

## บทที่ 2

### ทฤษฎีในการวิเคราะห์พลังงาน

ในการวิเคราะห์การใช้พลังงาน จำเป็นต้องทราบถึงบทบาทของเอนทัลปี ซึ่งเกี่ยวข้องกับกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ และบอกให้ทราบถึงปริมาณความร้อนที่นำไปใช้งานและปริมาณความร้อนที่สูญเสีย เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency,  $\eta$ ) ของระบบ ในงานวิจัยนี้ยังสนใจถึงประสิทธิผลเชิงความร้อน ( $\epsilon$ ) (Effectiveness, exergetic efficiency, rational efficiency, second law efficiency) ของระบบด้วย

#### 2.1 เอนทัลปี (enthalpy)

เอนทัลปี (enthalpy),  $H$ , มีหน่วยเป็นหน่วยของพลังงาน (เช่น J, cal, Btu เป็นต้น) นิยามของเอนทัลปีคือ

$$H = U + pV \quad (2.1)$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับระบบอาจเขียนได้ดังนี้

$$dH = dU + d(pV) \quad (2.2)$$

ถ้าระบบมีความดันคงที่,

$$dH = dU + pdV \quad (2.3)$$

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวว่า

$$\Delta E = Q - W \quad (2.4)$$

โดยให้ ปริมาณความร้อน ( $Q$ ) ที่เข้าสู่ระบบมีเครื่องหมายเป็น +  
 ปริมาณความร้อน ( $Q$ ) ที่ออกจากระบบมีเครื่องหมายเป็น -  
 งาน ( $W$ ) ที่สิ่งแวดล้อมกระทำต่อระบบมีเครื่องหมายเป็น -  
 งาน ( $W$ ) ที่ระบบกระทำต่อสิ่งแวดล้อมมีเครื่องหมายเป็น +

$\Delta E$  เป็นพลังงานรวมทั้งหมดของระบบที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งประกอบด้วยดังนี้

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p + \Delta U \quad (2.5)$$

แต่ในกรณีของโรงงานเคมี, โรงไฟฟ้า เป็นต้น ทั้งพลังงานจลน์ ( $\Delta E_k$ )  
 และพลังงานศักย์ ( $\Delta E_p$ ) จะถือว่ามิมีอิทธิพลน้อยมากจนตัดทิ้งไปได้ นั่นคือ

$$\Delta E = \Delta U \quad (2.6)$$

จาก (2.4) และ (2.6) จะได้  $\Delta U = Q - W$  (2.7)

หรือในเทอมดิฟเฟอเรนเชียล  $dU = \delta Q - \delta W$  (2.8)

ในกรณีที่มีการป้อนความร้อนเข้าระบบเปิดในลักษณะย้อนกลับได้ที่มีความดันคงที่  
 ความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับความร้อนของกระบวนการดังกล่าวจะเป็นดังนี้

เนื่องจากกระบวนการย้อนกลับได้,  $\delta W = pdV$  (2.9)

เมื่อแทน (2.8) และ (2.9) ลงใน (2.3) จะได้

$$\begin{aligned} dH &= \delta Q - pdV + pdV \\ dH &= \delta Q \end{aligned} \quad (2.10)$$

จาก (2.10) จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีจะมีค่าเท่ากับการ  
 เปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนของระบบเปิด

จากนิยามของค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat) ต่อไปนี้

กรณี V คงที่  $C_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v$  (2.11)

กรณี p คงที่  $C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$  (2.12)

จากสมการ (2.10) จะได้

$$C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.11) , (2.13) จะได้

$$\int_1^2 dU = \int_1^2 C_v dT \quad (2.14)$$

$$\int_1^2 dH = \int_1^2 C_p dT \quad (2.15)$$

ในที่นี้ 1 เป็นสภาวะเริ่มต้น และ 2 เป็นสภาวะสุดท้าย จาก (2.15) จะหาค่า H ในกรณีที่  $C_p$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ได้ดังนี้

$$\Delta H = H_2 - H_1 = C_p (T_2 - T_1) \quad (2.16)$$

ในกรณีที่  $C_p$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ โดยทั่วไปสามารถเขียนได้ในรูปดังนี้

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad (a, b, c \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\text{ดังนั้น} \quad H_2 - H_1 = \int_1^2 (a + bT + cT^2) dT \quad (2.17)$$

$$= a(T_2 - T_1) + (b/2)(T_2^2 - T_1^2) + (c/3)(T_2^3 - T_1^3) \quad (2.17')$$

## 2.2 เอ็กเซอร์ยี (exergy)

เอ็กเซอร์ยี (exergy, Ex) หมายถึงศักยภาพสูงสุดในการทำงานของระบบที่มี สิ่งแวดล้อมเป็นอุณหภูมิ  $T_0$  และความดัน  $P_0$

เอ็กเซอร์ยีของระบบสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ในกรณีระบบเปิด (open system): } Ex = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (2.18)$$

$$\text{ในกรณีระบบปิด (closed system): } Ex = (U - U_0) - T_0(S - S_0) \quad (2.19)$$

## 2.3 สมการดุลของระบบพลังงานในแง่เอนทัลปีและเอนทาลปี

### 2.3.1 สมการดุลเอนทัลปี

สำหรับระบบเปิด:

$$\begin{aligned} & (\text{ผลรวมของปริมาณความร้อนที่ระบบได้รับ}) - (\text{ผลรวมของปริมาณงานกล} \\ & \quad \text{และไฟฟ้าที่ระบบจ่ายออก}) \\ & = (\text{ปริมาณการเพิ่มเอนทัลปีของระบบ}) \end{aligned}$$

นั่นคือ เขียนในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้เป็น

$$\delta q - \delta w = dH \quad (2.20)$$

สำหรับระบบปิด:

$$\begin{aligned} & (\text{ผลรวมของปริมาณความร้อนที่ระบบได้รับ}) - (\text{ผลรวมของปริมาณงานกล} \\ & \quad \text{และไฟฟ้าที่ระบบจ่ายออก}) \\ & = (\text{ปริมาณการเพิ่มพลังงานภายในของระบบ}) \end{aligned}$$

หรือ เขียนในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้เป็น

$$\delta q - \delta w = dU \quad (2.21)$$

ทั้งนี้ โดยถือว่าทั้งระบบเปิดและระบบปิด มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณพลังงานศักย์และพลังงานจลน์น้อยมากจนตัดทิ้งได้

อนึ่ง ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ( $\eta$ ) ประเมินได้จากคำจำกัดความต่อไปนี้

$$\eta = \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ประโยชน์}}{\text{ปริมาณพลังงานที่ป้อนเข้า}} \times 100 (\%)$$

### 2.3.2 สมการดุลเอ็กเซอร์ยี

$$\begin{aligned} (\text{เอ็กเซอร์ยีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ}) &= (\text{เอ็กเซอร์ยีที่ไหลออกจากระบบ}) + (\text{เอ็กเซอร์ยีสูญหนึ่}) \\ &+ (\text{เอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลายเนื่องจากความย้อนกลับไม่ได้}) \end{aligned}$$

อนึ่ง ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ( $\epsilon$ ) คำนวณได้จาก

$$\epsilon = \frac{(\text{เอ็กเซอร์ยีที่ใช้งานจริง}) \times 100 (\%)}{(\text{เอ็กเซอร์ยีที่ป้อนเข้า})}$$

## 2.4 การวิเคราะห์ระบบพลังงานโดยใช้เอ็นทัลปีและใช้เอ็กเซอร์ยี

### 2.4.1 การวิเคราะห์ระบบโดยใช้เอ็นทัลปี

กรณีระบบเปิด: [หมายเหตุ บางครั้งระบบเปิดจะให้ตัวห้อยเป็น cv (control volume)]

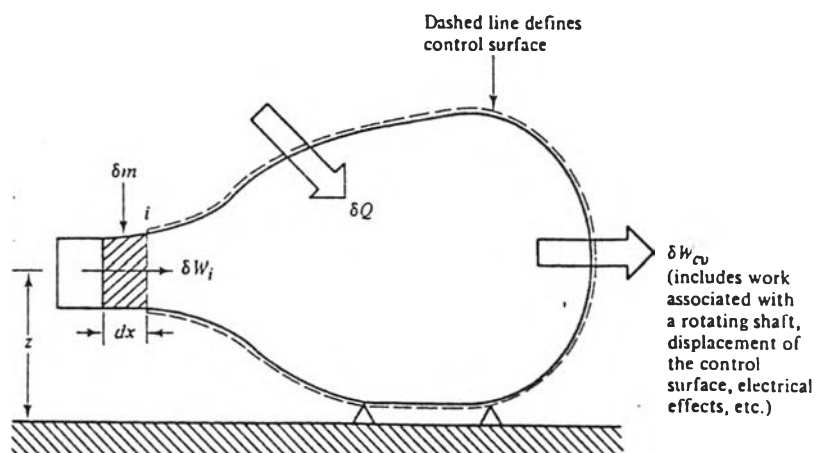


Figure 2-1 Control volume showing heat and work interactions as well as mass crossing the control surface.

### รูปที่ 2.1 ระบบปริมาตรควบคุม

การเปลี่ยนแปลงพลังงานเป็นดังนี้

$$dE_{ev} = \sum_i [h + (v^2/2) + gZ]_i \delta m_i + \delta Q - \delta W_{ev}$$

หรือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบเป็นดังนี้

$$dE_{ev}/dt = \sum_i [h + (v^2/2) + gZ]_i \dot{m}_i + \dot{Q} - \dot{W}_{ev}$$

ถ้าระบบทำงานที่สภาวะคงที่ (steady state) และไม่คิดพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์จะได้

$$0 = \sum_i h_i \dot{m}_i + \dot{Q} - \dot{W}_{ev}$$

$$\text{หรือ } \dot{Q} - \dot{W}_{ev} = \sum_i \dot{m}_i h_i \quad (2.22)$$

#### 2.4.2 การวิเคราะห์ระบบโดยใช้เอนทาลปี

กรณีระบบเปิด:

อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของระบบเป็นดังนี้

$$\frac{dEx}{dt} = \sum_{j=1}^n [1 - (T_0/T_j)] \dot{Q}_j - [\dot{W}_{ev} - p_0 (dV_{ev}/dt)] + \sum_{i=1}^k \dot{m}_i ex_i - \dot{i}$$

ถ้าระบบทำงานที่สภาวะคงที่ (steady state) และ  $dV_{ev}/dt = 0$

$$\text{จะได้ } 0 = \sum_{j=1}^n [1 - (T_0/T_j)] \dot{Q}_j - \dot{W}_{ev} + \sum_{i=1}^k \dot{m}_i ex_i - \dot{i}$$

$$\text{หรือ } \dot{i} = \sum_{j=1}^n [1 - T_0/T_j] \dot{Q}_j - \dot{W}_{ev} + (\sum_{i=1}^{k_2} \dot{m}_i ex_i)_2 - (\sum_{i=1}^{k_1} \dot{m}_i ex_i)_1 \quad (2.23)$$

กรณีระบบปิด:

การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเป็นดังนี้

$$\Delta E_x = \int_1^2 [1 - (T_0/T)] dQ - (W - p_0 \Delta V) - T_0 \Delta S \quad (2.24)$$

โดยที่เทอม  $\int_1^2 [1 - (T_0/T)] dQ$  เป็นเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน

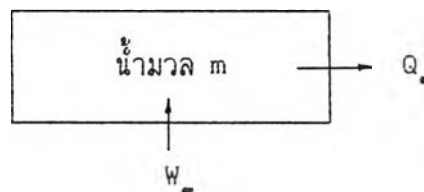
เทอม  $(W - p_0 \Delta V)$  เป็นเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการถ่ายเทงาน

เทอม  $T_0 \Delta S = I$  เป็นเอนทัลปีที่ถูกทำลายเนื่องจากความย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibility)

## 2.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระบบพลังงาน โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

ตัวอย่างที่ 1 การต้มน้ำร้อนด้วยไฟฟ้า

ระบบปิด:



ในกรณีที่ทำน้ำให้ร้อนด้วยไฟฟ้า ปริมาณ  $W$  เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก  $T_1$  เป็น

$T_2$

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์:

$$\begin{aligned} -Q + W &= \Delta U \\ &= mC_p (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

ตามกฎที่หนึ่ง:  $\eta = [mC_p (T_2 - T_1)]/W$

ถ้าภาชนะต้มน้ำร้อนหุ้มฉนวนสมบูรณ์จะได้  $Q = 0$

ดังนั้น จะได้  $W = \Delta U$

แต่  $\Delta U = mC_p (T_2 - T_1)$  ( $C_p \approx C_v$  ในกรณีของเหลว)

$$W_{\bullet} = \Delta U = mC_p (T_2 - T_1)$$

ดังนั้น  $\eta = \frac{mC_p (T_2 - T_1)}{W_{\bullet}} \times 100$

$$\eta = 100\%$$

ตามกฎข้อที่สอง:  $\epsilon = \frac{(\text{เอ็กเซอร์ยีที่ใช้งาน})}{(\text{เอ็กเซอร์ยีที่ป้อนเข้า})} \times 100$

จากสมการ (2.19)  $\Delta Ex = \Delta U - T_0 \Delta S$       กรณีสำหรับระบบปิด

แต่  $\Delta U = mC_p (T_2 - T_1)$

และ  $\Delta S = mC_p \ln (T_2/T_1)$

แทนค่าได้  $\Delta Ex = mC_p [(T_2 - T_1) - T_0 \ln(T_2/T_1)]$

ดังนั้น  $\epsilon = \Delta Ex / W_{\bullet}$

$$\epsilon = (mC_p / W_{\bullet}) [(T_2 - T_1) - T_0 \ln(T_2/T_1)]$$

$$\epsilon = [mC_p (T_2 - T_1) / W_{\bullet}] [1 - (T_0 / (T_2 - T_1)) \ln(T_2/T_1)]$$

$$\epsilon = \eta [1 - (T_0 / (T_2 - T_1)) \ln (T_2/T_1)]$$



เนื่องจากข้อมูลของตัวอย่างนี้เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} T_0 &= 27^\circ\text{C} \approx 300 \text{ K} \\ T_1 &\approx T_0 \approx 300 \text{ K} \\ T_2 &\approx 330 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการ(1) ได้ } \epsilon &= \eta [1 - (300/30) \ln(330/300)] \\ &\approx \eta \times 0.047 \\ \epsilon &\approx 4.7\% \end{aligned}$$

จากตัวอย่างที่ 1 นี้ แสดงให้เห็นว่าถ้าพิจารณาในแง่กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์แล้ว การต้มน้ำให้ร้อนด้วยพลังงานไฟฟ้า  $w_{\text{elec}}$  จะได้ประสิทธิภาพความร้อน = 100% แต่เมื่อพิจารณาในแง่เอนโทรปีแล้วจะได้ค่า  $\epsilon = 4.7\%$  เท่านั้น อาจจะสรุปได้ว่า

(1) การใช้ไฟฟ้าทำความร้อนนั้นเป็นการทำลายคุณภาพของพลังงานอย่างมาก ทั้งนี้เพราะไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีคุณภาพสูง แต่ถูกนำมาใช้ในการอุ่นน้ำ ซึ่งพลังงานในน้ำอุ่นเป็นพลังงานที่มีคุณภาพต่ำ

(2) การทำน้ำอุ่นควรใช้พลังงานที่มีคุณภาพต่ำกว่านี้ เช่นพลังงานแสงอาทิตย์, ความร้อนทิ้ง เป็นต้น จึงจะเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

## 2.6 เอนโทรปีของระบบองค์ประกอบ (Multicomponent system)

### 2.6.1 ศักย์ทางเคมี (Chemical potential)

จากความสัมพันธ์ทั่วไปที่ว่า

$$\begin{aligned} dU &= (TdS - pdV)_{\text{composition fixed}} \\ T &= \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V, \text{composition fixed}} \\ -p &= \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_{S, \text{composition fixed}} \end{aligned} \quad (a)$$

ถ้าระบบมีส่วนประกอบไม่คงที่  $U$  จะเป็นฟังก์ชันต่อไปนี้

$$U = U(S, V, N_1, N_2, \dots, N_n)$$

โดย  $N_k$  ( $k = 1, \dots, n$ ) คือจำนวนโมลขององค์ประกอบ  $k$  ดังนั้นอาจแสดงค่า  $U$  ในรูปของ total differential ได้ดังนี้

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V, N} dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S, N} dV + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial U}{\partial N_k}\right)_{S, V, N_1} dN_k \quad (b)$$

โดยตัวห้อย  $N$  ในสองเทอมแรกบ่งว่าส่วนประกอบของทุกองค์ประกอบมีค่าคงที่ในขณะที่ทำดิฟเฟอเรนเชียล ตัวห้อย  $N_1$  ในเทอมที่สามและเทอมที่มากกว่าถือว่าส่วนประกอบคงที่ยกเว้นองค์ประกอบตัวที่  $k$

$$\text{จาก (b) ให้ } T = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{S, N}, \quad -p = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S, N} \quad (c)$$

และนิยามศักยภาพเชิงเคมี (chemical potential) ของสาร  $k$  เป็นดังนี้

$$\mu_k = \left(\frac{\partial U}{\partial N_k}\right)_{S, V, N_1}, \quad k = 1, \dots, n \quad (d)$$

โดยการใช้สมการ (c), (d) สมการ (b) จะกลายเป็น

$$dU = TdS - pdV + \sum_{k=1}^n \mu_k dN_k \quad (2.25)$$

หรือ

$$U = TS - pV + \sum_{k=1}^n N_k \mu_k \quad (2.26)$$

$$\text{นิยามให้เทอมสุดท้ายเป็น } G = \sum_{k=1}^n N_k \mu_k \quad (2.27)$$

โดยที่  $G = H - TS$  คือค่า Gibbs free energy ของระบบ

### 2.6.2 สมดุลของเฟส (phase equilibrium)

ในหัวข้อย่อยนี้ จะพูดถึงกรณีที่ระบบมีจำนวนสถานะเท่ากับสองหรือมากกว่าสองสถานะที่อยู่สมดุลกันในระบบ พิจารณากระบวนการที่ประกอบด้วยสถานะ A และ B การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี แสดงได้ดังนี้

$$dS = dS_A + dS_B \geq 0 \quad (f)$$

ให้แต่ละสถานะ (phase) ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ชนิด คือ องค์ประกอบ 1 และ 2

จากสมการ (f) และ (2.25)

$$\begin{aligned} dS = & [(1/T_A) - (1/T_B)]dU_A + [(P_A/T_A) - (P_B/T_B)]dV \\ & - [(\mu_{1A}/T_A) - (\mu_{1B}/T_B)]dN_{1A} - [(\mu_{2A}/T_A) \\ & - (\mu_{2B}/T_B)]dN_{2A} \end{aligned} \quad (g)$$

ถ้าระบบมี 2 สถานะที่อยู่ในสมดุลทั้งเชิงความร้อนและเชิงกล และ องค์ประกอบทั้ง 1 และ 2 เป็นสารชนิดเดียวกันในทั้งสองสถานะ จะได้สมการ

$$dS = (1/T)(\mu_{1B} - \mu_{1A}) dN_{1A} \geq 0 \quad (h)$$

โดย  $dN_{1A}$  เป็นปริมาณของสาร 1 ที่ถ่ายเทจากสถานะ B ไปยัง A จะเห็นได้ว่า

เมื่อ  $\mu_{1B} > \mu_{1A}$ ,  $dN_{1A} > 0$  องค์ประกอบ 1 จะผ่านจากสถานะ B ไปยัง A

เมื่อ  $\mu_{1B} < \mu_{1A}$ ,  $dN_{1A} < 0$  องค์ประกอบ 1 จะผ่านจากสถานะ A ไปยัง B

สรุปแล้ว ศักยภาพเชิงเคมีจะเป็นตัวกำหนดแนวโน้มการถ่ายเทมวลของ องค์ประกอบใด ๆ ได้ โดยถ่ายเทจากสถานะที่มีปริมาณของศักยภาพเชิงเคมีสูงไปสู่ที่ต่ำกว่านั่นเอง

### 2.6.3 ก๊าซผสมเชิงอุดมคติ (Ideal Gas Mixtures)

ก๊าซผสมแบบอุดมคติมี  $U$ ,  $H$  และ  $S$  ดังนี้

$$\begin{aligned}
 U &= \sum_{k=1}^n N_k \bar{u}_k (T) \\
 H &= \sum_{k=1}^n N_k \bar{h}_k (T) \\
 S &= \sum_{k=1}^n N_k \bar{s}_k (T, p_k) \quad \text{โดย } p_k = x_k p
 \end{aligned}$$

จาก  $G = H - TS$  เมื่อแทน  $H$  และ  $S$  ในรูปของก๊าซผสม

จะได้

$$\begin{aligned}
 G &= \sum_{k=1}^n N_k \bar{h}_k (T) - T \sum_{k=1}^n N_k \bar{s}_k (T, p_k) \\
 G &= \sum_{k=1}^n N_k \bar{g}_k (T, p_k) \quad (2.28)
 \end{aligned}$$

เมื่อเทียบกับสมการ (2.27) จะได้

$$\mu_k = \bar{g}_k (T, p_k) \quad (2.29)$$

สมการ (2.29) เป็นสมการของศักยภาพเชิงเคมี (chemical potential) ของส่วนประกอบ  $k$  สำหรับก๊าซผสมเชิงอุดมคติ

#### 2.6.4 เอ็กเซอร์ยีของก๊าซผสมเชิงอุดมคติ

เอ็กเซอร์ยีของก๊าซผสมเชิงอุดมคติอาจถือได้ว่าประกอบด้วยเอ็กเซอร์ยีเชิงเทอร์โมเมคานิกส์ (thermo-mechanical exergy)  $Ex^{t,h}$  และเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมี (chemical exergy)  $Ex^{c,h}$  ดังนี้

$$Ex = Ex^{t,h} + Ex^{c,h} \quad (2.30)$$

$$Ex^{t,h} = \sum_{k=1}^n N_k (ex^{t,h})_k \quad (2.31)$$

$$Ex^{c,h} = \sum_{k=1}^n N_k (\mu_{k^o} - \mu_k^o) \quad (2.32)$$

ในกรณีของก๊าซอุดมคติ

$$\mu_{k^o} = \bar{G}_k (T_o, p_o) + \bar{R} T_o \ln (p_k / p_o)$$

$$\mu_k^o = \bar{G}_k (T_o, p_o) + \bar{R} T_o \ln (p_k^o / p_o)$$

โดยที่  $P_k$  คือความดันย่อย (partial pressure) ขององค์ประกอบ  $k$  ในก๊าซผสม

$P_k^\circ$  คือความดันย่อยขององค์ประกอบ  $k$  ในสิ่งแวดล้อม

เมื่อแทนความสัมพันธ์ข้างต้นลงในสมการ (2.32) จะได้

$$Ex^{ch} = \bar{R} T_o \sum_{k=1}^n N_k \ln (P_k / P_k^\circ)$$

ในกรณีที่ก๊าซผสมขององค์ประกอบมีความดัน  $P = P_o$  เราจะได้

$$Ex^{ch} = \bar{R} T_o \sum_{k=1}^n N_k \ln (x_k / x_k^\circ) \quad (2.33)$$

หรือ 
$$\bar{ex}^{ch} = \bar{R} T_o \sum_{k=1}^n x_k \ln (x_k / x_k^\circ) \quad (2.34)$$

ในที่นี้ เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีหมายถึงงานที่น้อยที่สุด (งานในเชิงทฤษฎี) ที่จำเป็นสำหรับการแยกก๊าซผสมใด ๆ ออกเป็นก๊าซผสมที่สมดุลกับสิ่งแวดล้อม (นั่นคือมีส่วนประกอบเหมือนกับสิ่งแวดล้อม)

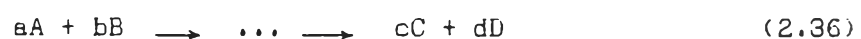
สรุปแล้ว เอ็กเซอร์ยีจำเพาะของก๊าซผสมเชิงอุดมคติที่ความดัน  $P$  และอุณหภูมิ  $T$  และส่วนประกอบเชิงโมล  $x_1, x_2, \dots, x_n$  สามารถคำนวณได้จาก

$$ex = \sum_{k=1}^n x_k \bar{ex}_k + \bar{R} T_o \sum_{k=1}^n x_k \ln (x_k / x_k^\circ) \quad (2.35)$$

ในที่นี้  $\bar{ex}_k$  คือเอ็กเซอร์ยีของก๊าซบริสุทธิ์องค์ประกอบ  $k$

## 2.7 เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมี (chemical exergy)

ในที่นี้ จะพิจารณาองค์ประกอบ  $A$  ในระบบซึ่งผ่านปฏิกิริยาเคมีหลายขั้นตอน จนเข้าสู่สภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อม



A และ B มีชื่อเรียกว่าระบบสารทำปฏิกิริยา ส่วน C และ D มีชื่อเรียกว่าระบบผลิตภัณฑ์สุดท้าย C และ D เป็นระบบที่มีเสถียรภาพสูงสุด ซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงเทอร์โมไดนามิกส์กับสิ่งแวดล้อม

ก่อนอื่น เราอาจแบ่งการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของระบบที่เกิดปฏิกิริยาเคมีออกเป็น 2 ส่วน คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเชิงกายภาพ (physical exergy change) และการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเชิงเคมี (chemical exergy change) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเชิงกายภาพจะเกี่ยวกับการที่ระบบสารทำปฏิกิริยาผ่านการเปลี่ยนแปลงเฉพาะทางกายภาพไปถึงสภาวะมาตรฐานเชิง thermochemical ( $25^{\circ}\text{C}$ , 1 atm) ส่วนการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเชิงเคมี จะเกี่ยวข้องกับงานที่จำเป็นสำหรับแยกอากาศมาตรฐานออกเป็นองค์ประกอบบริสุทธิ์ ( $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  เป็นต้น) และการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเชิงเคมีของสารที่ทำปฏิกิริยา นั่นคือ

$$\Delta ex = \Delta ex^{ph} + \Delta ex^{ch} \quad (2.37)$$

$$\Delta ex^{ph} = [H - H^{std}] - [T_0 (S - S^{std})]_{\text{reactants}} \quad (2.38)$$

$$\Delta ex^{ch} = -\Delta G^{std} = G_{\text{reactants}}^{std} - G_{\text{products}}^{std} \quad (2.39)$$

ในที่นี้ superscript "std" หมายถึงสภาวะมาตรฐานเชิงเทอร์โมเคมีคัล ( $25^{\circ}\text{C}$ , 1 atm)  $G$  คือ Gibbs free energy

ในการกำหนดค่าของเอนทัลปีเชิงเคมี ระบบผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะต้องเป็นผลิตภัณฑ์ (สาร) ที่สมดุลเชิงเทอร์โมไดนามิกส์กับสิ่งแวดล้อม นั่นคือ เป็นสารที่มีเอนทัลปีเชิงเคมีเท่ากับ 0

ตาราง 2.1 ~ ตาราง 2.3 แสดงค่าเอนทัลปีเชิงเคมีของสารชนิดต่าง ๆ ในที่นี้สภาวะมาตรฐานของสิ่งแวดล้อมจะเป็น  $25^{\circ}\text{C}$ , 1 atm และอากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ ค่าเอนทัลปีเชิงเคมีที่คำนวณโดยใช้สภาวะมาตรฐานนี้มีชื่อเรียกว่า เอนทัลปีมาตรฐาน (standard exergy)

ตาราง 2.1 เอ็นทัลปีเชิงเคมีของธาตุต่าง ๆ

สาร	$Ex_{en}$ kJ/g-atom	สาร	$Ex_{en}$ kJ/g-atom	สาร	$Ex_{en}$ kJ/g-atom	สาร	$Ex_{en}$ kJ/g-atom
O	1.07	Cr	547.70	B	610.58	Sb	409.90
N	0.33	Sr	771.53	Cs	393.45	Cd	304.33
C	414.92	V	695.80	Ge	493.37	Tl	169.79
H	117.67	Ni	243.58	Sm	963.34	I	25.62
Si	853.16	Cu	478.97	Gd	933.32	Hg	84.47
Al	788.61	W	822.77	Br	34.37	Tm	894.73
Fe	368.33	Li	372.17	Be	594.54	Bi	296.87
Ca	708.57	Ce	1119.43	Pr	926.62	In	412.62
Na	360.96	Co	288.54	As	386.46	Ag	62.58
K	387.04	Sn	515.97	Sc	907.20	Se	0
Mg	614.39	Zn	337.60	Dy	958.73	Pd	0
Ti	885.18	Y	932.90	Hf	1023.74	He	30.14
Cl	23.48	Nd	1137.56	U	1244.01	Ru	0
Mn	461.47	Nb	878.57	Ar	11.98	Pt	0
P	872.62	La	983.05	Yb	936.13	Au	0
S	607.22	Pb	337.44	Er	961.64	Ne	27.08
F	310.27	Mo	718.91	Ho	967.10	Os	297.25
Rb	389.76	Th	1165.44	Eu	872.92	Te	266.48
Ba	784.55	Ga	496.42	Tb	947.15	Rh	0
Zr	1059.11	Ta	951.15	Lu	918.13		

ตารางที่ 2.2 เอ็กเซอร์จีเจเนอรัลสารอนินทรีย์หลัก

สาร	สถานะ	Ex <sub>สาร</sub> (kJ/mol)	สาร	สถานะ	Ex <sub>สาร</sub> (kJ/mol)	สาร	สถานะ	Ex <sub>สาร</sub> (kJ/mol)	สาร	สถานะ	Ex <sub>สาร</sub> (kJ/mol)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	0	Fe(OH) <sub>3</sub>	s	38.14	LiOH	s	47.46	NaHCO <sub>3</sub>	s	48.85
AlCl <sub>3</sub>	s	229.94	FeCO <sub>3</sub>	s	122.11	LiCO <sub>3</sub>	s	32.36	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	s	153.54
AlPO <sub>4</sub>	s	67.14	FeBr <sub>3</sub>	s	222.07	MgO	s	46.63	NaNO <sub>2</sub>	s	0
BaO	s	263.26	Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	s	218.01	MgCl <sub>2</sub>	s	69.24	NiO	s	33.74
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	s	0	FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	s	103.23	MgCO <sub>3</sub> · CaCO <sub>3</sub>	s	0	NiCl <sub>2</sub>	s	31.35
BaCl <sub>2</sub>	s	28.68	H <sub>2</sub>	g	235.34	MgBr <sub>2</sub>	s	183.64	NiCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	s	0
BaSO <sub>4</sub>	s	36.71	H <sub>2</sub> O	g	8.58	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	s	37.13	Ni(OH) <sub>2</sub>	s	35.37
BaCO <sub>3</sub>	s	65.93	HF	g	154.59	MgCO <sub>3</sub>	s	22.60	NiSO <sub>4</sub>	s	98.54
CaO	s	106.20	HCl	g	45.84	MgSiO <sub>3</sub>	s	10.59	O <sub>2</sub>	g	3.93
Ca(OH) <sub>2</sub>	s	48.85	HBr	g	98.58	MgO · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	41.19	PbO	s	150.36
CaCl <sub>2</sub>	s	7.07	HI	g	145.42	MgSO <sub>4</sub>	s	58.27	PbO <sub>2</sub>	s	123.91
CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	s	0	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	l	160.83	Mg(PO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	s	63.63	PbCl <sub>2</sub>	s	70.12
CaCO <sub>3</sub>	s	0	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	l	113.78	MnO <sub>2</sub>	s	0	PbBr <sub>2</sub>	s	146.09
Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> F <sub>2</sub>	s	0	HgO	s	27.88	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	47.26	PbClOH	s	0
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	s	0	HgBr	s	0	Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	s	188.42	Pb(OH) <sub>2</sub>	s	124.20
CaO · SiO <sub>2</sub>	s	17.16	Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	s	5.07	Mn(OH) <sub>2</sub>	s	85.40	PbSO <sub>4</sub>	s	130.98
CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	83.89	Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	s	157.91	MnCO <sub>3</sub>	s	66.01	PbCO <sub>3</sub>	s	132.45
CaO · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	39.64	KCl	s	2.01	MnSiO <sub>3</sub>	s	79.37	SO <sub>2</sub>	g	310.86
CO	g	279.67	KBr	s	48.77	N <sub>2</sub>	g	0.67	H <sub>2</sub> S	g	809.00
CO <sub>2</sub>	g	28.13	KI	s	97.33	NO	g	88.95	SiO <sub>2</sub>	s	0
CuO	s	351.20	KIO <sub>3</sub>	s	0	NO <sub>2</sub>	g	55.63	SiCl <sub>4</sub>	l	326.09
Cu <sub>2</sub> O	s	013.85	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	s	128.72	NH <sub>3</sub>	g	336.85	SnO <sub>2</sub>	s	0
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> Cl	s	0	KCN	s	691.32	NaOH · H <sub>2</sub> O	s	0	SnO	s	260.92
CuS	s	1032.66	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	s	83.93	NaOH · H <sub>2</sub> O	s	94.19	ZnO	s	21.10
CuSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	s	412.79	LiF	s	9.80	NaCl	s	0	Zn(OH) <sub>2</sub>	s	21.47
CuCl	s	302.52	LiCl	s	11.39	NaBr	s	45.88	ZnCl <sub>2</sub>	s	14.99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	0	LiCl · H <sub>2</sub> O	s	0	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	s	67.06	Zn(NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	s	0
ZnCO <sub>3</sub>	s	26.50	Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	s	98.37	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	s	94.14	ZnSO <sub>4</sub>	s	77.06
FeO	s	126.21									

ตาราง 2.3 เอ็กเซอร์จีเจเนอรัลสารอินทรีย์หลัก

สารประกอบ	สถานะ	Ex <sub>สาร</sub> (kJ/mol)	สารประกอบ	สถานะ	Ex <sub>สาร</sub> (kJ/mol)	สารประกอบ	สถานะ	Ex <sub>สาร</sub> (kJ/mol)	สารประกอบ	สถานะ	Ex <sub>สาร</sub> (kJ/mol)
CH <sub>4</sub>	g	834.78	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	l	3928.2	CH <sub>3</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	l	2281.4	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	g	1031.2
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	g	1502.96	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	l	3320.1	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	g	1423.6	CH <sub>3</sub> CN	l	1283.7
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	g	2162.6	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	l	3960.0	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O	l	2719.9	CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	s	691.03
C <sub>2</sub> H <sub>10</sub>	g	2819.2							C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	l	3224.1
C <sub>2</sub> H <sub>12</sub>	g	3478.3	CH <sub>3</sub> OH	l	721.17	HCHO	g	542.55	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub>	l	3461.7
C <sub>2</sub> H <sub>14</sub>	l	3477.2	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	l	1363.0	CH <sub>3</sub> CHO	g	1168.7			
			C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> OH	l	2016.9	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	l	1797.0	C <sub>2</sub> H <sub>13</sub> O <sub>2</sub>	s	2997.8
C <sub>2</sub> H <sub>14</sub>	g	4136.5	C <sub>2</sub> H <sub>9</sub> OH	l	2669.2				C <sub>2</sub> H <sub>13</sub> O <sub>1.1</sub>	s	6025.2
C <sub>2</sub> H <sub>14</sub>	l	4132.6	C <sub>2</sub> H <sub>11</sub> OH	l	3324.9	CH <sub>3</sub> Cl	g	732.98	C <sub>2</sub> H <sub>13</sub> O <sub>1.1</sub>	s	6034.0
C <sub>2</sub> H <sub>16</sub>	g	4795.3	C <sub>2</sub> H <sub>13</sub> OH	l	3151.5	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	l	643.02			
C <sub>2</sub> H <sub>16</sub>	l	4788.3				CHCl <sub>3</sub>	l	531.46	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N	l	2019.4
			HCOOH	l	308.01	CCl <sub>4</sub>	l	440.21	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N	l	4022.9
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	g	1368.7	CH <sub>3</sub> COOH	l	911.81	CH <sub>3</sub> Br	g	776.34	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> S	l	3300.3
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	g	2013.5	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COOH	l	2222.0	CH <sub>3</sub> I	g	615.73			
CH=CH <sub>2</sub> · CH <sub>2</sub> · CH <sub>3</sub>	g	2529.4	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COOH	s	10073	CF <sub>4</sub>	g	1020.6			
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	g	1274.5	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COOH	s	3362.0	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> F	l	3520.4			
CH <sub>2</sub> C=CH	g	1909.3				C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	l	3294.0			
C <sub>2</sub> H <sub>10</sub>	l	3287.7	HCOOCH <sub>3</sub>	g	1007.9	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br	l	3165.0			
						C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> I	l	3310.3			



## 2.8 เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของเชื้อเพลิง

นิยามของเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) คือ

$$ex_F = (LHV) + T_0 \Delta S_{298}^{std} \quad (2.40)$$

ในที่นี้ LHV คือค่าความร้อนต่ำ (low heating value) ของเชื้อเพลิง  
 $T_0 = 298.15K$  ( $25^\circ C$ ) และ  $S_{298}^{std}$  คือการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีโดยปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐานเชิงเทอร์โมเคมีคัล

ในกรณีของการคำนวณอย่างคร่าว ๆ เราอาจใช้สมการของ Rantze ต่อไปนี้

$$\text{ก๊าซเชื้อเพลิง} : ex_F = 0.95 \text{ (HHV)} \quad (2.41)$$

$$\text{เชื้อเพลิงเหลว} : ex_F = 0.975 \text{ (HHV)} \quad (2.42)$$

$$\text{เชื้อเพลิงแข็ง} : ex_F = (LHV) + rw \quad (2.43)$$

(HHV) คือค่าความร้อนสูง

$r$  คือความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่ 1 atm,  $25^\circ C$  (2,438 kJ/kg)

$w$  คือเศษส่วนเชิงมวลของน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง (-)

สมการ (2.41) จะใช้ได้กับก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมขึ้นไปเท่านั้น

ในกระบวนการสันดาป เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ แล้วเกิดเป็นก๊าซสันดาปพร้อมกับคายความร้อนการสันดาปออกมา กระบวนการดังกล่าวอาจทำงานเชิงกลได้ตาม 3 ขั้นตอนต่อไปนี้

(1) ความร้อนที่เกิดจากการสันดาปถูกเปลี่ยนไปเป็นงานเชิงกล

(2) การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (คิดเทียบกับสภาวะมาตรฐาน) ของระบบโดยปฏิกิริยาเคมีถูกเปลี่ยนไปเป็นงานเชิงกล

(3) งานเชิงกลที่ตั้งออกจากการแพร่ของผลิตภัณฑ์การสันดาปไปในอากาศ  
แวดล้อม

งานชนิดที่ (3) เป็นงานที่คำนวณได้ในแง่ทฤษฎีก็จริง แต่ในภาคปฏิบัติยังไม่มีใคร  
ตั้งงานดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นการคำนวณเอ็กเซอร์ยีของเชื้อเพลิงและของก๊าซ  
สันดาปนั้น ควรหักเอาค่าของงานที่ได้จากการแพร่ออกไป

ในกรณีที่เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าเครื่องสันดาปที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ  
เราอาจถือได้ว่าเชื้อเพลิงนี้มีเพียงเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีเท่านั้น แต่ในกรณีที่เชื้อเพลิงมี  
ความดัน  $P$  และอุณหภูมิ  $T$  เราจะเรียกเอ็กเซอร์ยีส่วนที่แตกต่างไปจากเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมี  
ว่า เอ็กเซอร์ยีเชิงกายภาพ (physical exergy) ของเชื้อเพลิง ในกรณีที่ใช้  $T_0$   
 $= 298.15\text{K}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) และความดันของระบบ  $P = 1\text{ atm}$  เราจะเรียกเอ็กเซอร์ยี  
เชิงเคมีนั้นว่า เอ็กเซอร์ยีมาตรฐานของเชื้อเพลิง (standard exergy of fuel)

ตาราง 2.4 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีมาตรฐานของเชื้อเพลิง (องค์ประกอบเดียว)  
ผลต่างเล็กน้อยระหว่างค่าในตาราง 2.4 กับค่าในตาราง 2.3 คืองานที่ได้จากการแพร่  
ของก๊าซสันดาปซึ่งได้ถูกหักออกไป

ในกรณีที่ทราบส่วนประกอบ  $x_k$  ของก๊าซเชื้อเพลิง เราอาจหาเอ็กเซอร์ยีเชิง  
เคมีของเชื้อเพลิงนี้ได้จากค่าเอ็กเซอร์ยีมาตรฐานในตาราง 2.4 โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$ex^{td}_F = \sum_{k=1}^n x_k \bar{ex}^{td}_{k,ex} + R'T_0 \sum_{k=1}^n x_k \ln x_k \quad (2.44)$$

ในที่นี้  $R'$  คือค่าคงที่ของก๊าซ ( $0.3710\text{ kJ/m}^3_{\text{N}} \cdot \text{K}$ )

ในอดีตค่าเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของเชื้อเพลิง จะรวมงานที่ได้จากการแพร่ของก๊าซ  
สันดาปไปในอากาศ แต่ถ้าใช้ค่าเอ็กเซอร์ยีที่หักงานการแพร่ดังกล่าวออกไปแล้ว (นั่นคือ  
ถ้าใช้  $ex_F$ ) การคำนวณเกี่ยวกับก๊าซสันดาปจะง่ายดายนขึ้นมาก

ตาราง 2.4 เอ็กเซอร์ยีมาตรฐานของเชื้อเพลิงเดี่ยว

ก๊าซ			ของแข็ง - ของเหลว		
สาร	$Ex_{en}$		สาร	$Ex_{en}$	
สูตรโมเลกุล	kcal/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	kJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	สูตรโมเลกุล	kcal/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	kJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
H <sub>2</sub>	2480	10380	C	7990	33450
CO	2740	11470	S	2235	93560
CH <sub>4</sub>	8520	35665	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	10970	45920
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	13120	54920	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	11140	46630
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	14050	58814	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	9830	41110
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	15510	64925	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	10850	45420
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	20730	86780	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	11140	46630
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	22300	93350	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	9940	41610
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	29070	121690	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	11150	46670
H <sub>2</sub> S	5290	22144	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	11460	47970
NH <sub>3</sub>	3500	14650	CH <sub>3</sub> OH	5020	21010
			C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	6880	28800

ค่า  $ex_F$  ที่ได้จากการถ่วงเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ เป็นดังนี้

$$\text{เชื้อเพลิงเหลว} : ex_F = (\text{LHV})(1.0038+0.1365[h/c]+0.0308[o/c]+0.0104[s/c]) \quad (2.45)$$

$$\text{เชื้อเพลิงแข็ง} : ex_F = (\text{LHV})(1.0064+0.1519[h/c]+0.0616[o/c]+0.0429[n/c]) \quad (2.46)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิจัยและพัฒนา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในที่นี้ (LHV) คือค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง 1 kg: h, c, o, s, n, คือเศษส่วนเชิงมวล (mass fraction) ของไฮโดรเจน, คาร์บอน, ออกซิเจน, ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน ตามลำดับที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้น อนึ่ง ค่าของ o ไม่ได้รวมออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำ (ความชื้น) ในเชื้อเพลิง

## 2.9 เอ็กเซอร์ยีของปฏิกิริยา (exergy of reaction)

โดยทั่วไป ผลต่างระหว่างเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีที่สารก่อนทำปฏิกิริยามีอยู่กับเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีที่สารผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่หลังปฏิกิริยา เรียกว่าเอ็กเซอร์ยีของปฏิกิริยา ในการทำตารางดุลของเอ็กเซอร์ยี เราจะใส่ค่าผลต่างนี้ลงในด้านสารทำปฏิกิริยา ถ้าปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดการลดลงของเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมี แต่ใส่ค่าผลต่างนี้ลงในด้านสารผลิตภัณฑ์ ถ้าปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมี

ในกรณีที่เราไม่ใส่เพียงค่าผลต่างนี้ แต่ใส่ค่าเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของทั้งระบบทำปฏิกิริยาและระบบผลิตภัณฑ์ไว้ทั้งสองข้างของตาราง เราอาจพบว่า ค่าเอ็กเซอร์ยีดังกล่าวจะมีขนาดโตกว่าค่าเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของเชื้อเพลิง และการเปลี่ยนแปลงค่าเอ็กเซอร์ยีอื่น ๆ ที่เป็นจุดสนใจในการวิเคราะห์ระบบมาก จนทำให้ได้ข้อสรุปที่ผิดพลาดไปได้

ยกตัวอย่างการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของเตาผลิตโค้ก (coke furnace) เราจะไม่กรอกเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของวัตถุดิบโค้ก, ผลิตภัณฑ์โค้กและโค้กก๊าซแยกต่างหากแต่ละรายการ แต่จะกรอกรายการเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของเชื้อเพลิงที่ใช้ให้ความร้อน, เอ็กเซอร์ยีเชิงกายภาพของโค้กก๊าซที่เกิดขึ้น, เอ็กเซอร์ยีของปฏิกิริยาการกลั่นแห้ง (dry distillation) ของโค้ก, และเอ็กเซอร์ยีเชิงกายภาพอื่น ๆ (เช่นเอ็กเซอร์ยีของความร้อนสัมผัสของโค้กที่ร้อนแดง) เหตุที่ทำเช่นนี้เพราะสมรรถนะของเตาผลิตโค้กนั้น จะตัดสินจากความร้อนที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงว่าถูกส่งไปยังวัตถุดิบโค้ก โดยมีประสิทธิภาพดีเพียงใด

เอ็กเซอร์ยีของปฏิกิริยาจะมีค่าเท่ากับค่าการเปลี่ยนแปลง Gibbs free energy)  $G^{std}$  ที่สภาวะมาตรฐานเชิงเทอร์โมเคมีคัล (1 atm, 25°C) ของปฏิกิริยาซึ่งเปลี่ยนเครื่องหมายเป็นลบ

2.9.1 วิธีคำนวณเอนทัลปีของปฏิกิริยาหลัก

ค่าเอนทัลปีของปฏิกิริยาสามารถหาได้โดยอาศัยตาราง 2.1 ถึง ตาราง 2.3 ซึ่งคิดโดยให้สภาวะอ้างอิงเป็นอากาศอัมมัตด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 25°C, ความดัน 1 atm องค์ประกอบของอากาศนี้คือ

	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	Ar
mole fraction:	0.2034	0.7557	0.0316	0.0003	0.0090

จากองค์ประกอบอากาศมาตรฐานนี้เราคำนวณเอนทัลปีมาตรฐานของสารเริ่มต้นได้ดังนี้

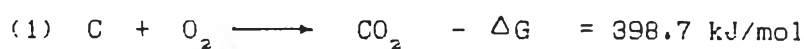
$$\text{O}_2 \text{ ปริสัทธ์ : } R T_0 \ln (1/0.2034) = 0.943 \text{ kcal/mol} = 3.948 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{N}_2 \text{ ปริสัทธ์ : } R T_0 \ln (1/0.7557) = 0.166 \text{ kcal/mol} = 0.694 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{CO}_2 \text{ ปริสัทธ์ : } R T_0 \ln (1/0.0003) = 4.81 \text{ kcal/mol} = 20.108 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{H}_2\text{O ปริสัทธ์ : } R T_0 \ln (1/0.0316) = 2.05 \text{ kcal/mol} = 8.563 \text{ kJ/mol}$$

ต่อไปจะหาเอนทัลปีของปฏิกิริยาพื้นฐาน โดยใช้ค่า  $\Delta G_{298}^{\circ}$  จากหนังสือเทอร์โมไดนามิกส์

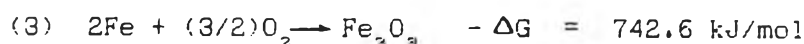


$$\text{C ปริสัทธ์ : } 20.1 + 398.7 - 3.9 = 414.9 \text{ kJ/mol}$$



$$\text{H}_2\text{O ปริสัทธ์ : } 8.6 + 228.7 - 1.97 = 235.3 \text{ kJ/mol}$$

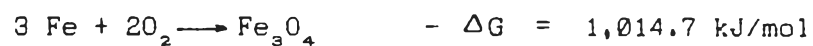
โดยการเริ่มจากค่าต่าง ๆ เหล่านี้ และโดยให้ค่าเอนทัลปีของสารของแข็งที่มีเสถียรภาพสูงสุดเป็น 0 ที่สภาวะมาตรฐาน เราจะคำนวณหาเอนทัลปีมาตรฐานของสารอื่น ๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น เรารู้  $G_{298}^{\circ}$  ของปฏิกิริยาต่อไปนี้



เนื่องจาก  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เป็นสารออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูงสุดในสิ่งแวดล้อม เราจะให้เอ็กเซอร์ยีมาตรฐานของมันเป็น 0 โดยการใช้นี้จะหาเอ็กเซอร์ยีมาตรฐานของเหล็กได้ดังนี้

$$\text{Fe บริสุทธิ์: } (1/2)\{0+742.6-[(3/2)\times 3.95]\} = 368.3 \text{ kJ/mol}$$

นอกจากนี้ เนื่องจาก



ดังนั้น

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 : 3\times 368.3 + 2\times 3.95 - 1,014.7 = 98.2 \text{ kJ/mol}$$

นั่นคือ เราสามารถหาเอ็กเซอร์ยีของปฏิกิริยาหลักภายใน blast furnace ได้ดังนี้



$$98.2 + 4\times 414.9 - (3\times 368.3 + 4\times 279.7) = -465.7 \text{ kJ/mol}$$

สรุปแล้วปฏิกิริยานี้จะดำเนินไปได้ เราต้องป้อนเอ็กเซอร์ยีจากภายนอกให้ในอัตรา 465.7 kJ ต่อ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  1 mol

ตาราง 2.5 แสดงค่า  $G_{298}^{\text{std}}$  ของปฏิกิริยาหลัก ๆ

ตาราง 2.5 เอนทัลปีของปฏิกิริยาหลัก

สมการปฏิกิริยา		เอนทัลปีของปฏิกิริยา		
ระบบสารทำปฏิกิริยา	ระบบผลิตภัณฑ์	[kJ/mol]	[kJ/kg สาร]	
$\text{Fe} + 1/2 \text{O}_2$	$\text{FeO}$	244.5	4379	Fe
$2\text{Fe} + 3/2 \text{O}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	742.6	6647	Fe
$3\text{Fe} + 2\text{O}_2$	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	1014.7	6057	Fe
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{C}$	$3\text{Fe} + 4\text{CO}$	-465.7	-2780	Fe
$\text{Ca} + 1/2 \text{O}_2 + \text{CO}_2$	$\text{CaCO}_3$	730.7	18230	Ca
$\text{S} + \text{O}_2$	$\text{SO}_2$	300.3	9368	S
$\text{S} + 3/2 \text{O}_2$	$\text{SO}_3$	370.5	11560	S
$\text{Si} + \text{O}_2$	$\text{SiO}_2$	875.1	30520	Si
$\text{Pb} + 1/2 \text{O}_2$	$\text{PbO}$	189.0	913	Pb
$\text{PbO} + \text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{PbSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	162.8	787	Pb
$\text{SiO}_2 + \text{FeO}$	$\text{FeSiO}_3$		-188	ผลิตภัณฑ์
$\text{SiO}_2 + 2\text{FeO}$	$\text{Fe}_2\text{SiO}_4$	-33.66	-163	ผลิตภัณฑ์
$\text{SiO}_2 + \text{CaO}$	$\text{CaSiO}_3$	-89.04	-766	ผลิตภัณฑ์
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaO}$	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$		-322	ผลิตภัณฑ์
$\text{FeO} + \text{CaO} + \text{SiO}_2$	$\text{FeO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$		-603	ผลิตภัณฑ์
$57.6 + 12.0 + 30.4$	100.0			
$\text{FeO} + \text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 +$	$\text{FeO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot$			
$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2$		-557	ผลิตภัณฑ์
$39.7 + 15.2 + 9.2 +$				
35.5	100.0			

## 2.10 สรุปสมการสำหรับคำนวณเอ็กเซอร์ยีของระบบต่าง ๆ

เอ็กเซอร์ยีจำเพาะของมวลในระบบเคมี สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ดังนี้

- 1) เอ็กเซอร์ยีเชิงจลน์ (kinetic exergy)
- 2) เอ็กเซอร์ยีเชิงศักย์ (potential exergy)
- 3) เอ็กเซอร์ยีเชิงความร้อน (thermal exergy)
- 4) เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมี (chemical exergy)

เอ็กเซอร์ยี 3 ประเภทแรกอาจเรียกรวมได้ว่าเอ็กเซอร์ยีเชิงเทอร์โมเมคานิคัล (thermomechanical exergy) ในที่นี้ เราจะไม่นับถึงเอ็กเซอร์ยีของพลังงานชนิดอื่น ๆ เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น

ในกระบวนการเคมีส่วนใหญ่ เอ็กเซอร์ยีประเภท 1 และ 2 ข้างต้นจะมีปริมาณน้อยมากจนตัดทิ้งได้ เมื่อเทียบกับของประเภท 3 และ 4 สภาวะแวดล้อมที่ใช้คือ อุณหภูมิ  $T_0$  , ความดัน  $P_0$

### 2.10.1 สมการคำนวณเอ็กเซอร์ยีเชิงความร้อน

#### 1) ความร้อนที่ถ่ายเทเข้า (ออก) ระบบ

ในกรณีที่ความร้อนปริมาณ  $Q$  ถ่ายเทจากแหล่งความร้อน อุณหภูมิสมบูรณ์คงที่  $T$  เข้า (ออก) ระบบ เอ็กเซอร์ยีที่ความร้อน  $Q$  นั้นมีอยู่ จะคำนวณได้จาก

$$Ex = Q [(T - T_0) / T] \quad (2.47)$$

#### 2) สารอุณหภูมิสูง ( $T > T_0$ )

โดยทั่วไป คำนวณเอ็กเซอร์ยีจำเพาะของสารอุณหภูมิสูง  $T$  ได้จาก

$$ex = h - h_0 - T_0 (S - S_0) \quad (2.48)$$



ก. กรณีของก๊าซบริสุทธิ์ ( $T > T_0$ , ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ)

$$ex = \int_{T_0}^T C_p'' [1 - (T_0/T)] dT \quad (2.49)$$

โดยที่  $C_p''$  คือความร้อนจำเพาะของก๊าซนั้น (อาจเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ  $T$ )

ข. กรณีของไอของของเหลวบริสุทธิ์ ( $T > T_g > T_0$ )

$$ex = \int_{T_g}^T C_p'' [1 - (T_0/T)] dT + r_g [1 - (T_0/T_g)] + \int_{T_0}^{T_g} C_p' [1 - (T_0/T)] dT \quad (2.50)$$

ในที่นี้  $T_g$  คือจุดเดือดของของเหลว

$r_g$  คือความร้อนแฝงของการระเหย

และ  $C_p'$  คือความร้อนจำเพาะของของเหลว

ค. กรณีของไอของของแข็งบริสุทธิ์ ( $T > T_g > T_1 > T_0$ )

$$ex = \int_{T_g}^T C_p'' [1 - (T_0/T)] dT + r_g [1 - (T_0/T_g)] + \int_{T_1}^{T_g} C_p' [1 - (T_0/T)] dT + r_1 [1 - (T_0/T_1)] + \int_{T_0}^{T_1} C_p [1 - (T_0/T)] dT \quad (2.51)$$

ในที่นี้  $T_1$  คือจุดหลอมเหลวของของแข็ง

$r_1$  คือความร้อนแฝงของการหลอมเหลว

และ  $C_p$  คือความร้อนจำเพาะของของแข็ง

### 3) สารอุณหภูมิต่ำ ( $T < T_0$ )

ในทำนองเดียวกับกรณีสารอุณหภูมิต่ำ เราสามารถคำนวณเอนทัลปีของสารอุณหภูมิต่ำได้จากสมการ (2.48) หรือจากสมการต่อไปนี้

ก. กรณีของก๊าซบริสุทธิ์ ( $T < T_0$ , ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ)

$$ex = \int_{T_0}^T C_p'' [1 - (T_0/T)] dT \quad (2.52)$$

ข. กรณีของของเหลวบริสุทธิ์ ( $T < T_g < T_0$ )

$$ex = \int_{T_g}^T C_p' [1 - (T_0/T)] dT - r_g [1 - (T_0/T_g)] \\ + \int_{T_0}^{T_g} C_p'' [1 - (T_0/T)] dT \quad (2.53)$$

ค. กรณีของของแข็งบริสุทธิ์ ( $T < T_1 < T_g < T_0$ )

$$ex = \int_{T_1}^T C_p [1 - (T_0/T)] dT - r_1 [1 - (T_0/T_1)] \\ + \int_{T_g}^{T_1} C_p' [1 - (T_0/T)] dT - r_g [1 - (T_0/T_g)] \\ + \int_{T_0}^{T_g} C_p'' [1 - (T_0/T)] dT \quad (2.54)$$

#### 4) ก๊าซความดันสูง P ( $T = T_0$ )

ในกรณีของก๊าซเชิงอุดมคติที่มีความดัน  $P > P_0$  และสามารถมองตัวอย่างย้อนกลับได้จนเหลือความดัน  $P_0$  เอ็กเซอร์ยีจำเพาะของก๊าซนี้คำนวณได้จาก

$$\text{กรณีก๊าซ 1 mol: } ex = R T_0 [\ln(P/P_0) - \{1 - (P_0/P)\}] \quad (2.55)$$

$$\text{กรณีก๊าซ 1 m}^3_N: ex = (R T_0 / V_N) [\ln(P/P_0) - \{1 - (P_0/P)\}] \quad (2.56)$$

$V_N$  คือปริมาตร ( $m^3$ ) ของก๊าซ 1 โมลที่สภาวะมาตรฐาน (1 atm,  $0^\circ C$ )

กรณีปริมาตรของระบบ 1  $m^3_N$ :

$$ex = (NR T_0 / V) [\ln(P/P_0) - \{1 - (P_0/P)\}] = [P \ln (P/P_0)] - [P - P_0] \quad (2.57)$$

N คือจำนวนโมลที่มีอยู่ในระบบ

V คือปริมาตร ( $m^3$ ) ที่สภาวะมาตรฐานของระบบ

ในกรณีหลังสุดนี้  $ex$  ไม่ใช่เอนทัลปีของก๊าซ แต่เป็น  
เอนทัลปีต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยของระบบ

อนึ่ง สมการ (2.54) (2.57) ยังสามารถใช้ได้ในกรณีของก๊าซ  
ความดันต่ำ ( $P < P_0$ ) นั่นคือระบบสูญญากาศ

### 5) ระบบสององค์ประกอบ

#### ก. ก๊าซผสมเชิงอุดมคติ

เอนทัลปีของก๊าซผสม 1 mol ที่ได้จากการผสมก๊าซบริสุทธิ์  
 $x_1, x_2, \dots, x_n$  โมล ( $\sum_{i=1}^n x_i = 1$ ) ที่มีอุณหภูมิและความดันเท่ากันหมด ( $T, P$ )  
สามารถคำนวณได้จาก

$$ex = \sum_{i=1}^n x_i ex_i + R T_0 \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i \quad (2.58)$$

$ex_i$  คือค่าเอนทัลปีจำเพาะของก๊าซบริสุทธิ์  $i$

ในกรณีที่อากาศแวดล้อมมีส่วนประกอบเชิงโมลเป็น  $x_{i0}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) เอนทัลปีจำเพาะของก๊าซผสม 1 mol ที่มีส่วนประกอบเชิงโมลเป็น  
 $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$ex = R T_0 \sum_{i=1}^n x_i \ln (x_i/x_{i0}) \quad (2.59)$$

#### ข. ก๊าซชื้น

เอนทัลปีจำเพาะของก๊าซชื้นอุณหภูมิ  $T$  ที่มีอัตราส่วนเชิงโมล  
ของไอน้ำเท่ากับ  $x$  สามารถคำนวณได้จาก ( $ex$  ต่อก๊าซแห้ง 1 mol)

$$ex = 1/(1-x) [C_p' \{ (T-T_0) - T_0 \ln (T/T_0) \} + R T_0 \{ x \ln (x/x_{0u}) + (1-x) \ln (1-x/1-x_{0u}) \}] \quad (2.60)$$

ในที่นี้  $C_p' = C_p (1-x) + C_{pw} x \quad (2.61)$

$x_{i, \infty}$  เป็นอัตราส่วนเชิงโมลของก๊าซที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ  $C_{p, \infty}$  และ  $C_{p, \infty}$  เป็นความร้อนจำเพาะของก๊าซแห้งและของไอน้ำ ตามลำดับ

ค. ก๊าซผสมทั่วไป

เอนทัลปีของก๊าซผสม 1 mol คำนวณได้จาก

$$ex = \sum_{i=1}^n x_i ex_i + R T_o \sum_{i=1}^n x_i \ln (\varphi_i x_i) \quad (2.62)$$

ในที่นี้  $\varphi_i$  คือ fugacity coefficient ขององค์ประกอบ i

ง. สารละลายเชิงอุดมคติ

เอนทัลปีของสารละลายเชิงอุดมคติ 1 mol ที่ได้จากการผสมของเหลวบริสุทธิ์ในอัตราส่วนเชิงโมล  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) คำนวณได้จาก

$$ex = \sum_{i=1}^n x_i ex_i + R T_o \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i \quad (2.63)$$

$ex_i$  คือเอนทัลปีของของเหลวบริสุทธิ์ i

จ. สารละลายทั่วไป

$$ex = \sum_{i=1}^n x_i ex_i + R T_o \sum_{i=1}^n x_i \ln a_i \quad (2.64)$$

$a_i$  คือ activity ขององค์ประกอบ i

2.10.2 สมการคำนวณเอนทัลปีเชิงเคมี

เอนทัลปีของสาร (ต่อโมลของสาร A) ของระบบที่เกิดปฏิกิริยาต่อไปนี้



สามารถคำนวณได้จาก

$$ex = ex^{F^H} + ex^{C^H} \quad (2.65)$$

$$ex^{F^H} = [(H-H^{std}) - T_o(S-S^{std})]_{\text{reactants}} \quad (2.66)$$

$$ex^{C^H} = -G^{std} = G^{std}_{\text{reactants}} - G^{std}_{\text{products}} \quad (2.67)$$

ในที่นี้  $ex^{PH}$  คือ physical exergy  
 $ex^{CH}$  คือ chemical exergy  
 superscript std หมายถึงสภาวะมาตรฐาน (1 atm, 25°C)

ก. เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของเชื้อเพลิง

สมการคำนวณอย่างคร่าว ๆ

$$\text{ก๊าซเชื้อเพลิง : } ex_F = 0.95 \text{ (HHV)} \quad (2.68)$$

$$\text{เชื้อเพลิงเหลว : } ex_F = 0.975 \text{ (HHV)} \quad (2.69)$$

$$\text{เชื้อเพลิงแข็ง : } ex_F = (\text{LHV}) + rw \quad (2.70)$$

ในที่นี้ HHV และ LHV คือค่าความร้อนสูงและต่ำของเชื้อเพลิง  
 $r$  คือค่าความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ  
 $w$  คือน้ำ (ความชื้น) ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง 1 หน่วย

กรณีที่ทราบองค์ประกอบ  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) ของก๊าซ  
 เชื้อเพลิง ( $1 \text{ m}^3_N$ )

$$ex^{std}_{CH} = \sum x_i ex^{std}_{CH} + R'T_0 \sum x_i \ln x_i \quad (2.71)$$

$$R' = 0.3710 \text{ kJ/m}^3_N \cdot \text{K}$$

กรณีที่ทราบธาตุประกอบของเชื้อเพลิง ( $1 \text{ kg}$ )

$$\begin{aligned} \text{เชื้อเพลิงเหลว : } ex_F &= [\text{LHV}] [1.0038 + 0.1365(\text{h/c}) + 0.0308(\text{o/c}) \\ &\quad + 0.0104 (\text{s/c})] \quad (2.72) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เชื้อเพลิงแข็ง : } ex_F &= [\text{LHV}] [1.0064 + 0.1519(\text{h/c}) + 0.0616(\text{o/c}) \\ &\quad + 0.0429 (\text{n/c})] \quad (2.73) \end{aligned}$$

ในที่นี้ LHV คือค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง 1 kg

h, c, o, s, n คืออัตราส่วนเชิงมวล (mass fraction) ของไฮโดรเจน, คาร์บอน, ออกซิเจน, ซัลเฟอร์และไนโตรเจนในเชื้อเพลิงตามลำดับ อนึ่ง o ไม่รวมออกซิเจนในน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง

ข. เอนทัลปีของปฏิกิริยา

ดูรายละเอียดในหัวข้อ 2.9