}_1W_2 = \int_1^2 P dV$$

หาปริมาตรที่สถานะที่ 2

$$\text{สถานะที่ 1} \quad m = \frac{P_1 V_1}{RT_1}$$

$$m = \frac{(100 \text{ kPa})(0.4 \text{ m}^3)}{(0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}})(80 + 273) \text{ K}} = 0.39482 \text{ kg}$$

$$\text{สถานะที่ 2} \quad V_2 = \frac{mRT_2}{P_2} = 0.05714 \text{ m}^3$$

ปริมาตรที่สถานะสุดท้ายเท่ากับ 0.05714 m^3

ตอบ

หางาน เนื่องจากเป็นระบบปิดมวลไม่เปลี่ยนแปลง อุณหภูมิคงที่และอากาศเป็น ideal gas : $PV = mRT$
ดังนั้น $PV = \text{Constant}$

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = c \int_1^2 \frac{dV}{V} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$${}_1W_2 = (100 \text{ kPa})(0.4 \text{ m}^3) \ln \frac{(0.05714 \text{ m}^3)}{(0.4 \text{ m}^3)} = -77.84 \text{ kJ}$$

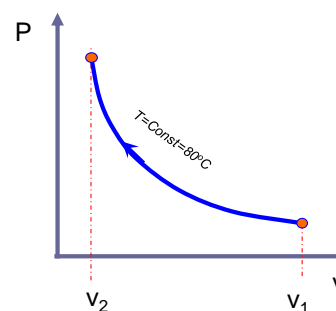
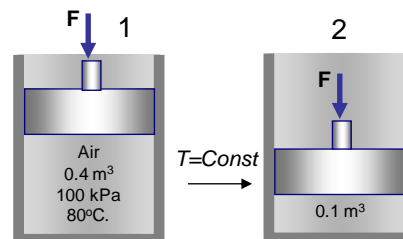
งานที่กระทำต่อระบบเท่ากับ 77.84 kJ

ตอบ

หรือหากใช้สมการสถานะประกอบคือ $PV = mRT$ จะได้

$${}_1W_2 = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = mRT_1 \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$${}_1W_2 = (0.3948 \text{ kg}) \left(0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) (80 + 273) \text{ K} \ln \left(\frac{700 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} \right) = -77.84 \text{ kJ}$$

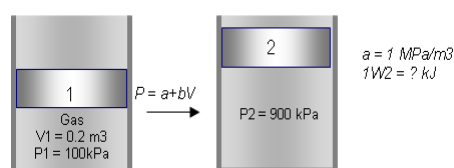


ตัวอย่างที่ 3.3 ก๊าซในกระบอกสูบถูกอัดจากความดัน 100 kPa ไปเป็น 900 kPa กระบวนการอัดที่เกิดขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ $P = aV + b$, เมื่อ $a = 1 \text{ MPa/m}^3$ และ b เป็นค่าคงที่ ถ้าปริมาตรเริ่มต้นเท่ากับ 0.2 m^3 จงคำนวณหาปริมาณงานในกระบวนการนี้

วิธีทำ

ระบบ ก๊าซในกระบอกสูบ เป็นระบบปิด

วิเคราะห์ หางานได้จาก ${}_1W_2 = \int_1^2 P dV$



$${}_1W_2 = \int_1^2 PdV = \int_1^2 (aV + b)dV = \frac{a}{2}(V_2^2 - V_1^2) + b(V_2 - V_1)$$

หาค่า b จากสมการที่ 2

$$P_2 = aV_2 + b; \quad b = P_2 - aV_2$$

$$b = (900\text{kPa}) - (1\text{ MPa/m}^3 \times 1,000\text{kPa/MPa})(0.4\text{m}^3) = -100\text{ kPa}$$

หาค่า V_1 จากสมการที่ 1 $P_1 = aV_1 + b; \quad V_1 = (P_1 - b)/a$

$$V_1 = [(100\text{kPa}) - (-100\text{kPa})]/(1,000\text{kPa/m}^3) = 1.0\text{ m}^3$$

แทนค่า ${}_1W_2 = \frac{a}{2}(V_2^2 - V_1^2) + b(V_2 - V_1)$

$${}_1W_2 = \frac{(1,000\frac{\text{kPa}}{\text{m}^3})}{2}(1.0^2 - 0.2^2)\text{m}^3 + (-100\text{kPa})(1.0 - 0.2)\text{m}^3$$

$${}_1W_2 = 400\text{ kJ}$$

งานที่ได้ออกมาจากระบบเท่ากับ 400 kJ

ตอบ

3.4 ความร้อน (Definition of Heat)

ความร้อนคือ พลังงานที่ถ่ายเทผ่านเส้นล้อนระบบ ไปสู่อีกระบบหรือสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยความหมายนี้ ความร้อนเป็นรูปของพลังงาน ซึ่งจะถ่ายเทเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิและจะถ่ายเทจากระบบที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่ระบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเท่านั้น เราไม่ถือว่าในตัววัตถุมีความร้อน เพราะความร้อนเป็นพลังงานที่ส่งผ่านเส้นล้อนระบบ สิ่งที่อยู่ในตัววัตถุนั้นคือพลังงาน ดังนั้นความร้อนเป็นปรากฏการณ์ชั่วขณะ (Transient Phenomenon)

3.5 หน่วยของความร้อน (Unit of Heat)

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่ง ดังนั้นหน่วยของมันจึงเป็นหน่วยของพลังงานเหมือนกับงาน ซึ่งในหน่วยสากล คือ จูลล์ (Joule, J) ความร้อนที่ส่งผ่านให้ระบบกำหนดให้เป็นบวก และ ความร้อนที่ส่งผ่านออกจากระบบให้เป็นลบ นั่นคือ ความร้อนบวก (Positive heat) แทนพลังงานที่ถ่ายเข้าสู่ระบบ ความร้อน (Negative heat) แทนพลังงานที่ถ่ายออกจากระบบ สัญลักษณ์ใช้อักษร Q กระบวนการที่ไม่มีการส่งถ่ายความร้อนเรียกว่า “กระบวนการอะเดียแบติก” (adiabatic process)

ความร้อนก็เช่นเดียวกับงาน คือเป็นพาธฟังก์ชัน (Path function) ดังนั้นเพื่อแสดงการเป็นอนุพันธ์ไม่ตายตัว (inexact differential) จึงเขียนอนุพันธ์เป็น δQ

ดังนั้น ความร้อนที่ให้หรือกระทำกับระบบ ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่ 1 ไปยังสถานะที่ 2 หาได้จาก

$$\int_1^2 \delta Q = {}_1Q_2$$

โดย ${}_1Q_2$ หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะ 1 ไปเป็นสภาวะ 2
อัตราการถ่ายเทความร้อน ให้สัญลักษณ์เป็น \dot{Q}

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt}$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหน่วยน้ำหนักของระบบ

$$q = \frac{\dot{Q}}{m}$$

เมื่อ m คือมวลของของไหลในระบบ

Concussion : สรุปท้ายบทที่3

ในบทนี้เราต้องทำความเข้าใจความหมายและความแตกต่างของ งานและความร้อน สรุปได้ดังนี้

1. ความร้อนและงานเป็นปรากฏการณ์ชั่วขณะ ในตัวระบบไม่มีทั้งความร้อนและงาน แต่ความร้อนและงานหรืออย่างใดอย่างหนึ่ง ผ่านเส้นล้อมระบบเมื่อระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะ
2. ทั้งความร้อนและงานเป็นปรากฏการณ์ที่ขอบระบบ (Boundary phenomena) สังเกตได้ที่เส้นล้อมระบบ
3. ทั้งสองเป็นพารามิเตอร์ และเป็น อนุพันธ์ไม่ตายตัว
4. งานที่กระทำโดยระบบ (งานที่ได้จากระบบ) มีเครื่องหมาย บวก
งานที่กระทำต่อระบบ (งานที่ใส่เข้าไปในระบบ) มีเครื่องหมาย ลบ
5. ความร้อนที่ส่งผ่านให้ระบบ มีเครื่องหมาย บวก
ความร้อนที่ส่งผ่านออกระบบ มีเครื่องหมาย ลบ

สัญลักษณ์และหน่วยของความร้อนและงาน

| ปริมาณ | | หน่วย | | ปริมาณ | | หน่วย |
|------------------|-----------|-------|--|---------------------------------|-----------|-------|
| งาน (Work) | W | kJ | | ความร้อน (Heat) | Q | kJ |
| กำลังงาน (Power) | \dot{W} | kW | | อัตราความร้อน (Rate of heat) | \dot{Q} | kW |
| งานต่อหน่วยมวล | w | kJ/kg | | ความร้อนต่อหน่วยมวล | q | kJ/kg |

Exercises : แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3

1. A mass of 5 kg of saturated water vapor at 200 kPa is heated at constant pressure until the temperature reaches 300 °C. Calculate the work done by the steam during this process. (430.5 kJ)
2. During an expansion process, the pressure of a gas changes from 100 to 900 kPa according to the relation $P = aV + b$, where $a = 1 \text{ MPa/m}^3$ and b is a constant. If the initial volume of the gas is 0.2 m^3 , calculate the work during the process. (400 kJ)
3. During some actual expansion and compression process in piston-cylinder devices, the gases have been observed to satisfy the relationship $PV^n = C$, where n and C are constants. Calculate the work done when a gas expands from a state of 150 kPa and 0.03 m^3 to a final volume of 0.2 m^3 , for the case of $n = 1.3$.
4. A piston-cylinder device contains 5 kg of refrigerant-12 at 800 kPa and 60°C. The refrigerant is now cooled at constant pressure until it exists as a liquid at 20°C. Determine the amount of heat transfer, and show the process on a T -v diagram with respect to saturation lines. Answer: -829.25 kJ
5. A piston-cylinder device initially contains 0.5 m^3 of saturated water vapor at 200 kPa. At this state, the piston is resting on a set of stops, and the mass of the piston is such that a pressure of 300 kPa is required to move it. Heat is now slowly transferred to the steam until the volume doubles. Show the process on a P-v diagram with respect to saturation lines and determine (a) the final temperature, (b) the work done during this process, and (c) the total heat transfer. Answers: (a) 878.90°C, (b) 150 kJ, (c) 875 kJ

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

Prepared by: Assoc.Prof.Sommaipriprem, PhD.

3-70 A closed system undergoes a cycle consisting of two process. During the first process, 40 kJ of heat is transferred to the system while the system does 60 kJ of work. During the second process, 45 kJ of work is done on the system.

(a) Determine the heat transfer during the second process.

(b) Calculate the net work and net heat transfer for the cycle.

Answers: (a) -25kJ; (b) 15kJ, 15kJ

3-35 A mass of 5 kg of saturated water vapor at 200 kPa is heated at constant pressure until the temperature reaches 300 °C. Calculate the work done by the steam during this process. (430.5 kJ)

3-39 Nitrogen at an initial state of 300 K, 150 kPa, and 0.2 m³ is compressed slowly in an isothermal process to a final pressure of 800 kPa. Determine the work done during this process.

3-41 During an expansion process, the pressure of a gas changes from 100 to 900 kPa according to the relation $P = aV + b$, where $a = 1 \text{ MPa/m}^3$ and b is a constant. If the initial volume of the gas is 0.2 m³, calculate the work during the process. (400 kJ)

3-42 During some actual expansion and compression process in piston-cylinder devices, the gases have been observed to satisfy the relationship $PV^n = C$, where n and C are constant. Calculate the work done when a gas expands from a state of 150 and 0.03 m³ to a final volume of 0.2 m³, for the case of $n = 1.3$.

3-72 A classroom that normally contains 40 people is to be air conditioned with window air-conditioning units of 5-kW rating. A person at rest may be assumed to dissipate heat at a rate of about 360 kJ/h. There are 10 light bulbs in the room, each with a rating of 100 W. The rate of heat transfer to the classroom through the walls and the window is estimated to be 15,000 kJ/h. If the room air is to be maintained at constant temperature of 21°C, determine the number of window air conditioning units required.
Answer: 2 units

3-78 A piston-cylinder device contains 5 kg of refrigerant-12 at 800 kPa and 60°C. The refrigerant is now cooled at constant pressure until it exists as a liquid at 20°C. Determine the amount of heat transfer, and show the process on a T -v diagram with respect to saturation lines.
Answer: -829.25 kJ

3-80 An insulated piston-cylinder device contains 5 L of saturated liquid water at a constant pressure of 150 kPa. Water is stirred by a paddle wheel while a current of 8 A flows for 45 min through a resistor placed in the water. If one-half of the liquid is evaporated during this constant-pressure process and the paddle-wheel work amounts to 300 kJ, determine the voltage of the source. Also, show the process on a P-v diagram with respect to saturation lines.
Answer: 230.9 V

3-81 A piston-cylinder device contains steam initially at 1 MPa, 350°C, and 1.5 m³. Steam is allowed to cool at constant pressure until it first starts condensing. Show the process on a T-v diagram with respect to saturation lines, and determine (a) the mass of the steam, (b) the final temperature, and (c) the amount of heat transfer.

3-82 A piston-cylinder device initially contains steam at 200 kPa, 200°C, and 0.5 m³. At this state, a linear spring ($F \propto x$) is touching the piston but exerts no force on it. Heat is now slowly transferred to the steam, causing the pressure and the volume to rise to 500 kPa and 0.6 m³, respectively. Show the process on a P-v diagram with respect to saturation lines, and determine (a) the final temperature, (b) the work done by the steam, and (c) the total heat transferred. Answers: (a) 1131°C, (b) 35 kJ, (c) 807 kJ

3-83 A piston-cylinder device initially contains 0.5 m³ of saturated water vapor at 200 kPa. At this state, the piston is resting on a set of stops, and the mass of the piston is such that a pressure of 300 kPa is required to move it. Heat is now slowly transferred to the steam until the volume doubles. Show the process on a P-v diagram with respect to saturation lines and determine (a) the final temperature, (b) the work done during this process, and (c) the total heat transfer. Answers: (a) 878.90°C, (b) 150 kJ, (c) 875 kJ

3-84 A piston-cylinder device with a set of stops on the top contains 3 kg of saturated liquid water at 200 kPa. Heat is now transferred to the water, causing some of the liquid to evaporate and move the piston up. When the piston reaches the stops, the enclosed volume is 60 L. More heat is added until the pressure is doubled. Show the process on a P-v diagram with respect to saturation lines, and determine

- (a) the amount of liquid at the final state, if any,
- (b) the final temperature, and
- (c) the total work and heat transfer.