

# บทที่ 13

## ปริมาณความร้อน และกลไกการถ่ายโอนความร้อน

ฟังเพชรมาต

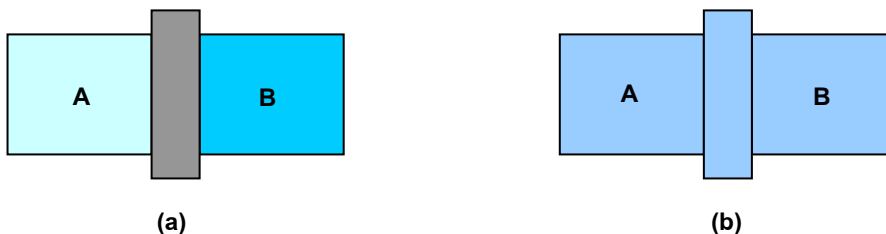


ต่อยักษ์ชนิดหนึ่งกำลังถูกผึ้งล้อมรอบอยู่ ตัวต่อนี้พยายามเข้าไปในรังผึ้งเพื่อจะลักน้ำหวานไปเป็นอาหาร แต่เผชิญผึ้งเห็นเสียก่อน ก็เลยถูกผึ้งล้อมไว้ เพื่อหยุดการกระทำของมัน หลังจากนั้นประมาณ 20 นาที ตัวต่อก็ตายโดยที่ผึ้ง ไม่ได้กัดหรือต่อยเลย สาเหตุที่ตัวต่อตายนั้นมาจากอุณหภูมิ นักฟิสิกส์สามารถตอบคำถามให้กับคุณได้ชัดเจนกว่านี้ [อ่านต่อครับ](#) 🌟

### 13-1 สมดุลความร้อนและกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

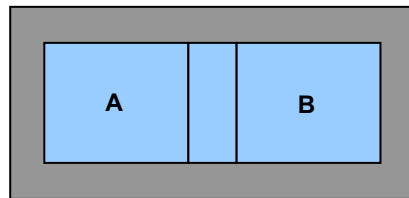
กฎข้อที่หนึ่งของนิวตัน กล่าวถึงสภาวะสมดุลไว้ว่า “วัตถุจะรักษาสภาวะอยู่นิ่ง หรือสภาวะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอ ในแนวเส้นตรงนอกจากจะมีแรงลัพธ์มากระทำ” กฎข้อนี้ของนิวตันจำกัดขอบเขตอยู่ในระบบทางกลศาสตร์เท่านั้น อย่างไรก็ตามระบบที่เราจะเขียนถึงต่อไปเป็นระบบทางความร้อน ซึ่งสามารถครอบคลุมระบบทางกลศาสตร์อีกด้วย ดังนั้น เมื่อเขียนว่าระบบสมดุลทางความร้อนในบทนี้เราจะให้ความหมายว่า เป็นระบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะภายในระบบ เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป

แนวคิดเกี่ยวกับสมดุลทางความร้อน สามารถแสดงด้วยการพิจารณา ระบบ 2 ระบบ ซึ่งแยกจากกันด้วยฉนวน ดังรูป (13-1a) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนในระบบ A จะไม่มีผลกระทบกับระบบ B แต่ถ้าแยกจากกันด้วยตัวนำ ดังรูป (13-1b) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนในระบบ A จะมีผลทำให้ระบบ B เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

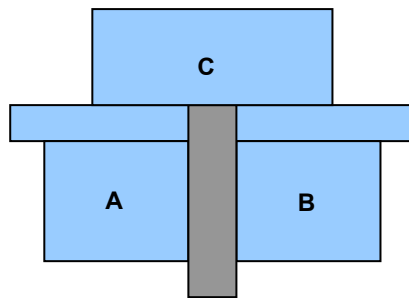


รูป 13-1 ระบบทั้งสองแยกจากกัน  
(a) ฉนวนทำด้วยฉนวน (b) ฉนวนทำด้วยตัวนำ

ระบบ A และ B ล้อมรอบด้วยฉนวน เพื่อให้แยกออกจากสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่ระบบทั้งสองแยกจากกันด้วยผนังที่ทำจากตัวนำ รูป 13-2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนภายในระบบ A จะทำให้ระบบ B เปลี่ยนแปลงตาม รอไปสักพัก ระบบทั้งสองจะเข้าสู่สมดุลทางความร้อน



รูป 13-2 ระบบทั้งสองแยกจากกันด้วยผนังที่ทำจากตัวนำ ล้อมรอบระบบทั้งสองด้วยฉนวน



รูป 13-3 ระหว่าง A กับ B กั้นด้วยผนังฉนวน ระหว่าง A กับ C และ B กับ C กั้นด้วยผนังตัวนำ

จากรูป 13-3 เราจะพิสูจน์ให้เห็นว่าระบบ A กับ B ซึ่งกั้นด้วยผนังฉนวน สามารถเข้าสู่สมดุลทางความร้อนได้ ถึงแม้ว่าไม่ได้สัมผัสกันโดยตรงเหมือนรูป 13-2 ถ้าเราให้ระบบ A และ B สัมผัสกับระบบที่สาม คือ C โดยผ่านทางผนังตัวนำ เริ่มแรกระบบ A มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน รอสักพัก ระบบ A และ C จะเข้าสู่สมดุลความร้อน ส่วนระบบ B และ C ก็เข้าสู่สมดุลความร้อนเช่นเดียวกัน แบบจำลองแสดงให้เห็นว่า A และ B ก็อยู่ในสมดุลความร้อนได้โดยไม่ต้องสัมผัสกันโดยตรง สรุปเป็นกฎข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์ได้ว่า ระบบทั้งสองจะอยู่ในสมดุลความร้อนได้ด้วยการใช้ระบบที่สามซึ่งช่วยให้เกิดสมดุลทางความร้อนพร้อมกัน

กฎข้อนี้ค่อนข้างแจ่มแจ้งชัดเจน ไม่เหมือนกับกฎของความรักที่คลุมเครือ เช่น สมชายรักสมศรี และสมศักดิ์รักสมศรี แต่ไม่ใช่สรุปว่า สมชายรักสมศักดิ์ คนละเรื่องกัน มีข้อน่าสังเกตว่า กฎข้อที่หนึ่ง สอง และสามของเทอร์โมไดนามิกส์ถูกสร้างขึ้นมาก่อน (ยังไม่ได้อธิบาย) กฎข้อที่ศูนย์จึงถูกตั้งขึ้นมาเพื่อจะบอกว่ามาก่อนกฎข้อที่หนึ่ง

ปริมาณที่ใช้บอกว่าระบบทั้งสองอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนก็คืออุณหภูมิ ถ้าระบบทั้งสองอยู่ในสมดุลความร้อนแสดงว่ามีอุณหภูมิเดียวกัน และถ้าระบบทั้งสองไม่ได้อยู่ในสมดุลความร้อนแสดงว่ามีอุณหภูมิแตกต่างกัน

## 13-2 มาตรฐานของความร้อน

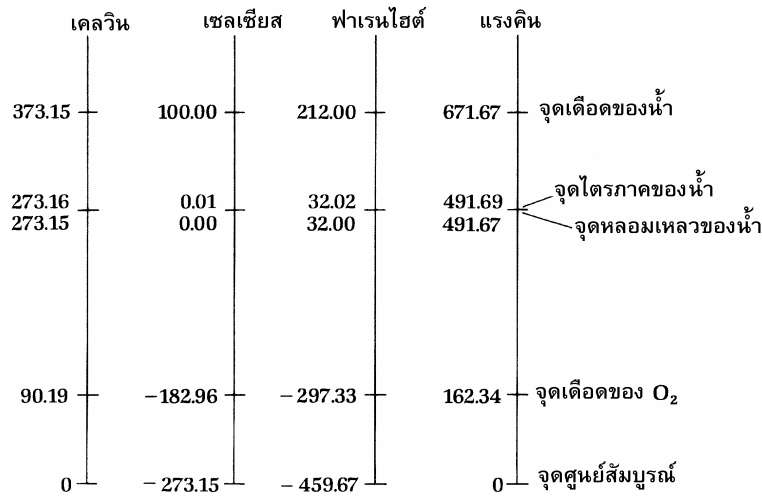
ความร้อนและความเย็นใช้ความรู้สึกหรือการสัมผัสบอกได้ลำบาก ตัวอย่างเช่น น้ำซุปร้อนชามหนึ่งกับน้ำเย็นถ้วยหนึ่ง ตั้งไว้ชั่วคราว คุณจะบอกว่า น้ำซุปร้อน และน้ำร้อนขึ้น ซึ่งอันที่จริงซุปร้อนและน้ำก็ยังไม่เย็นอยู่เพียงแต่เปลี่ยนแปลงไปบ้าง ดังนั้น ถ้าจะให้การวัดมีความแม่นยำจะต้องมีปริมาณที่แน่นอนเพื่อบอกว่าความร้อนและความเย็นอยู่ตรงไหน ปริมาณนี้มีชื่อเรียกว่า อุณหภูมิ และอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิที่เรารู้จักกันดีก็คือ เทอร์โมมิเตอร์

**มาตรฐานเซลเซียส** นิยามโดยอาศัยจุดเยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ภายใต้ความดันบรรยากาศเป็น 0 องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) และจุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์ภายใต้ความดันบรรยากาศเป็น 100 องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ )

**มาตรฐานฟาเรนไฮต์** นิยามโดยอาศัยจุดเยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ภายใต้ความดันบรรยากาศเป็น 32 องศาฟาเรนไฮต์ ( $^{\circ}\text{F}$ ) และจุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์ภายใต้ความดันบรรยากาศเป็น 212 องศาฟาเรนไฮต์ ( $^{\circ}\text{F}$ )

**มาตรฐานเคลวิน** ถูกนิยามขึ้นมาโดยมีขนาดเท่ากับมาตรฐานของเซลเซียส แต่ว่าเลื่อนจุดศูนย์มาอยู่ที่ 0 เคลวิน =  $-273.15^{\circ}\text{C}$  หรือ  $273.15\text{ K} = 0^{\circ}\text{C}$

**มาตรฐานแรงคิน** ถูกนิยามขึ้นมา โดยมีขนาดเท่ากับมาตรฐานของฟาเรนไฮต์ แต่ว่าเลื่อนจุดศูนย์มาอยู่ที่  $0^{\circ}\text{R} = -459.7^{\circ}\text{F}$  หรือ  $0^{\circ}\text{F} = 459.7^{\circ}\text{R}$



รูป 13-4 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐาน เคลวิน เซลเซียส แรงคิน และฟาเรนไฮต์

มาตรฐานเซลเซียสและฟาเรนไฮต์ มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^{\circ} \quad \dots\dots\dots (13-1)$$

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32^{\circ}) \quad \dots\dots\dots (13-2)$$

มาตราส่วนเคลวิน และเซลเซียสมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$T_K = T_C + 273.15^\circ \quad \dots\dots\dots (13-3)$$

มาตราส่วนแรงคิน และฟาเรนไฮต์มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$T_R = T_F + 459.7^\circ \quad \dots\dots\dots (13-4)$$

### 13-3 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ของแข็งส่วนใหญ่ขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน สมมติให้แท่งวัตถุแท่งหนึ่งมีความยาว  $L_0$  มีอุณหภูมิเริ่มต้น  $T_0$  ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $\Delta T$  ความยาวของแท่งวัตถุจะเพิ่มขึ้น  $\Delta L$  กำหนดให้  $\alpha$  เป็นสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad \dots\dots\dots (13-5)$$

หน่วยของ  $\alpha$  คือ  $K^{-1}$  หรือ  $(^\circ C)^{-1}$

โดยปกติ  $\alpha$  เป็นค่าคงที่ ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ไม่กว้างนัก

เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง ความยาว และอุณหภูมิย่อย ๆ ดังสมการ

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad \dots\dots\dots (13-6)$$

ค่าเฉลี่ย  $\alpha$  สำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ แสดงในตาราง 13-1

ตาราง 13-1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น

วัสดุ	อลูมิเนียม	ทองเหลือง	ทองแดง	แก้ว	ควอทซ์	คอนกรีต
$\alpha (^\circ C)^{-1}$	$2.4 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$0.4 - 0.9 \times 10^{-5}$	$0.04 \times 10^{-5}$	$0.7 - 1.4 \times 10^{-5}$

**ตัวอย่าง 13-1** แผ่นคอนกรีตยาว 12 m ที่อุณหภูมิ  $-5^\circ C$  ในฤดูหนาวอันเย็นยะเยือก ความยาวจะเปลี่ยนไปเท่าไร จากฤดูหนาวเป็นฤดูร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น  $35^\circ C$

**หลักการคำนวณ** จากตาราง 13-1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของคอนกรีต  $= 1 \times 10^{-5} (^\circ C)^{-1}$  แทนลงในสมการ (13-5) จะได้

$$\begin{aligned} \Delta L &= \alpha L_0 \Delta T = (1 \times 10^{-5} ^\circ C^{-1})(12m)(40 ^\circ C) \\ &\approx 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

เหตุผลนี้จึงทำให้แผ่นคอนกรีตที่ใช้ทำถนนต้องมีร่องอยู่ด้วยเพื่อป้องกันการขยายตัวนั่นเอง

การขยายตัวของวัตถุทั้งของแข็งและของเหลวเป็นไปทุกทิศทางทาง ไม่เฉพาะแต่ด้านยาวเท่านั้น

ด้านกว้างและด้านสูงก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น เมื่อวัตถุขยายตัว ปริมาตรจึงเพิ่มขึ้น  $\Delta V$  กำหนดให้  $\beta$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางปริมาตร สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad \dots\dots\dots (13-7)$$

หน่วยของ  $\beta$  คือ  $K^{-1}$  หรือ  $(^\circ C)^{-1}$

ตาราง 13-2 ค่าเฉลี่ย  $\beta$  สำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ

ของแข็ง	$\beta, (C^{\circ})^{-1}$	ของเหลว	$\beta, (C^{\circ})^{-1}$
อลูมิเนียม	$7.2 \times 10^{-5}$	เอทานอล	$75 \times 10^{-5}$
ทองเหลือง	$6.0 \times 10^{-5}$	คาร์บอนไดซัลไฟด์	$115 \times 10^{-5}$
ทองแดง	$5.1 \times 10^{-5}$	กลีเซอริน	$49 \times 10^{-5}$
แก้ว	$1.2 - 2.7 \times 10^{-5}$	ปรอท	$18 \times 10^{-5}$
เหล็กกล้า	$3.6 \times 10^{-5}$		
ควอทซ์	$0.12 \times 10^{-5}$		

ตัวอย่าง 13-2 ทรงกลมอลูมิเนียมมีรัศมี  $R = 3.0 \text{ mm}$  ที่อุณหภูมิ  $100.0^{\circ} \text{C}$  จงหาปริมาตรที่  $0.0^{\circ} \text{C}$

หลักการคำนวณ ปริมาตรของทรงกลม  $\frac{4}{3} \pi R^3$  ที่  $100^{\circ} \text{C}$  คือ  $113.1 \text{ mm}^3$

จากตาราง 13-2 แทนค่าลงไปในสมการ 13-7 จะได้

$$\begin{aligned} \Delta V &= (7.2 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1})(113.1 \text{ mm}^3)(-100 \text{ C}^{\circ}) \\ &= -0.81 \text{ mm}^3 \\ \text{ปริมาตรที่ } 0.0^{\circ} \text{C} &= 113.1 \text{ mm}^3 - 0.8 \text{ mm}^3 \\ &= 112.3 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

ตาราง 13-3 ปริมาตรและความหนาแน่นของน้ำมวล 1 กรัม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

$T, ^{\circ} \text{C}$	ปริมาตรของน้ำ 1 กรัม $\text{cm}^3$	ความหนาแน่น $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
0	1.0002	0.9998
4	1.0000	1.0000
10	1.0003	0.9997
20	1.0018	0.9982
50	1.0121	0.9881
75	1.0258	0.9749
100	1.0434	0.9584

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของของแข็ง มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น โดยพิจารณากล่องสี่เหลี่ยมขนาด  $L_1 \times L_2 \times L_3$  (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  สูง) ตามลำดับ ปริมาตรสามารถคำนวณได้จาก

$$V_0 = L_1 L_2 L_3$$

จากสมการ (13-5) อุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $\Delta T$  ปริมาตรใหม่จะเป็น

$$\begin{aligned} V_0 + \Delta V &= [L_1(1+\alpha\Delta T)][L_2(1+\alpha\Delta T)][L_3(1+\alpha\Delta T)] \\ &= L_1L_2L_3(1+\alpha\Delta T)^3 \\ &= V_0(1+\alpha\Delta T)^3 \\ &= V_0[1+3\alpha\Delta T+3\alpha^2(\Delta T)^2+\alpha^3(\Delta T)^3] \end{aligned}$$

ถ้า  $\Delta T$  น้อย เทอม  $(\Delta T)^2$  และ  $(\Delta T)^3$  ก็จะมีน้อยมาก เราสามารถประมาณให้เป็นศูนย์ ซึ่งจะได้

$$\Delta V = (3\alpha) V_0 \Delta T$$

เทียบกับสมการ (13-7) จะได้

$$\beta = 3\alpha \quad \dots\dots\dots (13-8)$$

ทดลองตรวจสอบด้วยตนเองว่า ตาราง 13-2 เป็น 3 เท่าของตาราง 13-1 จริงหรือไม่

### 13-4 ความเค้นจากความร้อน

ถ้ายึดแท่งวัตถุที่ปลายทั้ง 2 ข้าง และให้ความร้อน แท่งวัตถุจะขยายตัว แต่เนื่องจากมันถูกยึดไว้ จึงเกิดความเค้นอัดขึ้น แต่ถ้าลวดอุณหภูมิลง แท่งวัตถุจะหดตัว แต่เนื่องจากมันถูกยึดไว้ จึงเกิดความเค้นดึงขึ้น ความเค้นทั้ง 2 กรณีเป็นความเค้นที่เกิดจากความร้อน

สมมติให้แท่งวัตถุยาว  $L_0$  พื้นที่หน้าตัด  $A$  และอุณหภูมิลดลง  $\Delta T$  การเปลี่ยนแปลงของความยาวต่อความยาวเดิม จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -\alpha\Delta T \quad \dots\dots\dots (13-9)$$

สมการบนมีเครื่องหมายเป็นลบ เพราะว่าแท่งวัตถุไม่ได้หดตัวลงอย่างอิสระขณะที่อุณหภูมิลดลง ตัวยึดจะดึงวัตถุให้ยาวขึ้น จากสมการนิยามโมดูลัสของยังจะได้

$$\begin{aligned} Y &= \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \\ \frac{\Delta L}{L_0} &= \frac{F}{Ay} \quad \dots\dots\dots (13-10) \end{aligned}$$

แทนสมการ (13-9) ลงในสมการ (13-10) จะได้

$$\begin{aligned} \alpha\Delta T + \frac{F}{Ay} &= 0 \\ F &= -AY\alpha\Delta T \quad \dots\dots\dots (13-11) \end{aligned}$$

ถ้าอุณหภูมิลดลง  $\Delta T$  เป็นลบ ค่า  $F$  จะเป็นบวก

$$\frac{F}{A} = -Y\alpha\Delta T \quad \dots\dots\dots (13-12)$$

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $\Delta T$  เป็นบวก ค่า  $\frac{F}{A}$  เป็นลบ จะเป็นความเค้นชนิดอัด

ความเค้นเนื่องจากความร้อน อาจเกิดจากการขยายตัวทางความร้อนของวัตถุที่ไม่สม่ำเสมอ ตัวอย่างเช่น ใส่น้ำร้อนเดือดลงไปในแก้ว ทำให้แก้วแตกสาเหตุเป็นเพราะปริมาตรที่ขยายตัวของน้ำมากกว่า การขยายตัวของแก้ว

ความดันที่เพิ่มขึ้น  $\Delta p$  เพราะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป  $\Delta T$  สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta p &= B\beta\Delta T & \dots\dots\dots (13-13) \\ B &= \text{บ้ลค์โมดูลัสของวัตถุ} \end{aligned}$$

### 13-5 ปริมาณของความร้อน

ปริมาณความร้อนสามารถนิยามได้ด้วยการเปรียบเทียบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ตัวอย่างเช่น 1 แคลอรี (Cal) คือปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส (หรือ 1 K) จากการทดลองในภายหลังพบว่าความไม่แน่นอนเหมือนกัน เพราะน้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 90° C ถึง 91° C ต้องใช้ปริมาณความร้อนมากกว่าน้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20° C ถึง 21° C ดังนั้นเพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน จึงมีผู้กำหนดว่า 1 แคลอรี คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 14.5° C ถึง 15.5° C อย่างไรก็ตาม บางประเทศไม่ยอมรับและใช้มาตรฐาน ในช่วงอื่นหรือหน่วยอื่นแทน จนถึงทุกวันนี้จึงความหลากหลายอยู่พอสมควร ยกตัวอย่างเช่น 1 บีทียู (Btu) ซึ่งเป็นหน่วยของอังกฤษก็นิยมใช้กันไม่น้อย คือปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 63° F ถึง 64° F

หน่วย Btu มีความสัมพันธ์กับหน่วย cal ดังนี้

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal}$$

จากการทดลองปริมาณความร้อนกับงานทางกลศาสตร์ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 4186 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft}\cdot\text{lb} = 252 \text{ cal} = 1055 \text{ J}$$

สารต่างชนิดกันมีความสามารถในการรับหรือคายพลังงานความร้อนได้ต่างกัน และเราเรียกค่าพลังงานความร้อนที่ทำให้สารชนิดหนึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ว่า ความจุความร้อน (heat capacity "C") ของสารชนิดนั้นตามที่ใช้ในระบบเอสไอเป็นจูลต่อเคลวิน(J/K) โดยที่ค่าความจุความร้อนของสารดังกล่าวนี้ นอกจากจะต่างกันไปตามชนิดของสารแล้วยังขึ้นกับขนาดคือปริมาตรหรือมวล รวมถึงจำนวน โมลอีกด้วย ดังนั้น จึงไม่เหมาะที่จะใช้ค่าความจุความร้อนของสารเพื่อเป็นเกณฑ์สำหรับการเปรียบเทียบ เรา มักจะพิจารณาสารหลายชนิดเปรียบเทียบกัน โดยใช้ค่าความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลของสารแทน และ เรียกปริมาณดังกล่าวนี้ว่า ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity "c") ของสารนั้นโดยมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นจูลต่อ (กิโลกรัม-เคลวิน) "J/kg-K" แต่บางทีก็กล่าวถึงในนาม ความร้อนจำเพาะ (specific heat "c") ซึ่งก็คือปริมาณเดียวกันนั่นเอง นอกจากนี้ ในกรณีที่ต้องการกล่าวให้สัมพันธ์กับจำนวนโมล (n) ของสาร ก็จะใช้ค่าความจุความร้อนต่อโมล โดยเรียกว่า ความจุความร้อนโมลาร์ (molar heat capacity "C") ของสารนั้นก็คือ C/n และมีหน่วยเป็นจูลต่อโมล (J/mole) ในระบบเอสไอ

ถ้าสารชนิดหนึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $\Delta T$  เคลวิน โดยมีพลังงานความร้อนที่ได้รับเป็น Q จูล

จะได้ 
$$Q = c(\Delta T) = mc(\Delta T) = nC(\Delta T) \dots\dots\dots (13-14)$$

**ตาราง 13-4** ความจุความร้อนจำเพาะและความจุความร้อนโมลาร์ของวัตถุบางชนิด (ค่าเฉลี่ย)

รักษาความดันให้คงที่ ; วัตถุอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 0° C ถึง 100° C

โลหะ	ความจุความร้อนจำเพาะ (c)		M	ความจุความร้อนโมลาร์C
	J·kg <sup>-1</sup> ·(C <sup>o</sup> ) <sup>-1</sup>	Cal·g <sup>-1</sup> ·(C <sup>o</sup> ) <sup>-1</sup>	g·mol <sup>-1</sup>	J·mol <sup>-1</sup> ·(C <sup>o</sup> ) <sup>-1</sup>
อลูมิเนียม	910	0.217	27.0	24.6
เบอริลเลียม	1970	0.417	9.01	17.7
ทองแดง	390	0.093	63.5	24.8
เอทานอล	2428	0.58	46.0	112.0
น้ำแข็ง (25° C ถึง 0° C)	2000	0.48	18.0	36.5
เหล็ก	470	0.112	55.9	26.3
ตะกั่ว 0 – 300° C	130	0.031	207.0	26.9
ปรอท	138	0.033	201.0	27.7
เกลือ	879	0.21	58.5	51.4
เงิน	234	0.056	108.0	25.3
น้ำ	4190	1.00	18.0	75.4

สารชนิดหนึ่งสามารถเปลี่ยนสถานะ (state) หรือเฟส (phase) ณ อุณหภูมิหนึ่ง โดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยน แต่จะเป็นการรับหรือคายพลังงานความร้อนที่สุดแต่กระบวนการของการเปลี่ยนเฟส เราเรียกพลังงานความร้อนที่เกี่ยวกับกระบวนการของการเปลี่ยนเฟสของสารโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนตามที่กล่าวถึงนี้ว่า **ความร้อนแฝง (latent heat)** ของสาร ถ้าเป็นสารชนิดเดียวกันแต่มีมวลต่างกันก็จะมีค่าความร้อนแฝงที่ต่างกันไป ยิ่งถ้าเป็นสารต่างชนิดกัน ก็ย่อมมีค่าที่ไม่อาจมีเกณฑ์ที่ใช้เปรียบเทียบกันได้ จึงกำหนด ค่าความร้อนแฝงต่อหน่วยมวลของสารเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ โดยเรียกว่า **ความร้อนแฝงจำเพาะ (specific latent heat "L")** ของสารมีหน่วยเป็นจูลต่อกิโลกรัม (J/kg) ในระบบเอสไอ

สมมติ สารชนิดหนึ่ง ซึ่งมีมวล m กิโลกรัม และมีค่าความร้อนแฝงจำเพาะ L จูลต่อกิโลกรัมเมื่อเปลี่ยนสถานะจนหมด โดยมีการรับหรือคายพลังงานความร้อน Q จูล  
จะได้

$$Q = mL \quad \dots\dots\dots (13-15)$$

ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิขณะที่สารชนิดนั้นมีการเปลี่ยนเฟสเลย

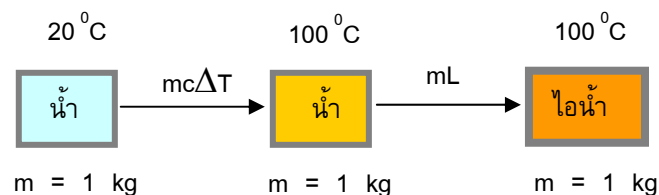
ตาราง 13-5 ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวและการกลายเป็นไอ

	จุดหลอมเหลว ปกติ (1 K)	$L_F$ หลอมเหลว (1 kJ·kg <sup>-1</sup> )	จุดเดือดปกติ (1 K)	$L_V$ กลายเป็นไอ (1 kJ·kg <sup>-1</sup> )
ซีลีเนียม	3.5	5.23	4.216	20.9
ไฮโดรเจน	13.84	58.6	20.26	452
ไนโตรเจน	63.18	25.5	77.34	201
ออกซิเจน	54.36	13.8	90.18	213
เอริลอัลกอฮอล์	159	104.2	351	854
ปรอท	234	11.8	630	272
น้ำ	273.15	335	373.15	2256
กำมะถัน	392	38.1	717.75	326
ตะกั่ว	600.5	24.5	2023	871
พลวง	903.65	165	1713	561
เงิน	1233.95	88.3	2466	2336
ทอง	1336.15	64.5	2933	1578
ทองแดง	1356	134	1460	5069

**ตัวอย่าง 13-3** จงหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ 1 กิโลกรัม ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้น 20 องศาเซลเซียส ให้เดือดและระเหยกลายเป็นไอทั้งหมด

กำหนดให้ ค่าความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอของน้ำเท่ากับ 2,300 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 4.2 กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อเคลวิน

**หลักการคำนวณ** เขียนแผนภาพการต้มน้ำจนเดือดกลายเป็นไวดังรูป



จากแผนภาพจะได้

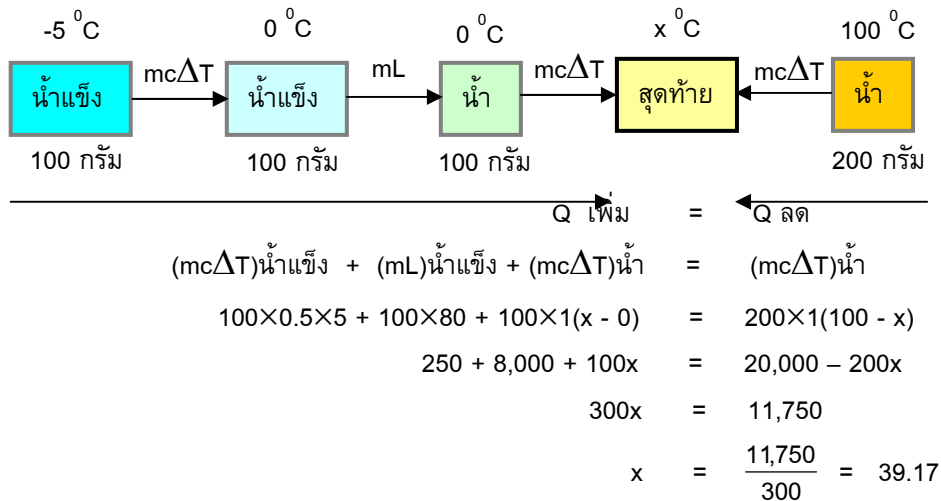
$$Q = mc\Delta T + mL$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} Q &= 1 \times 4.2 (100 - 20) + 1 \times 2,300 \\ &= 336 + 2,300 = 2,636 \text{ กิโลจูล} \end{aligned}$$

**ตัวอย่าง13-4** น้ำเดือด 200 กรัม ผสมกับน้ำแข็ง 100 กรัม ที่ -5 องศาเซลเซียส จงหาอุณหภูมิผสม กำหนดความร้อนแฝง และความร้อนจำเพาะน้ำแข็งเท่ากับ 80 แคลอรี/กรัม และ 0.5 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 1 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส

**หลักการคำนวณ** จากโจทย์พวกคายความร้อนได้แก่ น้ำ และพวกรับความร้อนได้แก่ น้ำแข็ง เขียนแผนภาพแล้วคำนวณหาอุณหภูมิสุดท้ายจาก  $Q_{\text{ลด}} = Q_{\text{เพิ่ม}}$  เขียนแผนภาพดังรูป



นั่นคือ อุณหภูมิผสมเท่ากับ 39.17 องศาเซลเซียส

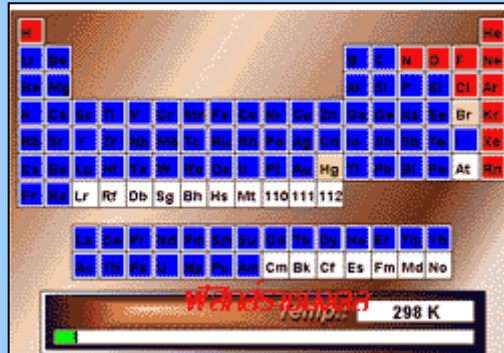
### บทความออนไลน์



ในตอนเช้าของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2546 เวลา 08.53 กระสวยอวกาศ Columbia ที่ออกแบบใช้เวลานานถึง 10 ปี และใช้เวลาสร้างอีก 2 ปี ด้วยงบประมาณสูงกว่า 9 แสนล้านบาท โดยหน้าที่หลักนำพาลูกเรือและสัมภาระขึ้นไปโคจรและบินกลับลง มา ได้ระเบิดแตกสลายอีกครั้ง ขณะที่ยานกำลังจะลงจอดที่ฟลอริดา ซึ่งเป็นโศกนาฏกรรมครั้งเลวร้ายของนาซาที่ คร่าชีวิตนักบินไป 7 คน ในบรรยากาศของโลกที่ระยะ 203,000 ฟุตเหนือรัฐ Texasความเป็นไปได้ทั้งหมดของการระเบิดในครั้งนี้

[เชิญอ่านต่อครับ](#) 🌟

## การทดลองเสมือนจริง



### อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส

คุณสามารถเห็นจุดหลอมเหลว และอุณหภูมิจุดเดือดสำหรับธาตุต่างๆ ภายในตารางธาตุนี้ ถ้าเป็นสีน้ำเงิน แสดงว่าธาตุนั้นอยู่ในสถานะของแข็ง สีเหลืองอยู่ในสถานะของเหลว และสีแดงอยู่ในสถานะแก๊ส ส่วนช่องไหนถ้าเป็นสีขาวแสดงว่า ธาตุนั้นมีไอโซโทปที่ไม่เสถียร และยังไม่ทราบอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส

ในห้องทดลองเสมือนจริงนี้ เรากำหนดให้อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $298 \text{ K} = 25^\circ \text{ C}$  คุณสามารถปรับอุณหภูมิได้ด้วยตนเอง โดยกดที่ลูกศรของคีย์บอร์ด (" $\leftarrow$ " : อุณหภูมิลดลงครั้งละ  $15 \text{ K}$  , " $\rightarrow$ " : อุณหภูมิเพิ่มขึ้นครั้งละ  $15 \text{ K}$ ) หรือจะใช้เมาส์ลากตัวเลื่อนก็ได้เช่นเดียวกัน [กดที่รูปภาพหรือที่นี่เพื่อเข้าห้องทดลอง](#) 🌞

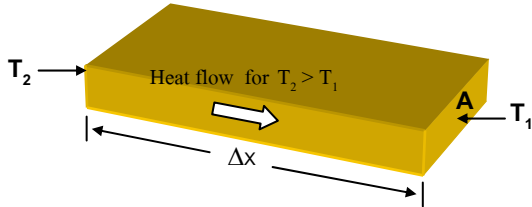
## 13-6 การถ่ายโอนความร้อน

การถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิ 2 บริเวณ โดยความร้อนจะถ่ายโอนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ถ่ายโอนจนกระทั่งทั้ง 2 บริเวณมีอุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งเราสามารถแบ่งการถ่ายโอนความร้อนออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. การถ่ายโอนความร้อนโดยการนำ
2. การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา
3. การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี

## 1. การถ่ายโอนความร้อนโดยการนำ

ถ้าเราเผาปลายแท่งโลหะข้างหนึ่ง ความร้อนก็จะไหลจากด้านปลายที่ร้อนไปยังด้านปลายที่เย็น โดยโมเลกุลของแท่งโลหะด้านปลายที่ร้อนจะเกิดการสั่นอย่างรุนแรง พลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะถูกถ่ายเทไปยังโมเลกุลที่อยู่ใกล้ๆ ส่งต่อไปเป็นทอดๆ โดยที่โมเลกุลไม่ได้มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง



รูป 13-5 การนำความร้อนบนก้อนโลหะ

ถ้าความร้อนไหลจากอุณหภูมิสูง  $T_2$  ไปสู่อุณหภูมิต่ำ  $T_1$  ตามแนวแกน  $x$  ของแท่งโลหะซึ่งมีความยาว  $L$  พื้นที่หน้าตัด  $A$  อัตราการไหลของความร้อนหรือกระแสความร้อน แทนด้วย  $H$  คือปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลง  $\Delta Q$  ในช่วงเวลาใด  $\Delta t$  เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

หรือ 
$$H = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_2 - T_1}{L} \dots\dots\dots (13-16)$$

เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่บวก เรียกว่า สภาพนำความร้อน (thermal conductivity) ของวัสดุ หน่วยของ  $H$  คือ  $J \cdot s^{-1}$  หรือ วัตต์ (W)

**ตัวอย่าง 13-5** ก่อ่งโฟมสำหรับใช้ปิดนิก มีพื้นที่ผืนทั้งหมด  $0.4 \text{ m}^2$  หนา  $2.0 \text{ cm}$  ถ้านำน้ำแข็งอุณหภูมิ  $0^\circ\text{C}$  เก็บไว้ในก่อก่อ่งโฟม และวัดอุณหภูมิภายนอกได้เท่ากับ  $30^\circ\text{C}$  จงคำนวณว่าในเวลา 1 วัน น้ำแข็งจะละลายไปเท่าใด

**หลักการคำนวณ** กำหนดให้  $A = 0.4 \text{ m}^2$   $L = 2.0 \text{ cm} = 0.02 \text{ m}$

กำหนดค่า  $k$  ของโฟม =  $0.01 \text{ Js}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} (\text{C})^{-1}$

แทนลงไปในสมการ 13-16 จะได้

$$\begin{aligned} H &= \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_2 - T_1}{L} \\ &= (0.01 \text{ Js}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} (\text{C})^{-1}) (0.4 \text{ m}^2) \frac{30^\circ\text{C}}{0.02\text{m}} \\ &= 6 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

1 วันมี  $86,400 \text{ s}$  ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ไหลออกจากก่อก่อ่งใน 1 วัน คือ

$$(6 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1})(86,400 \text{ s}) = 5.18 \times 10^5 \text{ J}$$

ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวของน้ำแข็ง =  $335 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$

ดังนั้น ปริมาณน้ำแข็งที่หลอมละลายคือ

$$\begin{aligned} m &= \frac{Q}{L_F} \\ &= \frac{5.18 \times 10^5 \text{ J}}{335 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}} = 1,547 \text{ กรัม หรือ } 1.5 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

## 2. การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา

เป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยอาศัยให้โมเลกุลของตัวกลางเคลื่อนที่พาพลังงานความร้อนไปกับตัวกลางจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอัตราการส่งผ่านความร้อนออกจากวัตถุก้อนหนึ่งโดยการพาความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลที่เป็นตัวพาความร้อนกับอุณหภูมิของพื้นที่ผิว A ที่อยู่ติดกับของไหล เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = hA \Delta T \quad \dots\dots\dots (13-17)$$

เมื่อ h เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection coefficient)

**ตาราง 13-6** สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติในอากาศ ณ ความดันบรรยากาศ

พื้นผิว	h (1 W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )
แผ่นแนวระดับ, หันหน้าขึ้นบน	2.491 (ΔT) <sup>1/4</sup>
แผ่นแนวระดับ, หันหน้าลงล่าง	1.314 (ΔT) <sup>1/4</sup>
แผ่นแนวตั้ง	1.775 (ΔT) <sup>1/4</sup>
ท่อแนวระดับหรือแนวตั้งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง D	4.186 (ΔT/D) <sup>1/4</sup>

**ตัวอย่าง 13-6** อากาศภายในห้องมีอุณหภูมิ 15 °C และอากาศภายนอกมีอุณหภูมิ 35 °C จงหาอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งตารางเมตรของกระจกหน้าต่างซึ่งมีสภาพนำความร้อน 0.8 J·m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>(°C)<sup>-1</sup> และหนา 3 mm

**หลักการคำนวณ** การถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นโดย

1. การพาในห้อง
2. การนำผ่านกระจกหน้าต่าง
3. การพาของอากาศภายนอก

สมมติให้กระจกหน้าต่างมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ T = 25 °C ผลต่างอุณหภูมิจากอากาศภายในห้องกับกระจกหน้าต่างคือ (15-25) °C = -10 °C และผลต่างอุณหภูมิจากกระจกหน้าต่างกับอากาศภายนอก คือ (25-35) °C = -10 °C ซึ่งเท่ากัน (ไม่จำเป็นต้องเท่ากันเสมอไป ขึ้นกับอุณหภูมิของกระจก) ฉะนั้นสัมประสิทธิ์การพาในกรณีทั้งสอง (จากตาราง 13-6) คือ

$$\begin{aligned} h &= 1.775 (\Delta T)^{1/4} \quad \text{Js}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} (\text{C})^{-1} \\ &= 1.775 (10)^{1/4} \quad \text{Js}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} (\text{C})^{-1} \\ &= 3.16 \quad \text{Js}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} (\text{C})^{-1} \end{aligned}$$

และจากสมการ 13-17 การพาความร้อนต่อหนึ่งหน่วยตารางเมตรคือ

$$\begin{aligned} \frac{H}{A} &= h \Delta T \\ &= (3.16 \quad \text{Js}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} (\text{C})^{-1}) (-10 \text{C}) \\ &= -31.6 \quad \text{Js}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

อย่างไรก็ตาม กระจกหน้าต่างย่อมมีอุณหภูมิภายนอกและภายในไม่เท่ากัน เพื่อให้เกิดการนำความร้อนได้ในอัตรา  $31.6 \text{ Js}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  โดยการใช้สมการ 13-16 จะได้

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{HL}{kA} \\ &= \frac{(-31.6 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})(3 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (^{\circ}\text{C})^{-1}} \\ &= 0.118 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

ฉะนั้น ผิวในมีอุณหภูมิประมาณ  $24.94 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และผิวด้านนอกประมาณ  $25.06 \text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3. การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี

วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิเหนือศูนย์องศาสัมบูรณ์จะปลดปล่อยพลังงานจากผิวของวัตถุนั้น อัตราการแผ่รังสีจากผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิว  $A$  และอุณหภูมิสัมบูรณ์ยกกำลังสี่(หน่วยเป็นเคลวิน) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่า  $e$  เป็นค่าสภาพส่งรังสี (emissivity) ซึ่งขึ้นกับธรรมชาติของพื้นผิวนั้นๆ โดยค่า  $e$  จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยปกติถ้าวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนกับสิ่งแวดล้อม ก็จะแผ่และดูดกลืนพลังงานในอัตราเดียวกัน จึงทำให้อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าวัตถุนั้นร้อนกว่าสิ่งที่อยู่รอบๆ ก็แผ่พลังงานออกมามากกว่าที่จะดูดกลืน ตัวแผ่รังสีในอุดมคติหรือวัตถุดำ (black body) จะดูดกลืนรังสีทั้งหมดที่ตกกระทบวัตถุ ค่า  $e$  ของวัตถุดำมีค่าเท่ากับ 1

กฎของสเตฟาน เขียนเป็นสมการการแผ่รังสีของวัตถุได้ดังนี้

$$H = e\sigma A T^4 \quad \dots\dots\dots (13-18)$$

$H$  คือ อัตราการแผ่รังสีมีหน่วยเป็นวัตต์

$\sigma$  เป็นค่าคงตัวสากล เรียกว่า ค่าคงตัวของสเตฟาน-โบลตมานน์  $= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิ  $T_1$  ขณะที่สิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิ  $T_2$  กำลังเนื่องจากการแผ่รังสี เขียนได้เป็น

$$H_{สุทธิ} = e\sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad \dots\dots\dots (13-19)$$

**ตัวอย่าง 13-7** แผ่นเหล็กกล้าสี่เหลี่ยมจัตุรัส ยาวด้านละ 10 cm ให้ความร้อนจนถึง  $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ถ้าค่าสภาพส่งรังสี  $e \approx 1$  อัตราการแผ่รังสีจะเป็นเท่าไร

**หลักการคำนวณ** พื้นที่ผิวที่แผ่รังสีมี 2 ด้าน คือ  $2(0.01\text{m})^2 = 0.02 \text{ m}^2$

$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิของพื้นที่ผิว} &= 600 + 273 \text{ K} \\ &= 873 \text{ K} \text{ แทนลงในสมการ จะได้} \\ H &= (0.02 \text{ m}^2)(1)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})(873 \text{ K})^4 \\ &= 658.67 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

ถ้าเราให้ความร้อนกับแผ่นเหล็กโดยผ่านทางขดลวดความร้อน อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ให้กับแผ่นเหล็ก = 658.67 วัตต์

## บทความออนไลน์



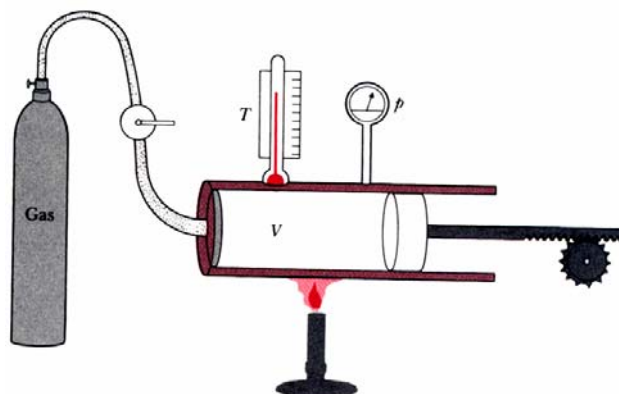
### Transfer of heat

#### การถ่ายโอนความร้อน

เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ พลังงานความร้อน จะถ่ายโอนโดยการนำ การพา และการแผ่รังสี จากบริเวณที่ร้อนกว่าไปยังบริเวณที่เย็นกว่า เป็นการเพิ่มพลังงานภายใน ของอะตอมที่เย็นกว่า ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และลดพลังงานของอะตอมที่ร้อนกว่า อุณหภูมิจะลดลงจนกระทั่งอุณหภูมิของสองบริเวณเท่ากัน สถานะนี้เรียกว่า สมดุลความร้อน [อ่านต่อครับ](#) 🌞

### 13-7 สมการสถานะ

สมการสถานะ (Equation of state) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของสารที่สภาวะสมดุล หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง สมการสถานะ เป็นสมการแสดงค่าของคุณสมบัติตัวหนึ่งในรูปฟังก์ชันของคุณสมบัติอื่น ๆ ที่สภาวะสมดุลเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น บรรจุแก๊สจำนวน  $n$  โมล ลงในภาชนะปิด (ปริมาตรคงที่) ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ เมื่อวัดดูจะพบว่าความดันก็คงที่ด้วย อย่างไรก็ตามถ้าเปลี่ยนตัวแปร  $n$ ,  $V$  และ  $T$  ความดัน  $p$  จะเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรของระบบที่เปลี่ยนไป ตัวแปรเหล่านี้ สามารถสร้างขึ้นเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ในรูปของคณิตศาสตร์ ที่เรียกว่า **สมการสถานะ**



รูป 13-6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของแก๊ส

อุปกรณ์ดังรูป 13-6 สามารถควบคุมความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิของแก๊สได้ โดยการอัดแก๊สเข้าไปในกระบอกสูบ

$$\text{จากสูตร} \quad m = nM \quad \dots\dots\dots(13-20)$$

**การทดลองกับแก๊สที่ความหนาแน่นต่ำ นำไปสู่ผลสรุปดังนี้**

1. ให้  $n$  และ  $T$  คงที่,  $p$  จะเป็นสัดส่วนกลับกับ  $V$  คือถ้าความดันเพิ่มขึ้น 2 เท่า ปริมาตรจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ความสัมพันธ์นี้เรียกว่ากฎของบอยล์ เขียนอยู่ในรูปของสมการได้ ดังนี้

$$pV = \text{ค่าคงที่} \quad (n, T \text{ คงที่}) \quad \dots\dots\dots(13-21)$$

ให้  $p_1$  และ  $V_1$  เป็นความดัน และปริมาตร ณ สภาวะเริ่มต้น

$p_2$  และ  $V_2$  เป็นความดัน และปริมาตร ณ สภาวะสุดท้าย

ดังนั้น 
$$p_1V_1 = p_2V_2 \quad \dots\dots\dots(13-22)$$

2. ให้  $n$  และ  $p$  คงที่,  $V$  จะเป็นสัดส่วนตรงกับ  $T$  ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า กฎของชาร์ล เขียนอยู่ในรูปของสมการได้ ดังนี้

$$\frac{V}{T} = \text{ค่าคงที่} \quad (n, p \text{ คงที่}) \quad \dots\dots\dots(13-23)$$

ให้  $p_1$  และ  $T_1$  เป็นความดัน และอุณหภูมิ ณ สภาวะเริ่มต้น

$p_2$  และ  $T_2$  เป็นความดัน และอุณหภูมิ ณ สภาวะสุดท้าย

ดังนั้น 
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \dots\dots\dots(13-24)$$

3. ให้  $V$  และ  $T$  คงที่,  $p$  จะเป็นสัดส่วนตรงกับ  $n$  อุปกรณ์ ดังรูป 13-6 สามารถควบคุมปริมาณแก๊ส ด้วยการบีบหรือสูบแก๊สออกจากกระบอกสูบ ช่วยควบคุม  $V$  และ  $T$  ให้คงที่ได้ เขียนอยู่ในรูปของสมการได้ ดังนี้

$$\frac{p}{n} = \text{ค่าคงที่} \quad (V, T \text{ คงที่})$$

เช่นเดียวกันกับข้อ 2 จะได้ว่า

$$\frac{p_1}{n_1} = \frac{p_2}{n_2}$$

รวมความสัมพันธ์ จากข้อ 1 ถึง 3 จะได้ว่า

$$\frac{pV}{nT} = \text{ค่าคงที่} \quad \text{แทนด้วย } R \text{ เรียกว่าค่าคงตัวแก๊ส}$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น 
$$pV = nRT \quad \dots\dots\dots(13-25)$$

$$R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

ในสภาวะที่เป็นจริง ความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$ ,  $V$ ,  $n$  และ  $T$  อาจคลาดเคลื่อนไปจากสมการ 13-25 บ้าง แต่ความคลาดเคลื่อนนี้มีค่าน้อยมาก กล่าวได้ว่า ไม่มีแก๊สใดมีคุณสมบัติเหมือนกับที่ไว้ในสมการ (13-25) ร้อยเปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม เรียกแก๊สที่มีคุณสมบัติและประพฤติตามสมการนี้ว่า **แก๊สอุดมคติ** ถ้าควบคุมให้มวลคงที่  $\frac{pV}{T}$  จะเป็นค่าคงที่ด้วย เมื่อใส่ตัวห้อย 1 และ 2 เพื่อบอกว่าเป็นสภาวะเริ่มต้นและสุดท้ายของแก๊ส เขียนอยู่ในรูปของสมการได้ ดังนี้

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{ค่าคงที่} \quad \dots\dots\dots(13-26)$$

ให้อุณหภูมิ  $T_1$  และ  $T_2$  เท่ากันจะได้

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{ค่าคงที่} \quad \dots\dots\dots(13-27)$$

ซึ่งก็คือกฎของบอยล์นั่นเอง

**ตัวอย่าง13-8** ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard temperature and pressure) ย่อว่า STP จงหาปริมาตรของแก๊สจำนวน 1 โมล(STP คือสภาวะที่มีอุณหภูมิเท่ากับ  $0^\circ \text{C} = 273 \text{ K}$  และมีความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศ)

**หลักการคำนวณ** จากสมการ 13-25

$$V = \frac{nRT}{p}$$

$$= (1\text{mol})\left(\frac{8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}{1.0 \times 10^5 \text{ Pa}}\right)(273 \text{ K})$$

$$= 0.0224 \text{ m}^3 = 22.4 \text{ L}$$

**ตัวอย่าง13-9** ก) จงหาความดันของแก๊สฮีเลียม  $n = 0.85 \text{ mol}$  ปริมาตร  $V = 0.012 \text{ m}^3$  ที่อุณหภูมิ  $T = 273 \text{ K}$

ข) ปริมาตรของแก๊ส ณ ความดันเดียวกันที่อุณหภูมิ  $T = 580 \text{ K}$

**หลักการคำนวณ**

ก) จากสมการ 13-25

$$p = \frac{nRT}{V}$$

$$= (0.85 \text{ mol})\frac{(8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})}{0.012 \text{ m}^3}(273 \text{ K})$$

$$= 160 \text{ kPa}$$

ข) ให้ระบบในข้อ a กำกับด้วยตัวห้อย a และระบบในข้อ b กำกับด้วยตัวห้อย b จากสมการ 13-26 จะได้

$$\frac{p_a V_a}{T_a} = \frac{p_b V_b}{T_b}$$

กำหนดให้  $p_a = p_b$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad V_b &= \frac{T_b}{T_a} \\ V_b &= (0.012 \text{ m}^3) \frac{580 \text{ K}}{273 \text{ K}} = 0.0255 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

**ตัวอย่าง 13-10** จงหาความดันของอากาศที่ระดับความสูงต่าง ๆ สมมติให้อุณหภูมิคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความสูง (เพื่อให้ง่ายจึงสมมติเช่นนี้ ในความเป็นจริงซับซ้อนกว่านี้มาก)

**หลักการคำนวณ** จากสมการ 12-3

$$\frac{dp}{dy} = -\rho g \quad \text{ความหนาแน่น } \rho \text{ ไม่คงที่แต่เปลี่ยนไปพร้อมกับความดัน}$$

แทน  $n$  ด้วย  $\frac{M}{n}$  ลงในสมการ 13-25 จะได้

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

$$\text{จัดรูปสมการใหม่} \quad V = \frac{m RT}{M p}$$

$$\text{แทน } V \text{ ลงไปในสมการ} \quad \rho = \frac{m}{V} \text{ จะได้} \quad \rho = \frac{pM}{RT}$$

แทนค่า  $\rho$  ลงใน 12-3 แบ่งตัวแปรทั้ง 2 ข้าง ให้  $p$  มาอยู่ข้างซ้าย และอินทิเกรต จากความดัน  $p_1$  ณ ระดับความสูง  $y_1$  ไปที่ ความดัน  $p_2$  ณ ระดับความสูง  $y_2$

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dy} &= -\frac{pMg}{RT} \\ \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{p} dp &= -\frac{Mg}{RT} \int_{y_1}^{y_2} dy \\ \ln \frac{p_2}{p_1} &= -\frac{Mg}{RT} (y_2 - y_1) \end{aligned}$$

ให้ความดันที่ผิวโลก  $y = 0$  เป็น  $p_0$  ดังนั้นความดัน  $p$  ณ ระดับความสูงใด ๆ จะได้

$$p = p_0 e^{-Mgy/RT} \quad \dots\dots\dots(13-28)$$

ยอดเขาเอเฟออร์เลตสูง  $y = 8,882 \text{ m}$

$$\begin{aligned} \frac{Mgy}{RT} &= \frac{(28.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1})(9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})(8882 \text{ m})}{(8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})(273 \text{ K})} \\ &= 1.10 \end{aligned}$$

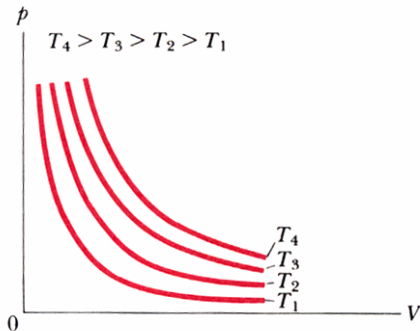
แทนลงในสมการ (13-28) จะได้

$$\begin{aligned} p &= (1.01 \times 10^5 \text{ Pa}) e^{-1.10} = 0.336 \times 10^5 \text{ Pa} \\ &= 0.333 \text{ atm} \end{aligned}$$

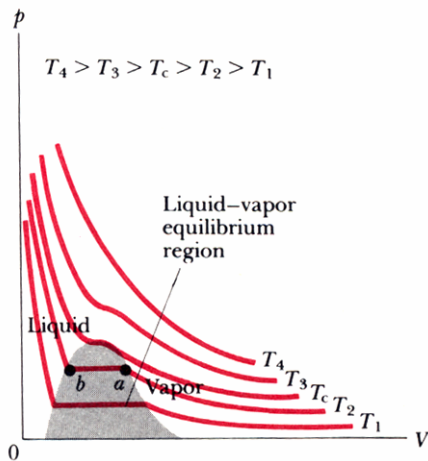
จะเห็นว่าที่ระดับความสูงมาก ๆ ความดันจะลดลงจากความดันบรรยากาศ เพราะสาเหตุนี้ นั่นเอง เมื่อเครื่องบินขึ้นไปถึงระดับความสูง 8,000 ถึง 10,000 m จะต้องควบคุมความดันภายในห้องผู้โดยสาร ไม่เช่นนั้นผู้โดยสารจะรู้สึกอึดอัด หายใจไม่ออก

### 13-8 แผนภาพ p-V

สมการสถานะเกี่ยวข้องกับตัวแปรในระบบ 3 ตัว คือ  $p$ ,  $V$  และ  $T$  ถ้าให้  $T$  คงที่  $p$  จะเป็นสัดส่วนกลับกับ  $V$  ดังสมการ (13-21) กราฟระหว่าง  $p$  กับ  $V$  จะเป็นดังรูป 13-7 เรียกว่า แผนภาพ p-V



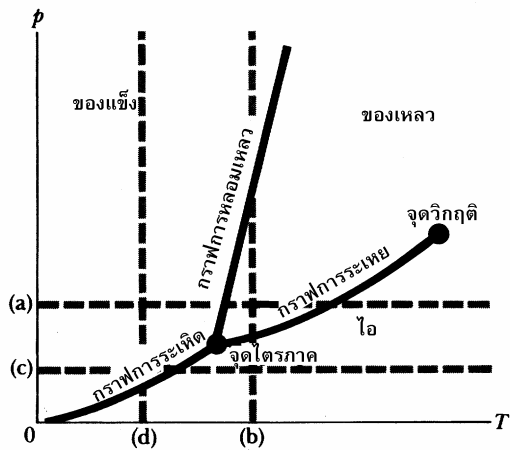
รูป 13-7 แผนภาพ p-V ของแก๊สอุดมคติ ระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่ออุณหภูมิคงที่เส้นกราฟแต่ละเส้นคือความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง



รูป 13-8 แผนภาพ p-V ของแก๊สที่ลดความเป็นอุดมคติลงเส้นกราฟแต่ละเส้นคือความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ส่วนบริเวณแรเงาสสามารถดำรงอยู่ได้ทั้ง 2 สถานะ คือของเหลวและไอ  $T_c$  เป็นอุณหภูมิวิกฤติเส้นกราฟที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า  $T_c$  จะผ่านบริเวณแรเงาแสดงว่ามีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ

รูป 13-8 คือแผนภาพ p-V ของแก๊สซึ่งพฤติกรรมของแก๊สลดความเป็นอุดมคติลง เมื่ออุณหภูมิลดลง สังเกตกราฟที่อุณหภูมิสูงเช่น  $T_4$  ยังมีพฤติกรรมเหมือนกับแก๊สอุดมคติ แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_c$  จะมีอยู่ช่วงหนึ่ง ขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะ  $p$  จะคงที่ ช่วงนั้นจะมีแต่การเปลี่ยนแปลงปริมาตร พอพ้นช่วงแรเงาไปแล้ว จะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว ความดันเพิ่มขึ้นเร็วกว่าปริมาตรที่ลดลง

ขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะจากไอเป็นของเหลว ความร้อนจะถูกคายออกเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ พิจารณาเส้นกราฟ  $T_2$  ด้วยการอัดแก๊สและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่อยู่ที่  $T_2$  จนกระทั่งถึงจุด  $a$  แก๊สจะเริ่มกลั่นตัวเป็นของเหลว ช่วงนี้เป็นช่วงเปลี่ยนสถานะ ปริมาตรยังคงลดลงเรื่อย ๆ แต่ความดันคงที่ พอถึงจุด  $b$  จะเปลี่ยนเป็นของเหลวทั้งหมด ถ้ายังคงเพิ่มความดันต่อไป สังเกตว่ากราฟจะชันขึ้น เพราะความดันจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการลดลงของปริมาตร อย่างไรก็ตามกราฟที่สูงกว่า  $T_c$  ไม่มีการเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้นเลย  $T_c$  เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤติ ในบทถัดไปจะกล่าวถึง งานในระบบเทอร์โมไดนามิก ซึ่งก็คือพื้นที่ใต้กราฟ p-V เพราะเมื่อปริมาตรของระบบเปลี่ยนแปลง จะทำให้เกิดงานกระทำกับภายนอก งานนี้ยังเกี่ยวข้องกับพลังงานภายใน และความร้อนที่ไหลเข้าและออกนอกระบบ ซึ่งจะได้อธิบายอย่างละเอียดในบทที่ 14

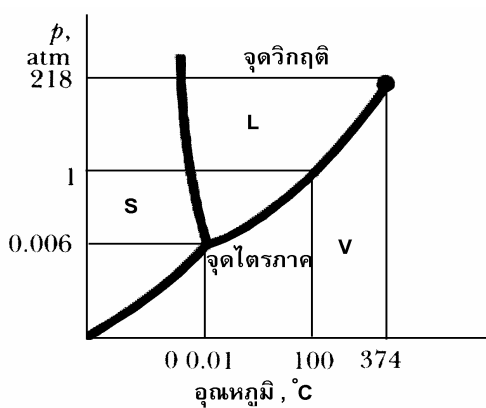


รูป 13-9 แผนภาพ p-T จุดไตรภาค และจุดวิกฤติ

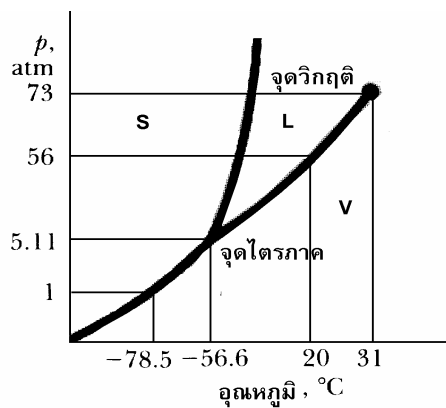
### 13-9 แผนภาพ p-T จุดไตรภาค และจุดวิกฤติ

รูป 13-9 แผนภาพ p-T เรียกอีกชื่อว่า **แผนภาพเฟส** ซึ่งอธิบายได้ว่าสถานะของสสารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน ถ้าเปลี่ยนความดันหรืออุณหภูมิ พอถึงจุดหนึ่งสถานะของสสารจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตามแต่ละจุดในแผนภาพ สสารจะดำรงอยู่ได้เพียงสถานะเดียว นอกจากอยู่บนเส้นทแยงหรือจุดไตรภาค ที่สสารสามารถคงอยู่ได้สองหรือสามสถานะพร้อมกัน

พิจารณาเส้น (a) ถ้าเราเพิ่มอุณหภูมิของสารโดยให้ความดันคงที่ สารจะเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลว และไอ ตามลำดับ แต่ถ้าเราเพิ่มความดันขณะที่อุณหภูมิกคงที่ ให้พิจารณาเส้น (b) สารจะเปลี่ยนจากไอ ไปเป็นของเหลวและของแข็งตามลำดับหรือพิจารณาที่ความดันต่ำเส้น c ให้เพิ่มอุณหภูมิโดยควบคุมความดันให้คงที่ ของแข็งจะเปลี่ยนเป็นไอโดยตรง โดยไม่เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวก่อน กระบวนการนี้เรียกว่าการระเหิด ส่วนเส้น (d) ไอจะเปลี่ยนเป็นของแข็งโดยตรง โดยไม่เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวก่อน จากรูป 13-9 มีจุดหนึ่งที่เป็นทางแยกของเส้น 3 เส้นเรียกว่า **จุดไตรภาค** จุดนี้จะดำรงอยู่ได้ที่อุณหภูมิและความดันหนึ่งเดียวเท่านั้น และที่จุดนี้ ของแข็ง ของเหลว และแก๊สสามารถดำรงอยู่ได้ทั้งสามสถานะ



(a) น้ำ



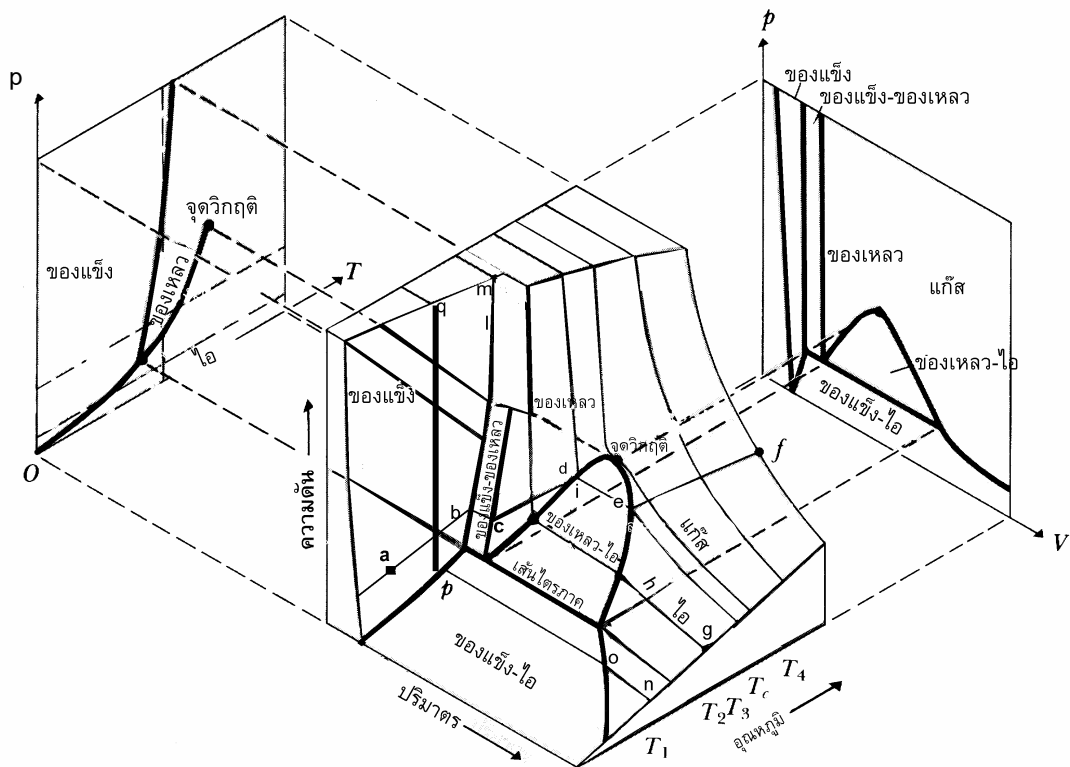
(b) คาร์บอนไดออกไซด์

รูป 13-10 แผนภาพ p-T

แผนภาพ p-T ของน้ำ ดังรูป 13-10 a ที่  $p = 1 \text{ atm}$  จุดเยือกแข็งอยู่ที่  $0^\circ\text{C}$  และจุดเดือดอยู่ที่  $100^\circ\text{C}$  ส่วนที่ความดัน 218 atm มีจุดเดือดอยู่ที่  $374^\circ\text{C}$  เรียก จุดวิกฤต และที่ความกดดัน 0.006 atm อุณหภูมิ  $0.01^\circ\text{C}$  เรียกจุดไตรภาค

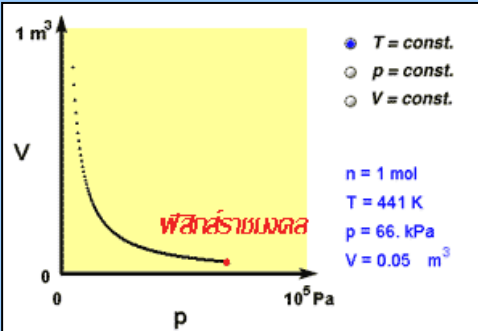
แผนภาพ p-T ของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูป 13-10 b ที่ความดัน 5.11 atm อุณหภูมิ  $-56.6^\circ\text{C}$  เป็น จุดไตรภาค หรือสังเกตจากแผนภาพที่ความดันบรรยากาศ  $\text{CO}_2$  สามารถอยู่ได้ทั้งของแข็งและของเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าอยู่ในสภาพของแข็งเรียกว่าน้ำแข็งแห้ง โดยเฉพาะสถานะของเหลว จะดำรงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อ  $\text{CO}_2$  มีความดันมากกว่า 5.11 atm

สมการสถานะสามารถแสดงด้วยกราฟ 3 มิติ มีอยู่ 3 แกน คือ p, V และ T ดังรูป 13-11 เงามของกราฟ p-V-T บนระนาบ p-T คือกราฟรูป 13-10(b) พิจารณาแนวเส้น abcdef โดยควบคุมให้ p คงที่ แต่เพิ่มอุณหภูมิ แนวเส้น bc อยู่ในช่วงที่กำลังเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ส่วนแนวเส้น de อยู่ในช่วงที่กำลังเปลี่ยนสถานะ จากของเหลวไปเป็นแก๊ส แนวเส้น ghijklm ควบคุมให้ T คงที่ แต่เพิ่มความดัน แนวเส้น hj อยู่ในช่วงที่กำลังเปลี่ยนสถานะจากแก๊สเป็นของเหลว แนวเส้น kl อยู่ในช่วงที่กำลังเปลี่ยนสถานะ จากของเหลวเป็นของแข็ง สุดท้าย แนวเส้น nopq เปลี่ยนเป็นของแข็งโดยตรงจากไอ โดยไม่ผ่านการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวก่อน ให้ลองพิจารณาแนวภาพด้วยตนเองหลาย ๆ แก่ หลาย ๆ มุม จะช่วยทำให้เข้าใจกราฟได้ดียิ่งขึ้น



รูป 13-11 ลักษณะทั่วไปของแผนภาพ p-V-T

## การทดลองเสมือนจริง



**การทดลองแผนภาพ P-V-T ของแก๊ส**

จากกฎของแก๊ส  $p \cdot V = n R T$   
 $p$  = ความดัน ;  $V$  = ปริมาตร ;  $n$  = จำนวน  
 โมล ;  $T$  = อุณหภูมิ และ  $R = 8.31 \text{ J/mol.K}$  = ค่าคงที่ของแก๊ส

ใช้เมาส์คลิกที่ช่อง คุณสามารถเลือกให้ตัวแปร ( $p, V, T$ ) ตัวใดตัวหนึ่งคงที่ เช่น ถ้าคลิก  
 ที่  $T$  คงที่ ค่า  $p$  และ  $V$  จะเปลี่ยนแปลงอยู่บนกราฟโดยที่ค่า  $T$  คงที่เป็นต้น คุณสามารถคลิกได้ทุกที่บนพื้นที่สี่เหลี่ยม โดยที่ค่าต่างๆที่ปรากฏขึ้น ถูกคำนวณไว้อย่าง  
 ถูกต้อง และเมื่อคุณกดเมาส์ค้างและลาก คุณจะได้เส้นกราฟขึ้นอย่างต่อเนื่อง

คุณสามารถเปลี่ยนจำนวนโมลจาก 1 ถึง 10 โดยกดลูกศรขึ้นและลงบนคีย์บอร์ด ให้  
 สังเกตว่าความถูกต้องอยู่ที่ทศนิยม 2 ตำแหน่ง เนื่องจากความละเอียดถูกจำกัดด้วยจุดบน  
 หน้าจอ [กดที่รูปภาพหรือที่นี่เพื่อเข้าสู่การทดลอง](#) 🌞

## บรรยายลงในกระดานฟิสิกส์ราชมงคล



เราทราบกันดีอยู่แล้วว่า สีดำจะดูดและเก็บกักความร้อน  
 ได้ดีกว่าสีขาว อย่างไรก็ตามคนที่อาศัยอยู่ในทะเลทรายชอบใส่เสื้อสี  
 ดำมากกว่าเสื้อสีขาว ตอนกลางวันทะเลทรายมีความร้อนสูงมาก  
 การสวมใส่เสื้อสีดำจะไปเพิ่มความร้อนมากขึ้นไปอีก

เสื้อสีดำจะเปล่งรังสีความร้อนได้มากกว่าเสื้อสีขาว แต่ใน  
 ขณะเดียวกันเสื้อ สีดำจะดูดกลืนและเก็บกักพลังงานความร้อนได้  
 มากกว่าเสื้อสีขาว ดังนั้นจึงมีอุณหภูมิสูงกว่า นักวิจัยได้พิสูจน์ให้  
 เห็นว่าผู้ใส่เสื้อสีดำจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 6° C เมื่อเทียบกับผู้ใส่เสื้อสี  
 ขาว แต่ทำไมคนที่อาศัยอยู่ที่นั่นจึงชอบใส่เสื้อสีดำ นักฟิสิกส์ตอบ  
 คำถามนี้ได้ [อ่านต่อครับ](#) ให้นักศึกษาตอบคำถามนี้ลงใน [กระดาน  
 ฟิสิกส์ราชมงคลใหม่](#) 🌞

## วิดีโอเพื่อการศึกษา



กระสวยอวกาศ ชาแลนเจอร์ ได้พุ่งทะยานขึ้นจากฐานปล่อย เมื่อวันที่ 25 มกราคม 1986 มีลูกเรืออยู่ภายใน 7 คน เป็นเที่ยวบินครั้งที่ 25 เพราะเมื่อขึ้นไปได้เพียง 73 วินาที ยานชาแลนเจอร์ก็ประสบเคราะห์กรรม มันระเบิดออกเป็นเสียงๆ ลูกเรือทั้งหมดเสียชีวิต ชิ้นส่วนทั้งหมดต้องใช้เวลากว่า 5 นาที จึงจะตกลงสู่พื้นน้ำ เหตุการณ์ต่อไปจะเป็นอย่างไรอยู่ในวิดีโอชุดนี้ [คลิกครับ](#) 🌞



ขณะที่กระสวยอวกาศเข้าสู่บรรยากาศด้วยความเร็ว 170,000 ไมล์ต่อชั่วโมง แรงเสียดทานของอากาศทำให้เกิดความร้อนขึ้นสูงกว่า 1600 องศาเซลเซียส นักวิทยาศาสตร์ต้องหาวิธีป้องกันความร้อนไม่ให้ผ่านเข้าไปภายในของตัวยาน ยังไม่ประสบความสำเร็จ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1960 นักวิทยาศาสตร์หัวใสชาวรัสเซียใช้วิธีการระเหยป้องกันผิวชั้นนอกของจรวดไว้ได้ แต่วามันใช้ได้เพียงครั้งเดียว จึงใช้ไม่ได้กับกระสวยอวกาศ วิศวกรของนาซาจึงต้องออกแบบเองโดยใช้ซิลิกาทำเป็นแผ่นกระเบื้องจำนวนกว่า 34,000 แผ่นติดรอบกระสวย ในวิดีโอชุดนี้ คุณจะได้เห็นการระเบิดของกระสวยอวกาศโคลัมเบีย ว่าสาเหตุมาจากการหลุดของกระเบื้อง แต่เหตุการณ์ในตอนนั้นเป็นอย่างไร ดูได้จากวิดีโอชุดนี้ [คลิกครับ](#) 🌞

## ทดสอบก่อนและหลังเรียน

(วิธีทำ ให้ ใส่ชื่อ สกุล เลือกวิชาที่สอบ และจำนวนข้อ แต่ต้องไม่เกินจากที่กำหนดไว้ เช่น กำหนดไว้ 10 ข้อ เวลาเลือกจำนวนข้อ ให้เลือก 5 และ 10 ข้อไม่เกินจากนี้ เป็นต้น เมื่อทำเสร็จสามารถดูคะแนนจากรายละเอียดผู้ทำข้อสอบได้ที่

เรื่องปริมาณความร้อนและกลไกการถ่ายโอนความร้อน

คลิกเข้าสู่ [ทดสอบก่อนและหลังเรียน](#) 🌟

## แบบฝึกหัดท้ายบทพร้อมเฉลย

แบบฝึกหัดท้ายบทพร้อมเฉลย เรื่องอุณหภูมิ [คลิกครับ](#) 🌟

แบบฝึกหัดท้ายบทพร้อมเฉลย เรื่องปริมาณความร้อน [คลิกครับ](#) 🌟

แบบฝึกหัดท้ายบทพร้อมเฉลย เรื่องกลไกการถ่ายโอนความร้อน [คลิกครับ](#) 🌟

## แบบฝึกหัดเรื่องปริมาณความร้อนและกลไกการถ่ายโอนความร้อน

- ก) จุดเดือดปกติของออกซิเจนเหลว =  $-182.97^{\circ}\text{C}$  ถามว่าเป็นกี่ K และ  $^{\circ}\text{F}$   
[ตอบ 90.18 K ,  $-297.35^{\circ}\text{F}$ ]  
ข) ณ อุณหภูมิใดที่องศาฟาเรนไฮต์ และเซลเซียสอ่านได้เท่ากัน [ตอบ  $-40$ ]  
ค) ฟาเรนไฮต์และเคลวิน อ่านได้เท่ากันที่อุณหภูมิเท่าไร [ตอบ 574.6]
- ไม้เมตร 2 อัน ซึ่งทำด้วยอะลูมิเนียม และเหล็กที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  และนำมาใช้ที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  จงหาความยาวขณะที่ใช้ไม้เมตรเหล่านั้น และถ้านำมาใช้ที่อุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}$  ให้หาความยาวที่อุณหภูมินี้  
[ตอบ 1.00056 m, 1.00022 m, 0.99974 m, 0.99989 m]
- จงพิสูจน์ว่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามพื้นที่ ( $\beta$ ) สำหรับของแข็งที่มีเนื้อเดียวกัน มีค่าเท่ากับ  $2\alpha$  ( $\alpha$ คือสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้น)
- น้ำมีอุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  ใส่ในภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียม ขนาด  $1\text{ m}^3$  ถามว่าน้ำจะไหลออกมาปริมาณเท่าใด ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่  $60^{\circ}\text{C}$  [ตอบ  $5400\text{ cm}^3$ ]

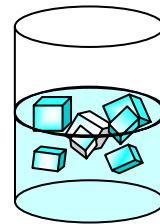
5. ณ อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  ขวดแก้วใบหนึ่งมีปริมาตรถึงขีดๆหนึ่งบนก้นหลอดเท่ากับ  $100\text{ cm}^3$  พอตี ต่อมาบรรจุน้ำของเหลวชนิดหนึ่งถึงขีดนี้ ณ อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  สัมประสิทธิ์ ของการขยายตัวตามยาวของขวดแก้ว =  $120 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$  สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของแก้ว =  $0.8 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$  พื้นที่หน้าตัดของก้นหลอด =  $1\text{ mm}^2$  และสามารถอนุมานได้ว่ามีค่าคงตัวได้ ถ้าวัดของเหลวในก้นหลอดจะสูงขึ้นหรือต่ำลงเท่าไร เมื่ออุณหภูมิสูงถึง  $40^{\circ}\text{C}$  [ตอบ  $2.35\text{ m}$ ]

6. แท่งโลหะยาว  $30\text{ cm}$  ขยายตัว  $0.075\text{ cm}$  เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก  $0$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$  แท่งโลหะอีกชนิดหนึ่งยาวเท่ากันขยายตัว  $0.045\text{ cm}$  เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากันนี้ แท่งที่สามยาว  $30\text{ cm}$  เช่นกัน แต่ใช้โลหะทั้งสองชนิดมาต่อปลายกัน ปรากฏว่าขยายตัว  $0.65\text{ cm}$  ระหว่าง  $0$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$  จงหาความยาวแต่ละส่วนของแท่งโลหะที่สามนี้ [ตอบ  $20\text{ cm}, 10\text{ cm}$ ]

7. สะพานเหล็กยาว  $200\text{ m}$

ก) ถ้าสมมติว่าเป็นสะพานช่วงเดียว ตรึงปลายข้างหนึ่งแน่นกับที่และปล่อยปลายอีกปลายหนึ่งเคลื่อนอย่างอิสระ ถ้าวาระหว่างฤดูหนาว ( $10^{\circ}\text{C}$ ) กับฤดูร้อน ( $40^{\circ}\text{C}$ ) สะพานยาวต่างกันเท่าไร [ตอบ  $6.6\text{ cm}$ ]

ข) ถ้าตรึงปลายทั้งสองให้แน่นอยู่กับที่ตอนฤดูร้อน ถ้าวาระหว่างฤดูร้อน ( $40^{\circ}\text{C}$ ) กับฤดูหนาว ( $10^{\circ}\text{C}$ ) สะพานยาวต่างกันเท่าไรในฤดูหนาวกำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นของเหล็ก =  $1.1 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$  และมอดูลัสของยังของเหล็ก =  $2.0 \times 10^{11}\text{ N/m}$  [ตอบ  $6.6 \times 10^7\text{ N/m}$ ]



8. น้ำแข็ง  $10\text{ g}$  ที่อุณหภูมิ  $-10^{\circ}\text{C}$  ใส่ลงในน้ำ  $50\text{ g}$  ที่อุณหภูมิ  $27^{\circ}\text{C}$  ให้หาอุณหภูมิสุดท้ายเมื่อน้ำแข็งละลายหมด [ตอบ  $8.3^{\circ}\text{C}$ ]

9. ในการทดลองเพื่อหาความร้อนจำเพาะของทองแดง ทองแดงชิ้นหนึ่งหนัก  $0.051\text{ kg}$  ทำให้ร้อนครั้งแรกที่  $100^{\circ}\text{C}$  ในไอน้ำ แล้วจุ่มลงในน้ำที่  $27^{\circ}\text{C}$  มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์หนัก  $0.1\text{ kg}$  มวลของถ้วยอะลูมิเนียมชิ้นในหนัก  $0.05\text{ kg}$  ถ้าอุณหภูมิสุดท้ายเป็น  $30^{\circ}\text{C}$  ความร้อนจำเพาะของทองแดง จะเป็นเท่าใด [ตอบ  $389\text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ ]

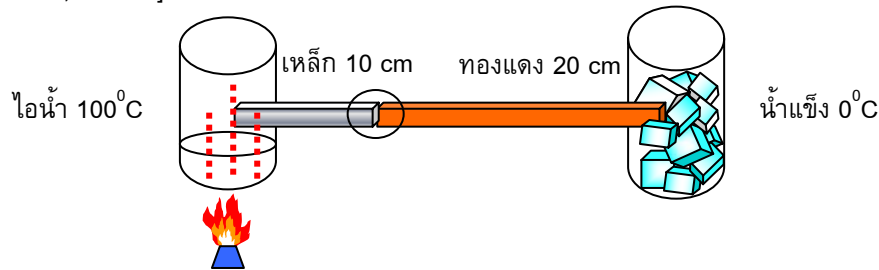
10. น้ำมวล  $1\text{ kg}$  ที่  $20^{\circ}\text{C}$  ถ้าทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากเดิม  $2^{\circ}\text{C}$  จะมีพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นกี่จูล กำหนดให้ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ  $4.2\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  และความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอเท่ากับ  $2,256\text{ kJ/kg}$  [ตอบ  $8.4\text{ kJ}$ ]

11. ถ้าต้องการทำให้น้ำแข็งมวล  $1\text{ kg}$  อุณหภูมิ  $-10^{\circ}\text{C}$  กลายเป็นน้ำที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ทั้งหมด จงหาว่าต้องใช้พลังงานความร้อนเท่าไร ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำแข็ง =  $2.1\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ =  $4.18\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวของน้ำแข็ง =  $333\text{ kJ/kg}$  [ตอบ  $772\text{ kJ}$ ]



น้ำแข็ง  $1\text{ kg}$

12. แท่งเหล็กมีมวล 1 kg เผาให้ร้อนจนมีอุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  หย่อนลงในภาชนะที่มีน้ำ 100 g และน้ำแข็ง 100 g จงหาอุณหภูมิผสมสุดท้าย กำหนดให้ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำและเหล็กมีค่าเท่ากับ 4.18 และ  $0.45 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  ตามลำดับ และค่าความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวของน้ำเท่ากับ  $333 \text{ kJ/kg}$  [ตอบ  $44.09^{\circ}\text{C}$ ]
13. แท่งเหล็กกล้ายาว 10 cm เชื่อมติดกับแท่งทองแดงยาว 20 cm ทั้ง 2 แท่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ยาวด้านละ 2 cm ปลายของแท่งเหล็กกล้าจุ่มกับไอน้ำที่  $100^{\circ}\text{C}$  และปลายของแท่งทองแดงจุ่มกับน้ำแข็งที่  $0^{\circ}\text{C}$  จงหาอุณหภูมิตรงรอยต่อของแท่งโลหะทั้งสอง และอัตราการไหลของความร้อน  $H$  [ตอบ  $20.7^{\circ}\text{C}$ ,  $15.9 \text{ W}$ ]



14. ท่อไอน้ำอยู่ในแนวตั้ง มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 7.5 cm และสูง 4 m อุณหภูมิด้านนอกเท่ากับ  $95^{\circ}\text{C}$  ณ ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิอากาศรอบๆ เท่ากับ  $20^{\circ}\text{C}$  จงคำนวณหาความร้อนที่ถูกพาไปใน 1 ชั่วโมง [ตอบ  $1.89 \times 10^6 \text{ J}$ ]
15. ในคืนเดือนมืดที่ไม่มีเมฆ ผิวของโลกวัดอุณหภูมิได้ 300 K แผลงสีไปสู่สวรรค์อันแจ่มจ้าที่มีอุณหภูมิ 3 K จงคำนวณหาอัตราการแผ่รังสีต่อพื้นที่ผิวของโลก [ตอบ  $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
16. อุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนด์อยู่ที่ 2450 K ถ้าสภาพรังสีของไส้หลอดประมาณ 0.3 จงหาพื้นที่ผิวของไส้หลอด ขนาด 25 W [ตอบ  $0.408 \text{ cm}^2$ ]
17. ถังแก๊สใบหนึ่งมีปริมาตร 10 ลิตร ถ้ายบรรจุแก๊สไฮโดรเจน (มวลโมเลกุลเท่ากับ 2) ซึ่งมีอุณหภูมิ  $27^{\circ}\text{C}$  ลงไปในถังจนมีความดัน  $24.93 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  แก๊สไฮโดรเจนในถังจะมีความหนาแน่นกี่  $\text{kg/m}^3$  [ตอบ  $2 \text{ kg/m}^3$ ]
18. ถ้าอุณหภูมิของอากาศในห้องที่มีขนาด  $40 \text{ m}^3$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $27^{\circ}\text{C}$  เป็น  $63^{\circ}\text{C}$  จงคำนวณหาอัตราส่วนมวลของอากาศที่ขยายตัวหนีออกจากห้อง เทียบกับมวลตั้งต้นของอากาศ [ตอบ 0.11]
19. ถ้าอุณหภูมิภายในห้องเพิ่มขึ้นจาก 27 เป็น  $37^{\circ}\text{C}$  และความดันในห้องไม่เปลี่ยนแปลงจะมีอากาศไหลออกจากห้องกี่ mol หากเดิมมีอากาศอยู่ในห้องจำนวน 2000 mol [ตอบ 65 mol]
20. ค่าจำกัดของอัตราส่วนของความดันของแก๊ส ณ จุดหลอมละลายของตะกั่วกับที่จุดไตรภาคของน้ำ เมื่อกำหนดให้แก๊สมีปริมาตรคงที่ มีค่าเท่ากับ 2.19816 ถ้าวัดจุดหลอมละลายของตะกั่วเท่ากับ K [ตอบ  $600.45 \text{ K}$ ]

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(	ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(	แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(	คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b> 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b> 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b> 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

