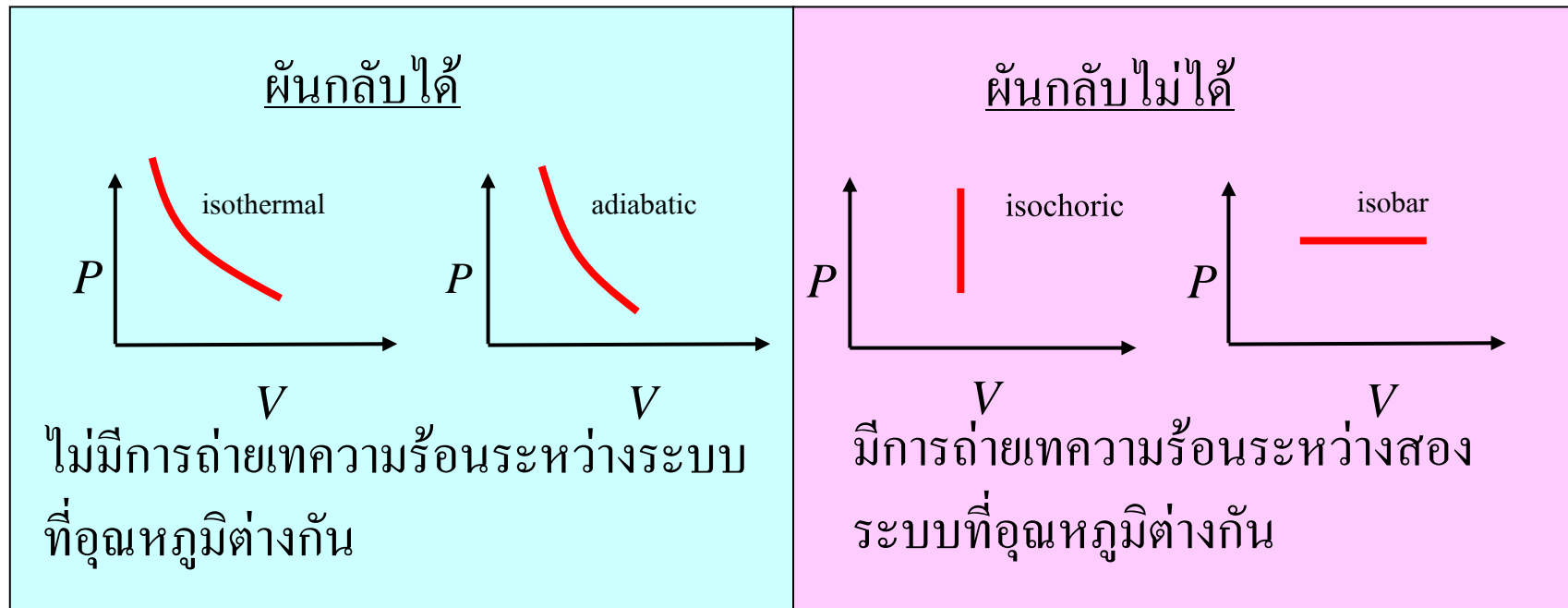


สรุปครั้งที่แล้ว

ในระบบของก๊าซ กระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ (irreversible process) จะเกิดขึ้นเมื่อ

1. กระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบรวดเร็วจนความดันและปริมาตรไม่สามารถนิยามได้อย่างรัดกุม (ไม่เป็น quasi-static)
2. มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างระบบที่มีอุณหภูมิไม่เท่ากัน



การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี

ความดัน P และปริมาตร V เป็นสมบัติของสถานะหนึ่งๆ (state properties) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานะเท่านั้น ไม่ขึ้นกับกระบวนการ (ที่สถานะเดียวกัน ความดันและปริมาตรย่อมเท่ากัน ไม่ว่าจะ เป็นกระบวนการใด) เราจะสมมุติว่าสถานะของก๊าซมี state property อีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า เอนโทรปี และเรานิยามการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี, S , จากการที่ระบบเปลี่ยนจากสถานะ i ไปเป็นสถานะ f คือ

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T}$$

เมื่อ Q คือความร้อนที่ไหลเข้าหรือออกจากระบบ และ T คืออุณหภูมิเคลวิน

การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีในกระบวนการอุณหภูมิกงที่

สำหรับกระบวนการอุณหภูมิกงที่ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T} = \frac{1}{T} \int_i^f dQ = \frac{Q}{T}$$

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิก $\Delta U = Q - W \rightarrow Q = W$
ในกระบวนการอุณหภูมิกงที่

$$W = \int_i^f P dV = \int_i^f \frac{NkT}{V} dV = NkT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$$

จะได้ว่า

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{W}{T} = Nk \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$$

ตัวอย่าง

น้ำแข็งมวล 1 กิโลกรัม มีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ละลายเป็นน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน จะมีเอนโทรปีเปลี่ยนไปเท่าไร (ตัวอย่าง 10.3 ในหนังสือฟิสิกส์ ๑)

วิธีทำ

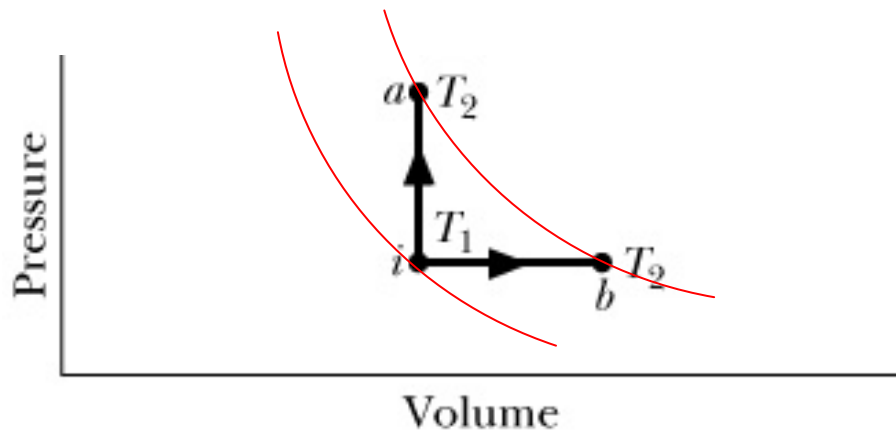
การเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิกงที่ $\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T} = \frac{Q}{T}$

ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ $L = 80$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned}\Delta S &= \frac{Q}{T} = \frac{ML}{T} = \frac{1 \times 80}{273} = 293 \text{ แคลอรีต่อเคลวิน} \\ &= 1.23 \text{ กิโลจูลต่อเคลวิน}\end{aligned}$$

ตอบ

ตัวอย่าง



การอุณหคติเปลี่ยนแปลงจากสถานะ i ซึ่งมีอุณหภูมิตั้งต้น T_1 ไปยังสถานะสุดท้ายที่มีอุณหภูมิ T_2 ถ้า $T_2 > T_1$ จงหาว่า การเปลี่ยนแปลงตามเส้นทาง ia หรือ ib จะมีการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีมากกว่า

วิธีทำ

กระบวนการจาก $i \rightarrow a$ เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่

$$Q = MC_V (T_2 - T_1)$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงน้อยๆจะได้ว่า

$$dQ = MC_V dT$$

เอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta S_{i \rightarrow a} = \int_i^a \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{MC_V}{T} dT = MC_V \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T} dT$$

จะได้

$$\Delta S = MC_V \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$$

กระบวนการจาก $i \rightarrow b$ เป็นกระบวนการความดันคงที่

$$Q = MC_P (T_2 - T_1)$$

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงน้อยๆ

$$dQ = MC_P dT$$

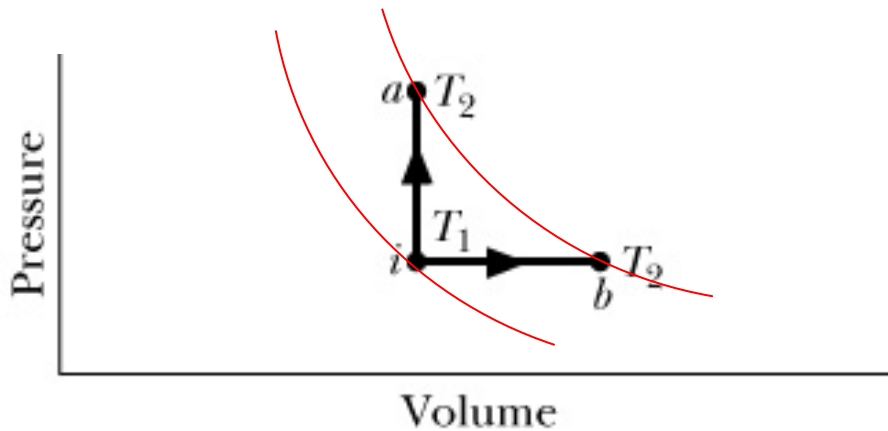
เอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงคือ

$$\Delta S_{i \rightarrow b} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{MC_P}{T} dT = MC_P \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$$

เนื่องจาก $C_P > C_V$ จะได้ว่า

$$\Delta S_{i \rightarrow b} > \Delta S_{i \rightarrow a}$$

ตอบ



การเปลี่ยนแปลงเ็น โทรปีกรณัที่อุณหภูมิเปลี่นน้อยๆ

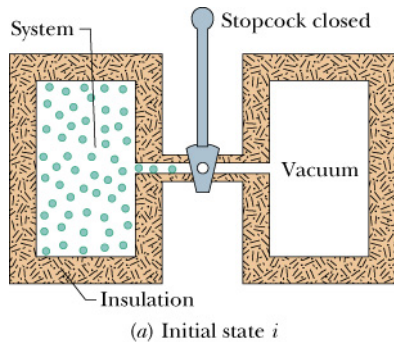
ในกรณีทีกระบวนการที่สนใจมีการเปลี่นเปล่งของอุณหภูมิ ΔT ถ้า ΔT มีค่าน้อยๆเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ T เราอาจประมาณได้ว่า

$$\Delta S = S_f - S_i = \frac{Q}{T_{\text{avg}}}$$

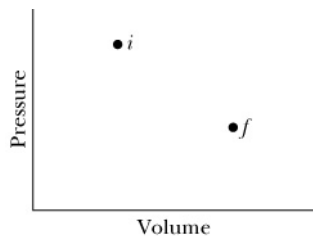
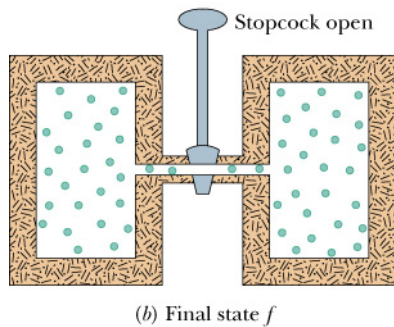
โดยที่ T_{avg} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของระบบในกระบวนการนั้น

$$T_{\text{avg}} = \frac{1}{2}(T_i + T_f)$$

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้



Irreversible process



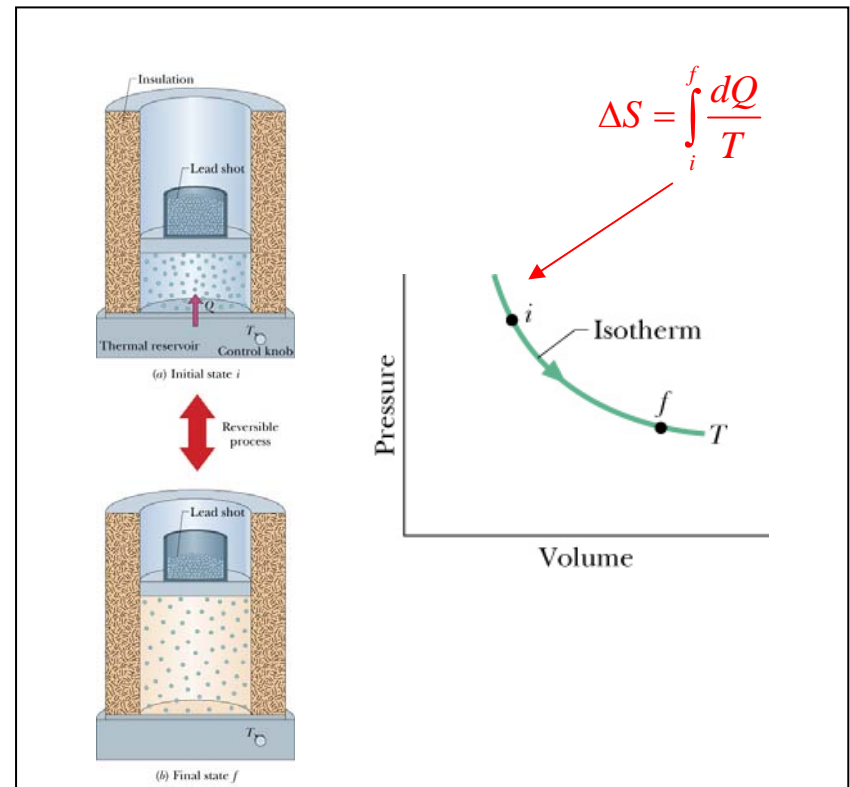
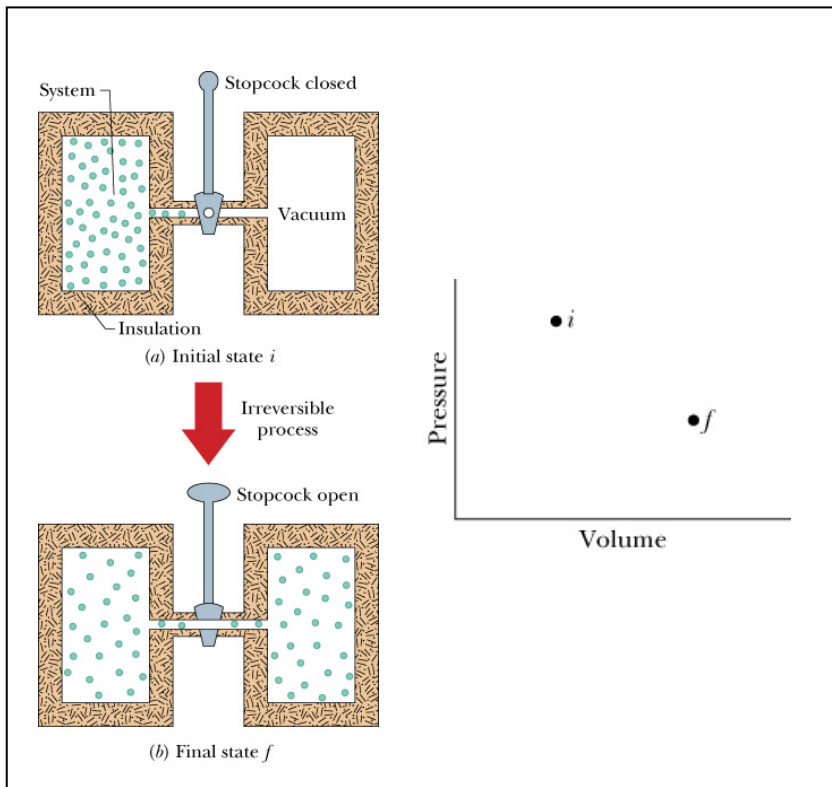
การคำนวณเอนโทรปีของกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ เช่น กระบวนการ free expansion (ดังรูป) โดยอาศัย

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T}$$

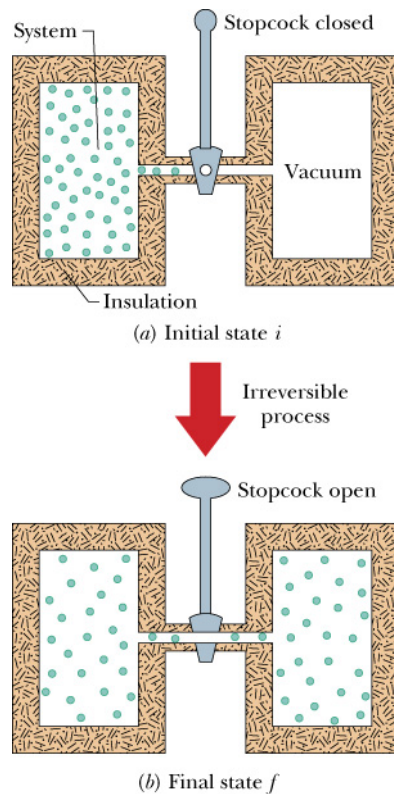
ทำไมไม่ได้เพราะเราไม่ทราบว่า T เปลี่ยนแปลงอย่างไร

เนื่องจากเอนโทรปีเป็น state property มันจึงขึ้นอยู่กับสถานะตั้งต้นและสถานะสุดท้าย การหาการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีของกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ในระบบปิด สามารถทำได้โดยการแทนกระบวนการนั้นด้วยกระบวนการที่ย้อนกลับได้ ที่เชื่อมระหว่างสถานะตั้งต้นและสถานะสุดท้ายคู่เดียวกัน

เนื่องจากในกระบวนการ free expansion ระบบเปลี่ยนแปลงโดยมีอุณหภูมิกงที่
 ($\Delta U = 0$, $\Delta T = 0$ และ $\Delta W = Q = 0$) เราสามารถคำนวณเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงได้
 โดยคำนวณเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการความร้อนคงที่ ที่มีสถานะตั้งต้น i และ
 สถานะสุดท้ายเป็น f เหมือนกัน



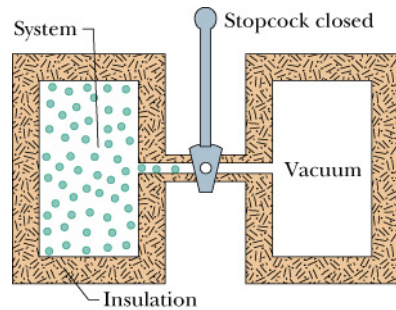
ตัวอย่าง



ก๊าซไนโตรเจน 1 โมลขังอยู่ในด้านถึงเก็บด้านซ้าย เมื่อเปิดวาล์ว ก๊าซจะขยายตัวมายังถึงด้านขวา ทำให้ระบบมีปริมาตรเพิ่มขึ้นสองเท่า จงคำนวณหาว่า เอนโทรปีของระบบเปลี่ยนแปลงเท่าไร

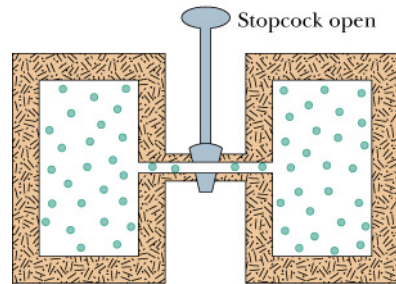
วิธีทำ

แทนกระบวนการ free expansion ซึ่งผันกลับไม่ได้ ด้วยกระบวนการความร้อนคงที่ (เพราะเอ็นโทรปีเป็น state property)

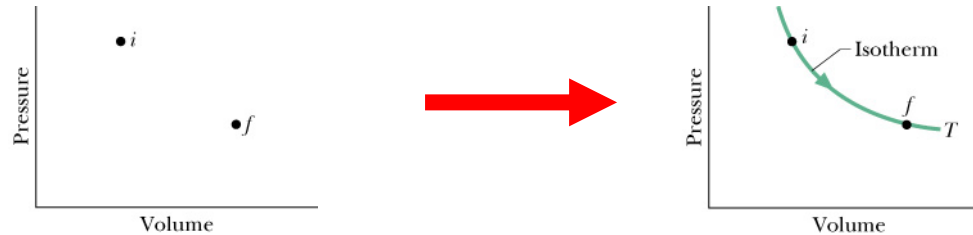


(a) Initial state i

Irreversible process



(b) Final state f



จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิก ในกระบวนการความร้อนคงที่ $\Delta U = 0$

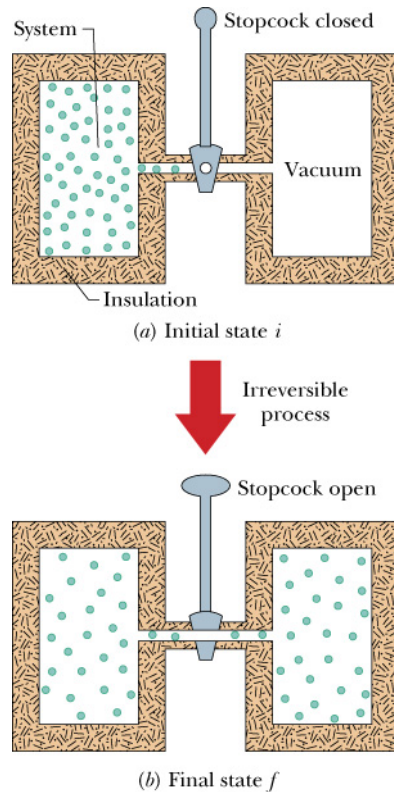
$$Q = W$$

และงานในกระบวนการความร้อนคงที่คำนวณได้จาก

$$W = NkT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$$

นั่นคือเราสามารถคำนวณเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงในการะบวนการ ความร้อนคงที่ (ซึ่งย้อนกลับได้) ได้จาก

$$\begin{aligned}\Delta S_{rev} &= \frac{Q}{T} = \frac{nRT \ln(V_f/V_i)}{T} = nR \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \\ &= (1.00 \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol.K})(\ln 2) \\ &= +5.76 \text{ J/K}\end{aligned}$$



ดังนั้นเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากกระบวนการ free expansion (หรือ กระบวนการอื่นๆที่เริ่มต้นจากสถานะ i ไปจบที่สถานะสุดท้าย j) จะมีค่าเท่ากับ

$$\Delta S_{irrev} = \Delta S_{rev} = +5.76 \text{ J/K}$$

เอนโทรปีเป็นฟังก์ชันสถานะ

ได้กล่าวไปแล้วว่าเอนโทรปีเป็นคุณสมบัติของสถานะ ซึ่งเรียกว่าเป็น ฟังก์ชันสถานะ หรือ function of state พิจารณาจากกฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกของระบบที่ผันกลับได้ สำหรับการเปลี่ยนแปลงน้อย

$$dU = dQ - dW$$

งานสามารถเขียนได้เป็น

$$dW = PdV$$

จากนิยามของความร้อนจำเพาะเราสามารถเขียนพลังงานภายในได้เป็น

$$dU = MC_V dT$$

นั่นคือ

$$dQ = MC_V dT + PdV$$

นิยามการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี

$$\begin{aligned}dS &= \frac{dQ}{T} = \frac{MC_V}{T} dT + \frac{P}{T} dV \\ &= \frac{MC_V}{T} dT + \frac{NkT}{VT} dV \\ &= \frac{MC_V}{T} dT + \frac{Nk}{V} dV\end{aligned}$$

จะได้

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T} = \int_{T_i}^{T_f} \frac{MC_V}{T} dT + \int_{V_i}^{V_f} \frac{Nk}{V} dV$$

นั่นคือ

$$\Delta S = MC_V \ln \frac{T_f}{T_i} + Nk \ln \frac{V_f}{V_i}$$

กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

เมื่อพิจารณาระบบปิดใดๆ ซึ่งอาจจะหมายถึง ก๊าซ และ สิ่งแวดล้อม เช่นแหล่งความร้อน (heat reservoir) เอนโทรปีของระบบปิดจะมีค่า

- 1 **เพิ่มขึ้น** ถ้าเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (irreversible process)
- 2 **คงที่** ถ้ากระบวนการนั้นเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้

ถ้าให้

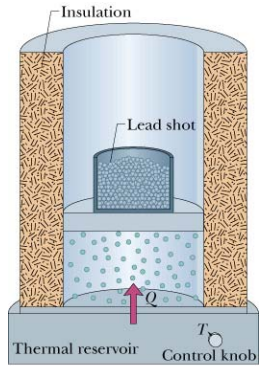
$$\Delta S = \Delta S_{gas} + \Delta S_{res}$$

จะได้ว่า

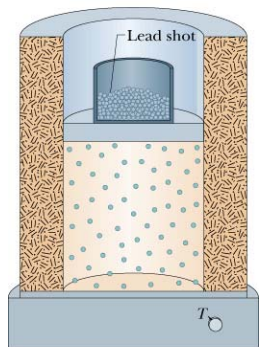
$$\Delta S \geq 0$$

ซึ่งเรียกว่า กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิก

เอนโทรปีคงที่ในกระบวนการที่ผันกลับได้



(a) Initial state *i*



(b) Final state *f*

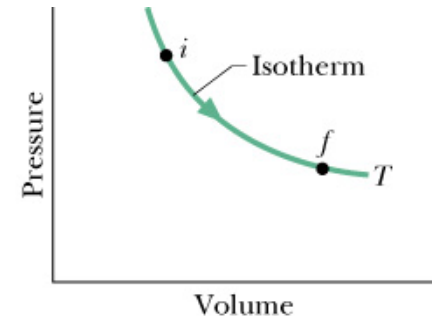
พิจารณาการขยายตัวแบบ Isothermal ของก๊าซ
อุดมคติ

$$\Delta S_{gas} = \frac{Q}{T} = \frac{W_{i \rightarrow f}}{T} > 0$$

สอดคล้องกับกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิก

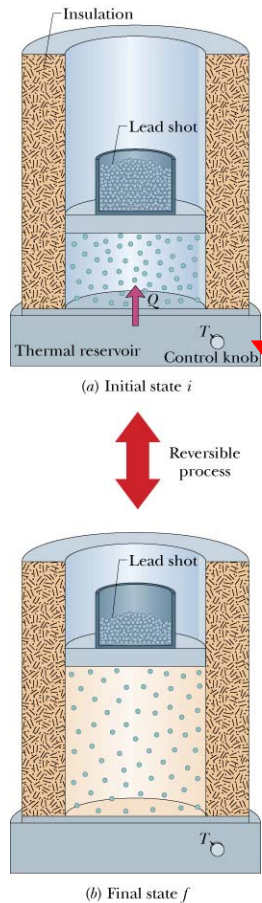
แต่กระบวนการความร้อนคงที่เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ เราจะ
พิจารณากระบวนการย้อนกลับคือ การหดตัวแบบ Isothermal ซึ่งใน
กรณีนี้จะได้ว่า

$$\Delta S_{gas} = \frac{W_{f \rightarrow i}}{T} = -\frac{Q}{T} < 0$$



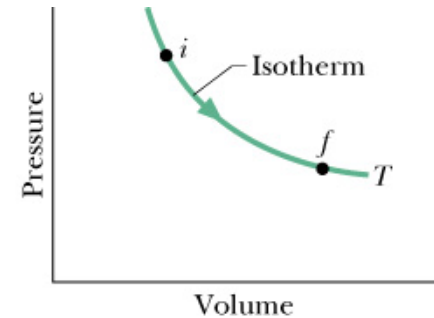
เอนโทรปีของก๊าซมีค่าลดลง !

อย่างไรก็ดี เอนโทรปีของระบบ ซึ่งเท่ากับเอนโทรปีของก๊าซ รวมกับเอนโทรปีของสิ่งแวดล้อมจะมีค่าไม่ลดลง



reservoir

$$\Delta S = \Delta S_{gas} + \Delta S_{res}$$



ความร้อนที่ไหลออกจากระบบ มีค่าเท่ากับ ความร้อนที่ไหลเข้าสิ่งแวดล้อม และเนื่องจาก reservoir มีอุณหภูมิคงที่

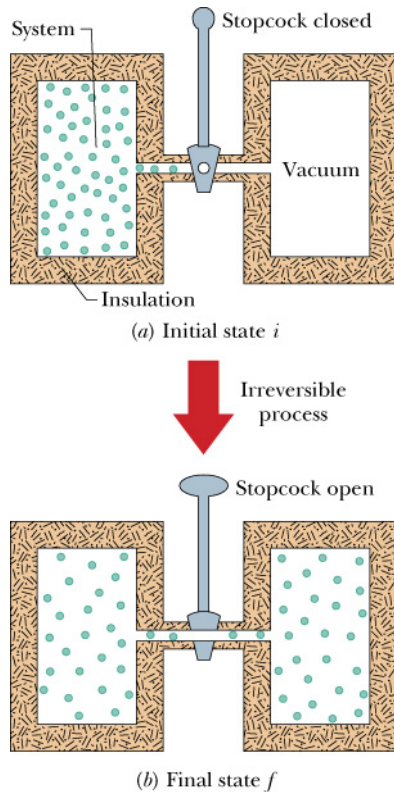
$$\Delta S = \Delta S_{gas} + \Delta S_{res} = -\frac{Q}{T} + \frac{Q}{T} = 0$$

เอนโทรปีรวมของระบบปิดในกระบวนการที่ผันกลับได้จะมีค่าคงที่

(ถ้าคิดเอนโทรปีรวมของระบบในกรณีที่ก๊าซขยายตัวแบบ isothermal ก็จะได้ผลเช่นเดียวกัน)

เอนโทรปีในกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้จะเพิ่มขึ้นเสมอ

ในตัวอย่างที่ผ่านๆมาเราได้คำนวณเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงของกระบวนการขยายตัวแบบอิสระ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ หรือ irreversible process ซึ่งเราพบว่า



$$\Delta S_{gas} > 0$$

เนื่องจากระบบก๊าซห่อหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน จึงไม่มีความร้อนถ่ายเทออกสู่ภายนอก ระบบก๊าซถือเป็นระบบปิด

$$\Delta S = \Delta S_{gas} > 0$$

เอนโทรปีของกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้จะเพิ่มขึ้นเสมอ

(ก๊าซไม่สามารถหดตัวกลับไปอยู่ดังซ้ายได้เพราะทำให้เอนโทรปีลดลง)

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	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 	
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
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 	
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
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

