

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐาน



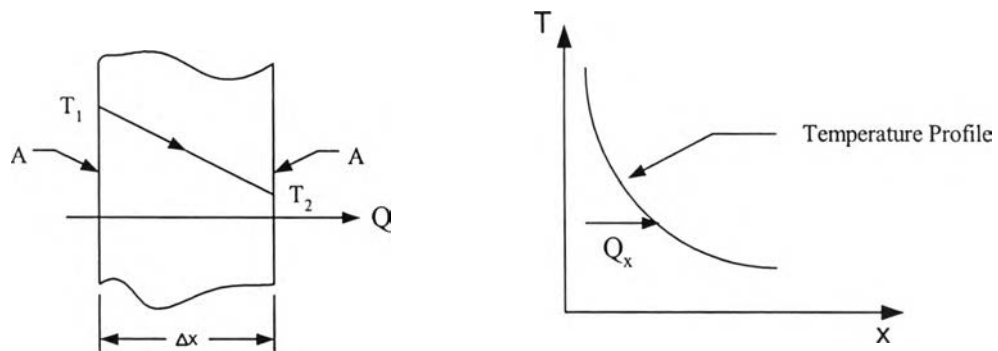
3.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน เป็นการถ่ายเทของพลังงานจากระบบหนึ่งไปสู่ระบบหนึ่งเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิ (Temperature difference) ของสองระบบนั้น โดยที่การถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้สามทางคือ การนำความร้อน (Conduction heat transfer) การพาความร้อน (Convection heat transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer) โดยทั้งสามทางที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้นต้องเกิดจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันและมีทิศทางจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงไปยังตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

3.1.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทพลังงานของอนุภาคของสารที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคใกล้เคียงที่มีพลังงานต่ำกว่า การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยที่การนำความร้อนในของเหลวและก๊าซเกิดขึ้นเนื่องจากการชนกัน (Collision) และการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุล ในขณะที่โมเลกุลเหล่านั้นมีการเคลื่อนที่ ส่วนการนำความร้อนในของแข็งเป็นผลเนื่องมาจากการสั่นของโมเลกุล (Vibrations of molecules) ในแลตทิซ (Lattice) และการขนถ่ายพลังงานโดยอิเล็กตรอนอิสระ (Free electrons)

อัตราการนำความร้อนผ่านตัวกลางขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิต (Geometry) ของตัวกลาง, ความหนา (Thickness), วัสดุที่เป็นตัวกลางรวมถึงผลต่างของอุณหภูมิตลอดตัวกลางนั้น รูปที่ 3.1 ก แสดงการนำความร้อนในสภาวะคงตัว (Steady State) ผ่านผนังซึ่งมีความหนา Δx และพื้นที่ผิว A และผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาของผนังเป็น $\Delta T = T_2 - T_1$, ส่วนรูปที่ 3.1 ข แสดงทิศทางการนำความร้อน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอัตราการนำความร้อนผ่านผนังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาและพื้นที่การนำความร้อนแต่เป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของตัวกลาง



รูปที่ 3.1 (ก) การนำความร้อนผ่านผนังหนา Δx (ข) ทิศทางการไหลของความร้อน [10]

หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q_{\text{cond}} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.1 \text{ ก})$$

เมื่อค่าคงที่ k เป็นค่าการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity of material) ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุนั้นๆ ในกรณีที่ $\Delta x \rightarrow 0$ สามารถเขียนสมการ (3.1ก) ให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อยได้เป็น

$$Q_{\text{cond}} = -k A \frac{dT}{dx} \quad (3.1 \text{ ข})$$

เมื่อ

Q_{cond}	คือ	อัตราการนำความร้อน (W)
k	คือ	ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)
A	คือ	พื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการนำความร้อน (m^2)
dT/dx	คือ	เกรเดียนท์ของอุณหภูมิในทิศทางการนำความร้อน ($^\circ\text{C/m}$)

โดยที่สมการที่ (3.1 ข) เรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's law of heat conduction) ซึ่งถูกตีพิมพ์ครั้งแรกในปี 1822 โดย Joseph Fourier ซึ่งเป็นนักคณิตศาสตร์-ฟิสิกส์ ชาวฝรั่งเศส

3.1.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อน เป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างผิวของแข็งและของเหลวหรือก๊าซที่อยู่ติดกับพื้นผิวนั้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการนำความร้อนและการเคลื่อนที่ของของไหล ถ้าเป็นการพาความร้อนในลักษณะที่ของไหลได้รับอิทธิพลจากภายนอก เช่น พัดลม บัม เพื่อทำให้เกิดการไหล จะเรียกการพาความร้อนในลักษณะนี้ว่า การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) แต่ถ้าเป็นการพาความร้อนในลักษณะที่ของไหลไหลด้วยแรงลอยตัว (Buoyancy force) อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในของไหล จะเรียกการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าวนี้ว่า การพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free convection or natural convection)

อัตราการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ และสามารถแสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และสามารถเขียนสมการการพาความร้อนตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ได้ดังนี้

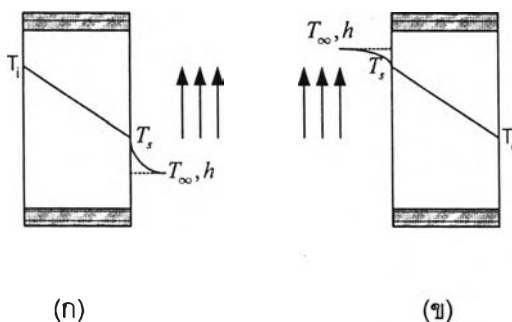
$$Q_{\text{conv}} = h A (T_s - T_\infty) \quad (3.2 \text{ ก})$$

หรือ

$$Q_{\text{conv}} = h A (T_\infty - T_s) \quad (3.2 \text{ ข})$$

เมื่อ

Q_{conv}	คือ	อัตราการพาความร้อน (W)
h	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
A	คือ	พื้นที่ผิวของการพาความร้อน (m^2)
T_s	คือ	อุณหภูมิของพื้นผิว ($^\circ\text{C}$)
T_∞	คือ	อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างจากพื้นผิว ($^\circ\text{C}$)



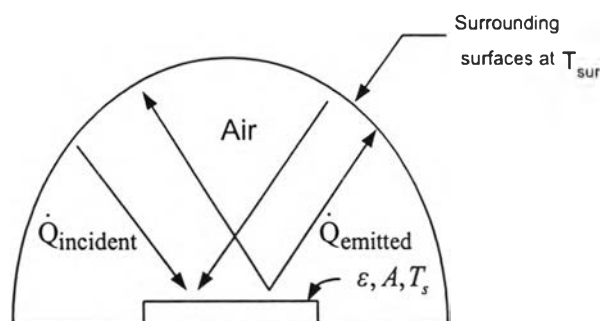
รูปที่ 3.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (ก) $T_s > T_\infty$ (ข) $T_s < T_\infty$ [11]

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นไม่เป็นคุณสมบัติของของไหล แต่เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองซึ่งขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการพาความร้อน เช่น รูปแบบการไหล (แบบลามินาร์ เทอร์บิวเลนต์ หรือทรานซิชัน) รูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล ความแตกต่างของอุณหภูมิ ตำแหน่งบนผิวของวัตถุ กลไกของการพาความร้อน (แบบอิสระหรือแบบบังคับ) เป็นต้น

3.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการส่งผ่านพลังงานของสารในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน (Electromagnetic waves or Photons) เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุล การแผ่รังสีความร้อนมีความแตกต่างจากการนำความร้อนและการพาความร้อนเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางสำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบนี้

สำหรับวัตถุใดๆที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์จะสามารถแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) ได้ ผลต่างของอัตราการแผ่รังสีโดยพื้นผิวและการดูดกลืนก็คือ การแผ่รังสีความร้อนสุทธิ ถ้าอัตราการดูดกลืนมากกว่าอัตราการแผ่รังสีจะเรียกพื้นผิวนั้นว่า ได้รับพลังงาน (Gaining) จากการแผ่รังสี แต่ถ้าอัตราการดูดกลืนน้อยกว่าอัตราการแผ่รังสีจะเรียกว่า สูญเสียพลังงาน (Losing) จากการแผ่รังสี



รูปที่ 3.3 การแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวและสิ่งแวดล้อม [10]

อัตราการแผ่รังสีสูงสุดจากพื้นผิวที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ T_s ตาม Stefan-Boltzmann's Law สามารถแสดงได้เป็น

$$\dot{Q}_{\text{rad,max}} = \sigma T_s^4 \quad (3.3)$$

เมื่อ

$\dot{Q}_{\text{rad,max}}$ คือ อัตราการแผ่รังสีสูงสุด (W)

σ	คือ	Stefan-Boltzmann Constant มีค่าประมาณ $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ จากการคำนวณหรือประมาณ $5.729 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ จากการทดลอง
T_s	คือ	อุณหภูมิของพื้นผิวใดๆ (K)

จากรูปที่ 3.3 แสดงการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวและสิ่งแวดล้อม อัตราการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวทั้งสองหาได้จาก

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (3.4 \text{ ก})$$

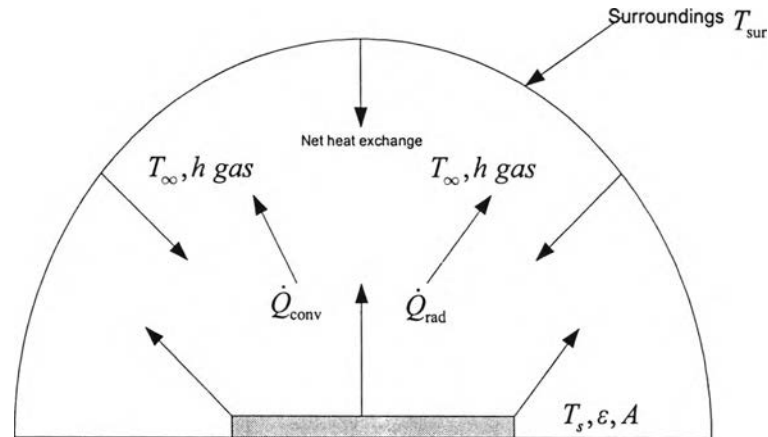
เมื่อ

\dot{Q}_{rad}	คือ	อัตราการแผ่รังสีสุทธิ (W)
ε	คือ	สภาพการแผ่รังสี (Emissivity)
σ	คือ	Stefan-Boltzmann Constant ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$)
A	คือ	พื้นที่ผิวของวัตถุเล็กๆ (m^2)
T_s	คือ	อุณหภูมิของพื้นผิว (K)
T_{sur}	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

พื้นผิวในอุดมคติที่มีการแผ่รังสีความร้อนสูงสุดคือ พื้นผิวของวัตถุดำ (Blackbody) ส่วนพื้นผิวจริงจะมีอัตราการแผ่รังสีน้อยกว่าวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกัน $\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma T_s^4$ เมื่อ ε คือสภาพการแผ่รังสีของพื้นผิว ซึ่งมีค่า $0 \leq \varepsilon \leq 1$

อย่างไรก็ตามการที่จะหาอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างวัตถุ 2 อันที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันนั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก เมื่อพิจารณากรณีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างวัตถุเล็กๆที่มีพื้นผิว A และค่าการแผ่รังสีความร้อนออกมา ε กับวัตถุใหญ่ซึ่งครอบคลุมวัตถุเล็กๆนี้อยู่โดยวัตถุเล็กมีอุณหภูมิ T_s และวัตถุใหญ่มีอุณหภูมิ T_{sur} ดังรูปที่ 3.4 (ผิววัตถุและสิ่งแวดล้อมแยกออกจากกันโดยก๊าซที่ไม่มีอิทธิพลต่อการแผ่รังสีความร้อน) อัตราสุทธิของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างผิวและสิ่งแวดล้อมต่อหน่วยพื้นที่ของผิวคือ

$$\frac{\dot{Q}_{\text{rad}}}{A} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (3.4 \text{ ข})$$



รูปที่ 3.4 การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างผิวของวัตถุเล็กๆและสิ่งแวดล้อม [11]

ในกรณีนี้พื้นที่ผิวและค่าการแผ่รังสีของสิ่งแวดล้อมไม่มีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในทางปฏิบัติมักจะแสดงอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิในรูปที่ 3.4 ดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = h_r A (T_s - T_{\text{sur}}) \quad (3.5)$$

เมื่อ

h_r คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

โดย h_r ถูกนิยามดังนี้

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{\text{sur}})(T_s^2 + T_{\text{sur}}^2) \quad (3.6)$$

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในรูปที่ 3.4 จะพบว่าวัตถุเล็กๆภายในสิ่งแวดล้อมใหญ่จะมีการถ่ายเทความร้อน 2 แบบเกิดขึ้นพร้อมๆกันคือ มีทั้งการพาความร้อนโดยก๊าซรอบๆวัตถุและการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทออกจากผิววัตถุเล็กๆคือ

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}} = h A (T_s - T_{\infty}) + h_r A (T_s - T_{\text{sur}}) \quad (3.7)$$

3.1.4 การแผ่รังสีความร้อนเนื่องจากก๊าซร้อน (Gas Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนระหว่างก๊าซและพื้นผิวถ่ายเทความร้อนเป็นกระบวนการที่มีความยุ่งยากมาก เนื่องจากก๊าซร้อนจะมีการถ่ายเทความร้อนไปสู่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วย การแผ่รังสีความร้อนจากก๊าซร้อนและการพาความร้อน ในการวิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อนในห้องเผาไหม้ของอุปกรณ์อุณหอากาศอาจจะแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟแบบเปล่งแสง (Luminous flame) และการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟแบบไม่เปล่งแสง (Nonluminous flame)

1) การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟแบบเปล่งแสง (Radiation from luminous flames)

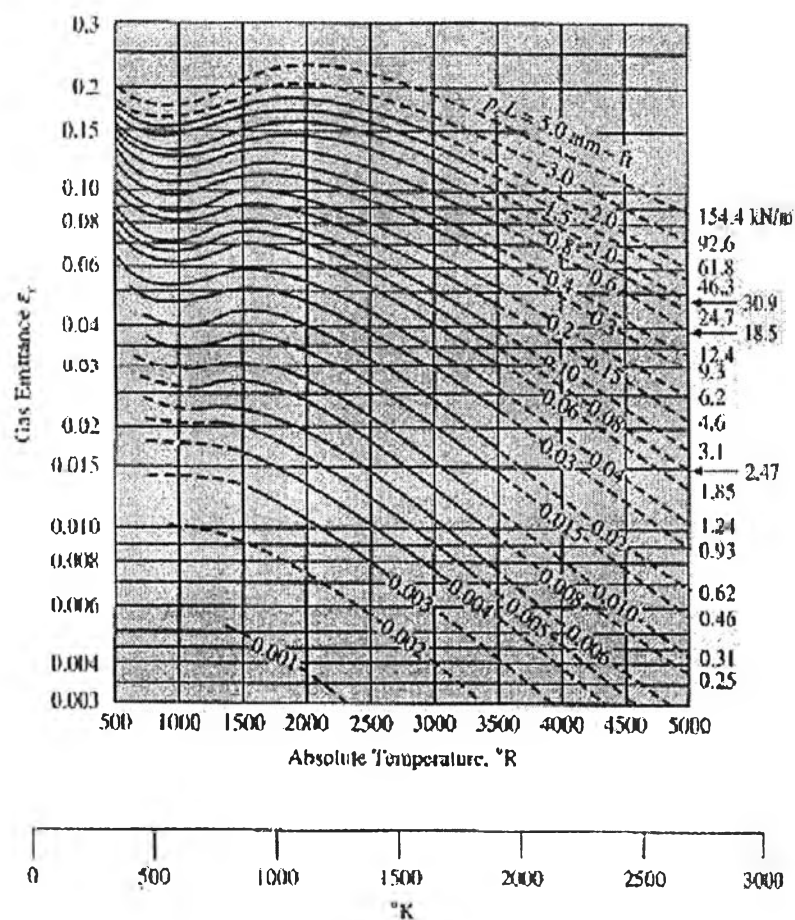
การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟแบบเปล่งแสง เป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคเล็กๆที่เกิดขึ้นในเปลวไฟหรือก๊าซร้อน ซึ่งอนุภาคเล็กๆเหล่านี้ได้แก่ เขม่าหรืออนุภาคคาร์บอน ที่เกิดจากการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอน เนื่องมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สิ่งสำคัญสองประการที่จำเป็นต้องทราบในการที่จะหาผลกระทบของเขม่าหรืออนุภาคเล็กๆเหล่านี้ขณะมีการแผ่รังสี คือ ความเข้มข้นของเขม่า (Soot concentration) และลักษณะการกระจายของเขม่าในเปลวไฟ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ และอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ดังนั้นหากทราบลักษณะการกระจายตัวของเขม่าและความเข้มข้นของเขม่าก็สามารถทำการคำนวณค่าการแผ่รังสีได้

2) การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟแบบไม่เปล่งแสง (Radiation from non-luminous flames)

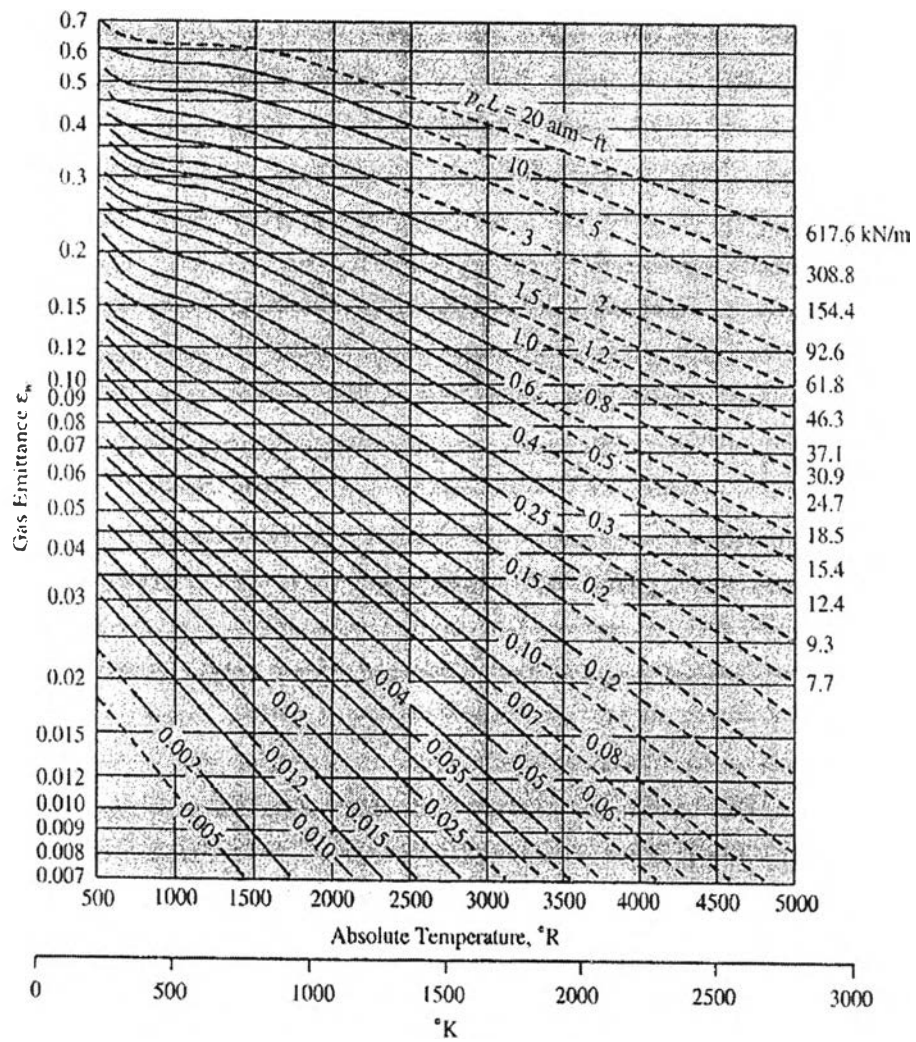
การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟแบบไม่เปล่งแสงนี้บางครั้งก็เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อนเนื่องจากโมเลกุล (Molecular radiation) เนื่องจากการเผาไหม้สะอาดปราศจากเขม่าและโดยส่วนใหญ่จะเป็นการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว เป็นต้น ซึ่งในการวิเคราะห์จะพิจารณาผลลัพท์จากการเผาไหม้ที่เป็นก๊าซ ซึ่งจะประกอบไปด้วยก๊าซต่างๆหลายชนิด เช่น O_2 , N_2 , H_2 , CO_2 , H_2O , SO_2 , CO , NH_3 , ไฮโดรคาร์บอนและแอลกอฮอล์ สำหรับก๊าซ O_2 , N_2 , H_2 และอากาศแห้งจะมีโมเลกุลที่สมมาตร (Symmetrical molecule) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีการแผ่รังสีความร้อนและดูดกลืนรังสีความร้อนได้น้อยมาก ดังนั้นจะไม่พิจารณาก๊าซเหล่านี้ในการแผ่รังสีความร้อนและจะพิจารณาเฉพาะ ก๊าซที่มีโมเลกุลไม่สมมาตร เช่น CO_2 , H_2O , SO_2 , CO , NH_3 , ไฮโดรคาร์บอนและแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นก๊าซที่มีความสำคัญมากในการแผ่รังสีความร้อน เพราะก๊าซเหล่านี้สามารถที่จะดูดกลืนและแผ่รังสีความร้อนได้มาก สำหรับงานวิจัยนี้เชื้อเพลิงที่ใช้เป็น NG สันดาปกับอากาศเผาไหม้ ดังนั้นการพิจารณาก๊าซผลลัพท์ที่ได้จากการเผาไหม้จะพิจารณาเฉพาะก๊าซ CO_2 และ H_2O

เท่านั้น สำหรับก๊าซต่างๆค่าการแผ่รังสีและค่าการดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของก๊าซ ซึ่ง Hottel (อ้างอิงใน Holman [12]) ได้เสนอวิธีการคำนวณโดยประมาณเพื่อให้สามารถหาค่าการแผ่รังสีและค่าการดูดกลืน โดย Hottel ได้คำนวณหาค่าของการแผ่รังสีความร้อนและค่าการดูดกลืนของก๊าซชนิดต่างๆที่อุณหภูมิและความดันต่างๆและได้นำเสนอผลการคำนวณอยู่ในรูปของกราฟดังแสดง ในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 โดยกราฟดังกล่าวนี้ใช้กับระบบที่เป็นรูปร่างครึ่งวงกลมที่มีรัศมี L_e , อุณหภูมิ T_g , ความดันของไอน้ำ P_w และความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ P_c แลกเปลี่ยนความร้อนกับวัตถุดำ ซึ่งวางที่จุดกึ่งกลางของฐานรูปทรงกลมนี้

อย่างไรก็ตามกราฟเหล่านี้ก็สามารถใช้สำหรับระบบที่มีรูปร่างอื่นๆ โดยใช้ค่าความยาวสมมูลของลำก๊าซ (L_e) ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของ CO_2 ที่ความดันรวม 1 atm [12]



รูปที่ 3.6 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของไอน้ำที่ความดันรวม 1 atm [12]

ตารางที่ 3.1 ความยาวสมมูลของลำก๊าซ [12]

Gas volume	Characteristic dimension	L_e
Volume between two infinite plates	Separation distance L	$1.8L$
Circular cylinder with the height = diameter, radiation to center of base	Diameter D	$0.71D$
Hemisphere, radiation to element in center of base	Radius R	R
Sphere, radiation to entire surface	Diameter D	$0.65D$
Infinite circular cylinder, radiation to convex bounding surface	Diameter D	$0.95D$
Circular cylinder with height = diameter, radiation to entire surface	Diameter D	$0.60D$
Circular cylinder, semi-infinite height, radiation to entire base	Diameter D	$0.65D$
Cube, radiation to any face	Edge L	$0.60L$
Volume surrounding infinite tube bundle, Irradiation to a single tube	Tube diameter D , distance between tube centers S	
Equilateral-triangle arrangement: $S = 2D$ $S = 3D$		$3.0(S-D)$ $3.8(S-D)$
Square arrangement		$3.5(S-D)$

จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 จะพบว่าค่าการแผ่รังสีความร้อนของไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกับค่าผลคูณระหว่างความดันรวม (P_{atm}) กับความยาวสมมูลของลำก๊าซ (L_e) ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 3.1 หรือสามารถประมาณได้จากสมการ

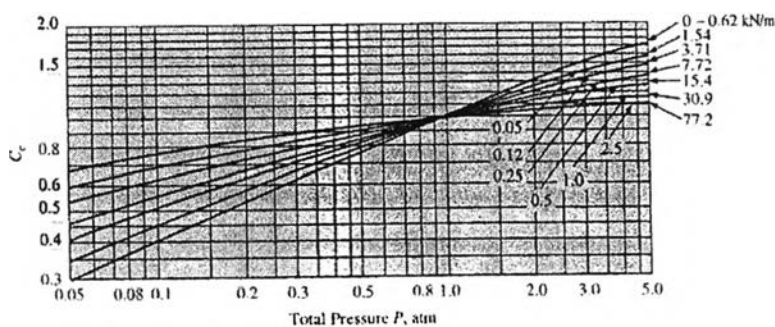
$$L_e = 3.6 \frac{V}{A} \quad (3.8)$$

เมื่อ

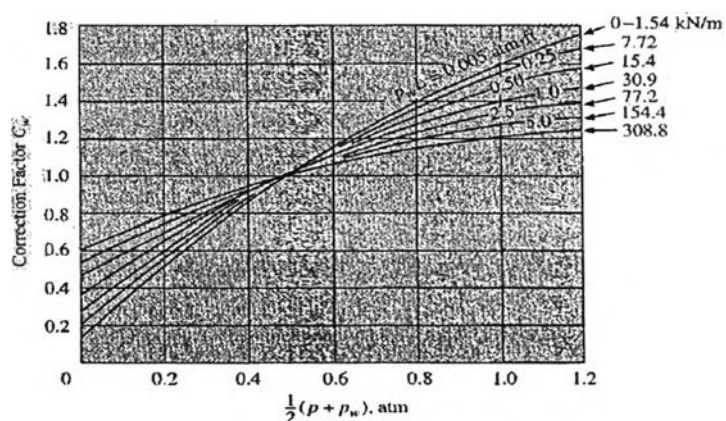
V คือ ปริมาตรรวมของก๊าซ

A คือ พื้นที่ผิวรวม

ค่าการแผ่รังสีของไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 เป็นค่าที่ความดันรวม 1 บรรยากาศ แต่หากความดันรวมของก๊าซที่ต้องการหาค่าการแผ่รังสีความร้อนแตกต่างจาก 1 บรรยากาศจะต้องใช้ค่าแฟคเตอร์ปรับแก้ (Correction factor) สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 แฟคเตอร์ปรับแก้ค่าการแผ่รังสีของก๊าซ CO₂ [12]

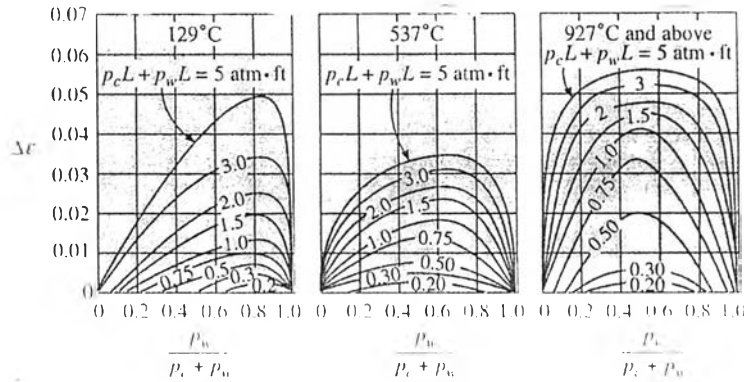


รูปที่ 3.8 แฟคเตอร์ปรับแก้ค่าการแผ่รังสีของ H₂O [12]

ในกรณีนี้ทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำรวมอยู่ด้วยกัน ค่าการแผ่รังสีจะหาได้จากการรวมค่าการแผ่รังสีของก๊าซแต่ละชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งค่าที่ได้จากการรวมกันนี้อาจมีค่าสูงเกินไป เพราะค่าการแผ่รังสีของก๊าซสองชนิดอาจมีช่วงคลื่นทับกัน จึงต้องมีการปรับแก้ค่าที่เกินนี้ โดยค่าการแผ่รังสีความร้อนรวมสามารถหาได้จาก

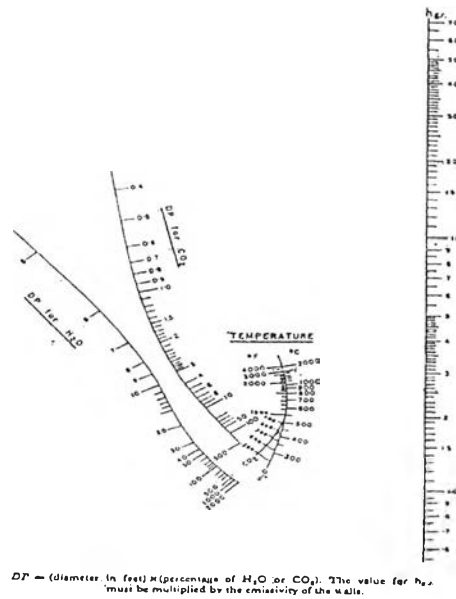
$$\epsilon_g = C_c \epsilon_c + C_w \epsilon_w - \Delta \epsilon \quad (3.9)$$

โดยที่ $\Delta \epsilon$ หาได้จากรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แฟคเตอร์ปรับแก้ค่าการแผ่รังสีเมื่อเกิด CO₂ และ H₂O ในรูปทรงปิด [12]

เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ Hottel ได้สร้างแผนภูมิสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของก๊าซ (h_{gr}) ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภูมิสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของก๊าซ [13]

โดยจากรูปที่ 3.10 ค่า DP คือค่าที่ได้จากผลรวมของเส้นผ่านศูนย์กลางของลำก๊าซ (D) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$DP_{\text{total}} = D_c \times P_c + D_w \times P_w \quad (3.10)$$

เมื่อหาอุณหภูมิเฉลี่ย (T_{avc}) จากอุณหภูมิของผนังท่อไฟ (T_{tubc}) และก๊าซร้อน (T_g) ดังนั้นค่า h_{gr} สามารถอ่านได้จากแผนภูมิของก๊าซแต่ละชนิด และ $h_{gr,\text{total}}$ ที่ได้คือผลรวมของสัมประสิทธิ์ของก๊าซทั้งสอง ซึ่งจะได้

$$h_{gr,\text{total}} = h_{gr,c} + h_{gr,w} \quad (3.11)$$

หลังจากนั้นนำค่า $h_{gr,\text{total}}$ ที่ได้คูณกับค่าการแผ่รังสีของผิวตัวรับความร้อน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจริง ดังนี้

$$h_{gr,\text{real}} = \varepsilon_{\text{tubc}} h_{gr,\text{total}} \quad (3.12)$$

ดังนั้นสมการสำหรับหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีต่อหน่วยพื้นที่ ($\text{Btu}/\text{ft}^2 \text{ hr}$) คือ

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = h_{gr,\text{real}} \times (T_g - T_{\text{tubc}}) \quad (3.13)$$

เราสามารถนำสมการ (3.13) ไปประยุกต์ใช้กับกรณีที่มีการแผ่รังสีความร้อนดังต่อไปนี้

1. การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟแบบไม่เปล่งแสงและจากก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้โดยตรงภายในเตา
2. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีใน Regenerator และ Recuperator

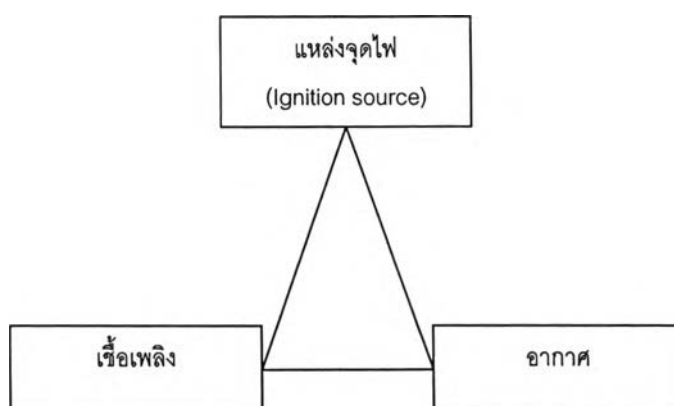
3.2 การเผาไหม้ (Combustion)

ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้ หมายถึง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง (ตั้งแต่ 1000 °C ขึ้นไป โดยประมาณ) และเกิดขึ้นเร็วมากในช่วงเวลา 1 μ s-10 ms โดยเป็นปฏิกิริยาที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ในวัฏภาคก๊าซระหว่างโมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือโมเลกุลที่เกิดจากการแตกตัวของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศ

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ไม่ใช่ปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลโดยตรง แต่เริ่มต้นด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงที่เป็นอนุมูลอิสระที่ว่องไว (Active free radicals) จำนวนมาก ซึ่งเป็นขั้นตอนการเริ่มต้นของลูกโซ่ (Chain initiation) อนุมูลอิสระที่ว่องไวจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ได้ทั้งอนุมูลอิสระใหม่และอนุมูลขั้นกลาง (Intermediate radicals) อื่นๆ ซึ่งก็จะทำปฏิกิริยาต่อลูกโซ่ (Chain propagation) ที่เกิดขึ้นพร้อมกันและที่เกิดเป็นลำดับก่อนหลังหลายรูปแบบ ทำให้เกิดทั้งผลผลิตและอนุมูลอื่นๆอีกมาก สุดท้ายคือปฏิกิริยาที่ให้ผลผลิตสุดท้ายและอนุมูลที่ไม่ว่องไว ตามด้วยการสิ้นสุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain termination)

3.2.1 สภาวะที่จำเป็นในการเริ่มปฏิกิริยาการเผาไหม้

ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมีตัวทำปฏิกิริยาและสภาวะที่เหมาะสม ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาการออกซิโดซ์เชื้อเพลิงให้กลายเป็นออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจนสมบูรณ์ สำหรับการเผาไหม้ทั่วไป ตัวทำปฏิกิริยา คือ เชื้อเพลิง (ส่วนใหญ่คือไฮโดรคาร์บอน) และอากาศ ซึ่งจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้ต่อเมื่อมีสภาวะที่เหมาะสม (แหล่งให้ความร้อนเพื่อจุดไฟ (Ignition source)) โดยรูปที่ 3.11 แสดงองค์ประกอบทั้งสามในการเผาไหม้



รูปที่ 3.11 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ [14]

การเริ่มต้นปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ เริ่มด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระก่อน แหล่งจุดไฟจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะจะให้พลังงานส่วนแรกแก่ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนทำให้เชื้อเพลิงเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระจำนวนมากพอที่จะไปทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเผาไหม้ เมื่อเริ่มมีการเผาไหม้แล้ว ก็ไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจุดไฟอีกต่อไปเพราะพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เริ่มต้นนั้นมากเกินพอที่จะทำให้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เกิดการแตกตัวและเผาไหม้ต่อเนื่องกันไปได้เองจนสมบูรณ์ (Spontaneous reaction)

3.2.2 พลังงานการจุดไฟและอุณหภูมิการจุดไฟ

พลังงานส่วนแรกที่ต้องให้เพื่อเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่นี้เรียกว่า พลังงานการจุดไฟ (Ignition energy) โดยมักจะวัดจากอุณหภูมิการจุดไฟ (Ignition temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่ต่ำที่สุดที่จะจุดติดไฟได้เอง ดังนั้นอุณหภูมิการจุดไฟจึงเป็นเครื่องบ่งชี้ระดับพลังงานที่ต้องให้แก่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ [14]

Combustible	Formula	Temperature	
		°F	°C
Sulfur	S	470	245
Charcoal	C	650	345
Fixed carbon (Bituminous coal)	C	765	405
Fixed carbon (Semibituminous coal)	C	870	465
Fixed carbon (Anthracite)	C	840 - 1115	450 - 600
Acetylene	C ₂ H ₂	580 - 825	305 - 440
Ethane	C ₂ H ₆	880 - 1165	470 - 630
Ethylene	C ₂ H ₄	900 - 1020	480 - 550
Hydrogen	H ₂	1065 - 1095	575 - 590
Methane	CH ₄	1170 - 1380	630 - 765
Carbon monoxide	CO	1130 - 1215	610 - 665
Kerosene	-	490 - 560	255 - 295
Gasoline	-	500 - 800	260 - 425

ดังที่กล่าวมาแล้ว ปฏิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิริยาการลุกไหม้ ดังนั้นเราสามารถทำให้ส่วนผสมติดไฟได้ โดยให้พลังงานการจุดไฟในบริเวณเล็กๆเพียงบริเวณเดียวก็เพียงพอแล้ว ยกตัวอย่างเช่น การใช้ไม้ขีดไฟจุดหัวเตาแก๊สหุงต้ม หรือการใช้ประกายไฟจากหัวเทียนจุดระบบส่วนผสมในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ อุณหภูมิการจุดไฟแสดงถึงความยากง่ายที่เชื้อเพลิงจะเกิดการเผาไหม้ ซึ่งหมายถึงความปลอดภัยในการใช้งานด้วย ซึ่งประโยชน์ของค่านี้อันในอุตสาหกรรมคือ ใช้เป็นอุณหภูมิอ้างอิงในการอุ่นเตาก่อนจุดหัวเผา

3.2.3 เปลวไฟ (Flames)

เปลวไฟเป็นบริเวณการเผาไหม้ (Combustion zone) ที่เคลื่อนที่ (Propagate) เข้าหาส่วนผสมระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศ (หรือสารออกซิไดซ์) ซึ่งการที่จะเกิดเปลวไฟขึ้นได้นั้น ต้องเริ่มจากส่วนผสมที่เหมาะสมโดยช่วงที่เหมาะสมที่จะเกิดเปลวไฟขึ้นได้อยู่ระหว่างส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงเจือจางที่สุด (Lean mixture) ที่จะเกิดเปลวไฟขึ้นได้ เรียกว่า ขีดจำกัดขั้นต่ำของการเกิดเปลวไฟ (Lower limit of flammability) และส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงเข้มข้นที่สุด (Rich mixture) ที่ยังเกิดเปลวไฟได้ เรียกว่า ขีดจำกัดขั้นสูงของการเกิดเปลวไฟ (Upper limit of flammability) ช่วงกว้างของส่วนผสมนี้เรียกว่า ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ (Limits of flammability) ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟแตกต่างกัน ทั้งช่วงกว้าง และค่าของขีดจำกัดทั้งขั้นต่ำและขั้นสูง ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟสำหรับปฏิริยาการเผาไหม้ที่เป็นเนื้อเดียวกันสามารถเกิดได้ในช่วงความดันและอุณหภูมิที่กว้าง ถ้าส่วนผสมระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศเกิดปฏิริยาภายใต้ความดันสูงจะเกิดปฏิริยาที่มีความเร็วเหนือเสียง (Supersonic reactions) เรียกว่า การระเบิด (Detonations) และถ้าส่วนผสมระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศเกิดปฏิริยาที่ความดันบรรยากาศหรือภายใต้ความดันต่ำ จะเป็นปฏิริยาที่ความเร็วต่ำกว่าเสียง (Subsonic reactions) เรียกว่า การเผาด้วยความร้อน (Deflagrations) แต่คำที่นิยมใช้มากกว่า คือ การเกิดเปลวไฟ (Flames) เพราะที่ความดันปกติ แนวหรือขอบเขตของการเผาไหม้ปรากฏเป็นแสงสว่างที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

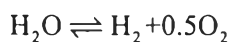
ตารางที่ 3.3 ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

[14]

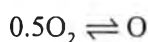
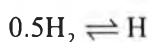
Full	Formula	Leanest	Richest
		%	%
Acetone	C_3H_6O	3.10	11.15
Acetylene	C_2H_2	2.50	80.00
Ammonia	NH_3	16.10	26.60
Benzene	C_6H_6	1.41	7.10
Butane	C_4H_{10}	1.86	8.41
Butyl	$C_4H_{10}O$	1.45	11.25
Butylene	C_4H_8	1.98	9.65
Carbon monoxide	CO	12.50	74.20
Ethane	C_2H_6	3.22	12.45
Ethyl	C_2H_6O	4.25	18.95
Ethylene	C_2H_4	3.05	28.60
Heptane	C_7H_{16}	1.00	6.70
Hexane	C_6H_{14}	1.27	6.90
Hydrogen	H_2	4.00	74.20
Methane	CH_4	5.00	14.00
Methyl	CH_4O	7.10	36.50
Octane	C_8H_{18}	0.95	-
Pentane	C_5H_{12}	1.42	7.80
Propane	C_3H_8	2.37	9.50
Propyl	C_3H_8O	2.15	13.50
Propylene	C_3H_6	2.40	10.30
Propylene oxide	C_3H_6O	2.10	21.50
Toluene	C_7H_8	1.45	6.75

3.2.4 อุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติก (Adiabatic flame temperature)

สำหรับเตาเผาและหม้อไอน้ำ จำเป็นต้องทราบถึงอุณหภูมิภายในเตาเผาและอุณหภูมิของก๊าซผลผลิต (Flue gas) ที่ได้จากการเผาไหม้ เพื่อใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนหรือการคำนวณเกี่ยวกับปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายเทให้แก่วัสดุภายในเตาเผาหรือเตาหลอม หรือให้แก่ไอน้ำ ในระบบดังกล่าวผลผลิตที่เป็นก๊าซเสีย จะออกจากระบบด้วยกันทั้งหมดเป็นกระแสเดียว อุณหภูมิของก๊าซไอเสียทั้งหมดจะสูงขึ้นเรียกว่า อุณหภูมิเปลวไฟ (Flame temperature) ถ้าปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนในอากาศมีปริมาณเพียงพอตามทฤษฎี จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ และไม่มีการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ อุณหภูมิของเปลวไฟจะเป็นอุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดอะเดียแบติก (Maximum adiabatic flame temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งจะให้ได้ แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลของผลผลิตจากการเผาไหม้ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ไนโตรเจน และออกซิเจนเกินพอที่มีอยู่ในขณะนั้นจะเกิดการแตกตัวกลายเป็นอนุมูล และอะตอมที่ว่องไว เช่น



และที่อุณหภูมิสูงยิ่งขึ้น จะเกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจนกลายเป็นอะตอม



ซึ่งปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนจึงมีผลให้ปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในระบบลดลง อุณหภูมิของเปลวไฟจึงลดลง เราสามารถใช้ค่าคงที่สมดุลการแตกตัว (Dissociation equilibrium constant) คำนวณอุณหภูมิของเปลวไฟที่คำนึงถึงการแตกตัวของโมเลกุลที่อุณหภูมิสูงได้ และเรียกอุณหภูมิที่ว่าเป็นว่า อุณหภูมิของเปลวไฟอะเดียแบติกที่ปรับแก้แล้ว (Corrected adiabatic flame temperature) โดยตารางที่ 3.4 แสดงค่าความร้อนและอุณหภูมิเปลวไฟของก๊าซเชื้อเพลิงทั้งที่คำนวณตามทฤษฎีและที่คำนวณการแตกตัวเข้าสู่สภาวะสมดุล



ตารางที่ 3.4 ค่าความร้อนและอุณหภูมิเปลวไฟของก๊าซเชื้อเพลิง [14]

ก๊าซ	สูตร	ค่าความร้อนรวม (Btu/ft ³) T 60°F, P 30 in.Hg และอิมิตัว ด้วยไอน้ำ	อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุด (°C) เผาไหม้กับอากาศแห้ง 25°C		
			ความถูกต้อง โดยเป็น การเผาไหม้ ที่สมบูรณ์	ตามการคำนวณให้เข้าสู่ สภาวะสมดุล	ตามการทดลอง
Carbon monoxide	CO	316	2342		
Hydrogen	H ₂	319	2217		
Parafins:					
Methane	CH ₄	994	2012	1918	1885
Ethane	C ₂ H ₆	1742	2065	1949	1900
Propane	C ₃ H ₈	2479	2356	1967	1930
n-Butane	C ₄ H ₁₀	3215	2084	1973	1905
Isobutane	C ₄ H ₁₀	3305			
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	3949	2087		
Isopentane	C ₅ H ₁₂	3939			
Neopentane	C ₅ H ₁₂	3924			
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	4680			
Olefins:					
Ethylene	C ₂ H ₄	1576	2250	2072	1980
Propylene	C ₃ H ₆	2299	2150	2050	1940
Butylene	C ₄ H ₈	3036	2158	2033	1935
Isobutene	C ₄ H ₈	3015			
Amylene	C ₅ H ₁₀	3770	2204		
Aromatics:					
Benzene	C ₆ H ₆	3687	2211		
Toluene	C ₆ H ₅ CH ₃	4409	2187		
Xylene	C ₈ H ₁₀	5139			
Miscellaneous gases:					
Naphthalene	C ₁₀ H ₈	5753			
Methyl alcohol	CH ₃ OH	853			
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	1573			
Ammonia	NH ₃	434			
Hydrogen sulfide	H ₂ S	636			

3.2.5 พลังงานความร้อนของการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reactions) จากความรู้เบื้องต้นทางด้านความร้อนของปฏิกิริยา (Thermo-chemistry) สามารถคำนวณปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาใดๆ ได้หลายวิธี เช่น คำนวณจากความร้อนของปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐาน (Standard heat of reaction, ΔH_r°) คือที่ความดันหนึ่งบรรยากาศและที่อุณหภูมิเท่ากับ 25 °C หรือคำนวณจากความร้อนของการเกิด (ของสารใดๆ) ที่สภาวะมาตรฐาน (Standard heat of formation, ΔH_f°) หรือคำนวณจากความร้อนของการเผาไหม้ที่สภาวะมาตรฐาน (Standard heat of combustion, ΔH_c°) ซึ่งคำนวณได้ในลักษณะเดียวกันแต่ค่าที่ได้จะเป็นลบเพราะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งถ้ามีค่าเป็นบวกแสดงว่าสารนั้นไม่สามารถเผาไหม้หรือถูกออกซิไดซ์ได้

3.2.6 ค่าความร้อน (Heating value or Calorific value)

ในการคำนวณ พลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้จะมีค่าเป็นลบ ซึ่งไม่สะดวกแก่การใช้งาน จึงนิยมใช้เทอม ค่าความร้อน (Heating value or Calorific value) ซึ่งมีค่าเท่ากับความร้อนของการเผาไหม้ที่สภาวะมาตรฐานแต่มีค่าเป็นบวก สำหรับเชื้อเพลิงธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นถ่านหิน น้ำมัน รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม หรือ ชีวมวล ไม่สามารถคำนวณค่าความร้อนจากความร้อนของปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ จำเป็นต้องทำการทดลองในเครื่องมือเฉพาะ โดยที่เชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว จะต้องทำการทดสอบกับเครื่องมือที่เรียกว่า บอมป์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต้องทำการทดสอบด้วยเครื่องแคลอรีมิเตอร์แบบมีน้ำไหลผ่าน (Water flow calorimeter)

1) ค่าความร้อนรวม (Total heating value, THV)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง หมายถึง ปริมาณความร้อนที่จะให้ออกมา หลังการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยที่ตัวทำปฏิกิริยาเริ่มต้นและผลผลิตสุดท้ายทั้งหมดอยู่ภายใต้ความดันหนึ่งบรรยากาศและอุณหภูมิ 25 °C เมื่อน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในสถานะของเหลว เรียกว่า ค่าความร้อนขั้นสูง (Higher heating value, HHV) หรือค่าความร้อนทั้งหมด (Gross heating value, GHV) หรือค่าความร้อนรวม (Total heating value, THV)

2) ค่าความร้อนสุทธิ (Net heating value, NHV)

ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิง หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยที่ตัวทำปฏิกิริยาเริ่มต้นและผลผลิตสุดท้ายทั้งหมดอยู่ในภายใต้ความดันหนึ่งบรรยากาศและที่อุณหภูมิ 25 °C ถ้าน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดขึ้นในสารผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้มีสถานะเป็นไอน้ำ จะ

เรียกค่าความร้อนที่ได้นี้ว่า ค่าความร้อนขั้นต่ำ (Lower heating value, LHV) หรือค่าความร้อนสุทธิ (Net heating value, NHV) โดยที่ผลต่างระหว่างค่าความร้อนรวมและค่าความร้อนสุทธิมีค่าเท่ากับ ความร้อนของการระเหยของน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในสารผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 25 °C หรือแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$\text{HHV} = \text{NHV} + n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{\text{vap}, 25^\circ\text{C}}^\circ \quad (3.14)$$

3.3 การคำนวณการเผาไหม้

การคำนวณการเผาไหม้ คือ การคำนวณเชิงปริมาณก่อนและหลังการเกิดกระบวนการเผาไหม้ ในการควบคุมดูแลการเผาไหม้หรือการควบคุมดูแลความร้อน มีความจำเป็นที่จะต้องรู้ปริมาณอากาศที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และปริมาณก๊าซทิ้งที่เกิดจากการเผาไหม้ รวมทั้งองค์ประกอบของก๊าซทิ้งที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วย

อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ประกอบด้วย ออกซิเจน ไนโตรเจน และก๊าซอื่นๆอีกจำนวนเล็กน้อย เช่น อาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น โดยมีอัตราส่วนองค์ประกอบของอากาศดังแสดงในตารางที่ 3.5 และค่าประมาณขององค์ประกอบแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบของอากาศ (บนผิวโลก) [15]

องค์ประกอบ						
อัตราส่วนองค์ประกอบ	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Ne	H ₂
โดยปริมาตร	0.7809	0.20950	0.0093	0.00030	0.000018	0.0000052
โดยน้ำหนัก	0.7552	0.23150	0.0128	0.00046	0.000012	0.00000072

ตารางที่ 3.6 ค่าประมาณขององค์ประกอบของอากาศ [15]

องค์ประกอบ		
อัตราส่วนองค์ประกอบ	O ₂	N ₂
โดยปริมาตร	0.21	0.79
โดยน้ำหนัก	0.232	0.768

3.3.1 ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี (A_o)

โดยทั่วไปการผสมอย่างสม่ำเสมอระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงในห้องสันดาปนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะ การป้อนปริมาณอากาศพอดีเพื่อให้ได้ปริมาณเชิงทฤษฎีที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์นั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วจึงต้องป้อนปริมาณอากาศเข้าเครื่องสันดาปมากกว่าปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีเล็กน้อย อัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่ใช้จริงกับปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีเรียกว่า สัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกิน (Excess air coefficient) หรืออัตราส่วนอากาศ (Air ratio) ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ m

ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้จริงเป็น A จะได้

$$A = m A_o \quad (3.15)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} A &= \text{ปริมาณอากาศที่ใช้จริง} \\ A_o &= \text{ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี} \\ m &= \text{สัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกินหรืออัตราส่วนอากาศ} \end{aligned}$$

ปริมาณอากาศส่วนที่เกินจากค่าทฤษฎีคือ $(m-1) A_o$

ถ้าอัตราส่วนอากาศน้อยเกินไปก็จะเกิดการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ แต่ถ้ามากเกินไปถึงแม้ว่าจะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ แต่อากาศส่วนเกินก็ถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วย ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนโดยไม่จำเป็น ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการวัดค่าความเข้มข้นของ O_2 ในก๊าซเสียเพื่อตัดสินความเหมาะสมหรือไม่เหมาะสมของค่าอัตราส่วนอากาศ ปริมาณ O_2 ที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ของก๊าซแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การเผาไหม้ของก๊าซต่างๆซึ่งประกอบเป็นก๊าซเชื้อเพลิง [15]

ก๊าซ		สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้	สำหรับก๊าซ 1 Nm ³			
ชื่อก๊าซ	สูตรโมเลกุล		สารจากการเผาไหม้		O ₂ ที่ใช้ไป	N ₂ ที่เหลือ
			คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ Nm ³)	ไอน้ำ (H ₂ O Nm ³)	ออกซิเจน (O ₂ Nm ³)	ไนโตรเจน (N ₂ Nm ³)
ไฮโดรเจน	H ₂	H ₂ + 1/2 O ₂ = H ₂ O	-	1	0.5	1.88
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO	CO + 1/2 O ₂ = CO ₂	1	-	0.5	1.88
methane	CH ₄	CH ₄ + 2 O ₂ = CO ₂ + 2 H ₂ O	1	2	2	7.52
ethane	C ₂ H ₆	C ₂ H ₆ + 7/2 O ₂ = 2 CO ₂ + 3 H ₂ O	2	3	3.5	13.17
ethylene	C ₂ H ₄	C ₂ H ₄ + 3 O ₂ = 2 CO ₂ + 2 H ₂ O	2	2	3	11.29
acetylene	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂ + 5/2 O ₂ = 2 CO ₂ + H ₂ O	2	1	2.5	9.4
propane	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈ + 5 O ₂ = 3 CO ₂ + 4 H ₂ O	3	4	5	18.81
propylene	C ₃ H ₆	C ₃ H ₆ + 9/2 O ₂ = 3 CO ₂ + 3 H ₂ O	3	3	4.5	16.93
butane	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀ + 13/2 O ₂ = 4 CO ₂ + 5 H ₂ O	4	5	6.5	24.45
butylene	C ₄ H ₈	C ₄ H ₈ + 6 O ₂ = 4 CO ₂ + 4 H ₂ O	4	4	6	22.57
ก๊าซไฮโดรคาร์บอนทั่วไป	C _m H _n	C _m H _n + (m+n) O ₂ = m CO ₂ + n/2 H ₂ O	m	n/2	m+n/4	0.79/0.21(m+n/4)

3.3.2 ปริมาณก๊าซสันดาป

ก๊าซสันดาปซึ่งเกิดจากการสันดาปอย่างสมบูรณ์ของก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วย CO₂ และ H₂O ซึ่งเกิดจากการสันดาป และ CO₂, N₂ ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ตลอดจน N₂ ในอากาศที่ใช้และ O₂ ส่วนเกิน ซึ่งหาจากความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณก๊าซสันดาป (G) และ ปริมาณก๊าซสันดาปเชิงทฤษฎี (G_o) โดยค่านึงว่า หลังจากทำการสันดาปอย่างสมบูรณ์แล้ว ปริมาณอากาศส่วนเกิน ($m-1$) A_o จะยังเหลืออยู่ในก๊าซสันดาปในสภาพนั้น

$$G = G_o + (m-1)A_o \quad (3.16)$$

ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี (A_o) และปริมาณก๊าซสันดาปเชิงทฤษฎี (G_o) สามารถคำนวณได้จากกรวิเคราะห์ธาตุแต่ละตัวในเชื้อเพลิง แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงทำ

ได้ค่อนข้างยาก ดังนั้น Boie (อ้างอิงใน [16]) จึงได้สร้างความสัมพันธ์เพื่อให้เกิดความสะดวกในการนำไปใช้ ดังแสดงในตารางที่ 3.8 (ความสัมพันธ์ระหว่าง A_o , G_o และค่าความร้อนต่ำ LHV)

ตารางที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำ LHV, A_o และ G_o (ข้อมูลจาก Boie: อ้างอิงใน [16])

ชนิดของเชื้อเพลิง	A_o	G_o
เชื้อเพลิงแข็ง (LHV : kcal/kg เชื้อเพลิง)	$\frac{1.01(LHV + 550)}{1,000} \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$	$\frac{0.905(LHV + 550)}{1,000} + 1.17 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$
เชื้อเพลิงเหลว (LHV : kcal/kg เชื้อเพลิง)	$\frac{12.38(LHV - 1,100)}{10,000} \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$	$\frac{15.75(LHV - 1,100)}{10,000} - 2.18 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$
ก๊าซเชื้อเพลิง LHV > 3,500 $\frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3}$	$\frac{11.05 \text{LHV}}{10,000} + 0.2 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3}$	$\frac{11.9 \text{LHV}}{10,000} + 0.50 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3}$

3.4 การทำสมดุลความร้อน (Heat Balance)

3.4.1 ความสำคัญของสมดุลความร้อน

สำหรับความร้อนที่ป้อนให้อุปกรณ์สันดาปหรืออุปกรณ์ให้ความร้อน ส่วนหนึ่งจะเป็นความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้ แต่อีกส่วนหนึ่งจะเป็นความร้อนสูญเสียที่ถูกปล่อยทิ้งไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบว่าต้องทำอะไรที่ส่วนไหนของอุปกรณ์เพื่อให้สามารถเพิ่มปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์มากขึ้น และลดความร้อนที่ต้องป้อนเข้า โดยการทำสมดุลความร้อน ซึ่งก็คือการคำนวณความร้อนเข้าและออกของอุปกรณ์ต่างๆอย่างละเอียดนั่นเอง

ภายในเวลาคงที่ ถ้าให้ความร้อนที่เข้าอุปกรณ์เป็นความร้อนเข้า และความร้อนที่ออกจากอุปกรณ์เป็นความร้อนออก จากกฎของการอนุรักษ์พลังงาน (Law of Energy Conservation) ที่ว่า “พลังงานไม่สามารถสร้างขึ้นหรือทำลายได้แต่สามารถที่จะเปลี่ยนรูปได้” เมื่อคิดที่สภาวะคงตัว (Steady state) จะได้

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \Delta \dot{E}_{system} = 0 \quad (3.17)$$

เมื่อ

\dot{E}_{in} คือ อัตราการถ่ายเทพลังงานเข้าสู่ระบบ

\dot{E}_{out} คือ อัตราการถ่ายเทพลังงานออกจากระบบ

\dot{E}_{system} คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบ

โดยการใช้ความสัมพันธ์นี้เราสามารถคาดคะเนความร้อนออกบางหัวข้อที่วัดได้ยาก จากค่าการวัดความร้อนในหัวข้ออื่นๆ นอกจากนี้ในกรณีที่ความร้อนเข้าไม่เท่ากับความร้อนออก ข้อมูลที่ได้ก็เป็นประโยชน์ในการพิจารณาความขัดข้องที่อาจเกิดขึ้นของเครื่องมือวัดอีกด้วย จากการทำสมดุลความร้อนเพื่อแสดงค่าความร้อนออกแต่ละหัวข้อ จะทำให้ทราบอย่างชัดเจนว่าจะต้องปรับปรุงอุปกรณ์อย่างไรจึงจะเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานของอุปกรณ์ใช้ความร้อนได้

3.4.2 ขอบเขตของการทำสมดุลความร้อน

เนื่องจากในทางปฏิบัติ อุปกรณ์ทางความร้อนต่างๆจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลายอย่าง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดให้ชัดเจนว่า สมดุลความร้อนมีขอบเขตเพียงใด ความร้อนปริมาณเดียวกันในบางกรณีอาจถือเป็นความร้อนเข้า แต่เมื่อเปลี่ยนกำหนดขอบเขตแล้วอาจไม่ถือเป็นความร้อนเข้าก็ได้

ความร้อนเข้า หมายถึง ความร้อนที่เข้าสู่อุปกรณ์และความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

ความร้อนออก หมายถึง ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากอุปกรณ์ และความร้อนที่ถูกดูดไว้ภายในอุปกรณ์ เป็นต้น

นอกจากนี้ในอุปกรณ์บางอย่าง ความร้อนออกส่วนหนึ่งจะถูกนำกลับเข้าไปในอุปกรณ์อีกครั้งหนึ่ง เช่น ในกรณีของหม้อไอน้ำที่นำเอาความร้อนจากก๊าซไอเสียกลับมาอุ่นอากาศสำหรับใช้สันดาป โดยอาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุปกรณ์อุ่นอากาศ ความร้อนที่ไม่ปล่อยออกจากอุปกรณ์แต่หมุนเวียนอยู่ภายในอุปกรณ์เช่นนี้ เรียกว่า ความร้อนหมุนเวียน และไม่ถือเป็นความร้อนเข้าหรือความร้อนออก

3.4.3 หลักเกณฑ์และหน่วยของการทำสมดุลความร้อน

สำหรับอุณหภูมิมาตรฐานในบางครั้งอาจใช้ค่า 0°C แต่โดยปกติจะใช้อุณหภูมิอากาศภายนอก (ประมาณ 30°C) ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิอากาศภายนอกเป็นมาตรฐาน ถ้าไม่มีการอุ่นอากาศ

และเชื้อเพลิง ความร้อนสัมผัสของอากาศและเชื้อเพลิงจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นการคำนวณความร้อนเข้าจะง่ายขึ้น

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงประกอบด้วย ค่าความร้อนสูง (Higher calorific value) กับค่าความร้อนต่ำ (Lower calorific value) ซึ่งการเลือกใช้อย่างหนึ่งอย่างใดนั้น มีทั้งข้อดีและข้อเสีย แต่ตามปกติเนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซที่ระบายออกจะสูงกว่า 100°C ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องคิดความร้อนแฝงของการควบแน่นไอน้ำในก๊าซที่ระบายออก (ใช้ค่าความร้อนต่ำเป็นค่าความร้อนของเชื้อเพลิง)

3.4.4 วิธีคำนวณความร้อนเข้า

1) ความร้อนของเชื้อเพลิง (\dot{Q}_f)

ความร้อนของเชื้อเพลิงเป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากการสันดาปก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งคำนวณจาก

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f \times \text{LHV} \quad (3.18)$$

เมื่อ

\dot{Q}_f คือ ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/hr)

\dot{m}_f คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (Nm^3/hr)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/Nm^3)

2) ปริมาณความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง (\dot{Q}_{sf})

ถ้าไม่มีการอุ่นเชื้อเพลิงด้วยความร้อนจากแหล่งภายนอก เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าโดยอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิภายนอก ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงจึงเป็นศูนย์ แต่ในกรณีที่มีการอุ่นเชื้อเพลิงสามารถคำนวณปริมาณความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{sf} = \dot{m}_f \times C_{pf} \times (T_f - T_{amb}) \quad (3.19)$$

เมื่อ

\dot{Q}_{sf} คือ ปริมาณความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง (MJ/hr)

\dot{m}_f คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (Nm^3/hr)

C_{pf} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง ($\text{kJ}/\text{Nm}^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

T_f คือ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ถูกอุ่น ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

3) ปริมาณความร้อนสัมผัสของอากาศ (\dot{Q}_{sa})

ถ้าไม่มีการอุ่นอากาศโดยแหล่งความร้อนภายนอก ความร้อนสัมผัสของอากาศสำหรับการสันดาปจะเป็นศูนย์ แต่ในกรณีที่มีการอุ่นอากาศโดยแหล่งความร้อนภายนอก ปริมาณความร้อนสัมผัสของอากาศสามารถคำนวณจาก

$$\dot{Q}_{sa} = \dot{m}_a \times C_{pa} \times (T_a - T_{amb}) \quad (3.20)$$

เมื่อ

\dot{Q}_{sa}	คือ	ปริมาณความร้อนสัมผัสของอากาศ (MJ/hr)
\dot{m}_a	คือ	ปริมาณอากาศ (Nm^3/hr)
C_{pa}	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่ถูกอุ่น ($\text{kJ}/\text{Nm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$)
T_a	คือ	อุณหภูมิอากาศที่ถูกอุ่น ($^\circ\text{C}$)
T_{amb}	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^\circ\text{C}$)

3.4.5 วิธีคำนวณความร้อนออก

1) ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัตถุ (\dot{Q}_m)

ขณะที่วัตถุรับความร้อนออกจากอุปกรณ์ ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัตถุมีปริมาณดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q}_m = \dot{m}_m \times C_{p,m} \times (T_{m,out} - T_{m,in}) + \dot{m}_m \times LH \quad (3.21)$$

เมื่อ

\dot{Q}_m	คือ	ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัตถุ (MJ/hr)
\dot{m}_m	คือ	ปริมาณของวัตถุรับความร้อน (kg/hr)
$C_{p,m}$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของวัตถุรับความร้อน ($\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$)
$T_{m,out}$	คือ	อุณหภูมิของวัตถุรับความร้อนออกจากระบบ ($^\circ\text{C}$)
$T_{m,in}$	คือ	อุณหภูมิของวัตถุรับความร้อนเข้าสู่ระบบ ($^\circ\text{C}$)
LH	คือ	ความร้อนแฝงของวัตถุรับความร้อน (kJ/kg)

2) ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย (\dot{Q}_{fluc})

การคำนวณความร้อนที่ถูกพาออกไปโดยก๊าซไอเสียอย่างถูกต้อง จะต้องแยกการคำนวณออกเป็นของก๊าซสันดาปแห้งและของไอน้ำในก๊าซเสีย แต่เนื่องจากตามปกติไอน้ำจากความชื้นในอากาศที่ใช้สันดาปและไอน้ำที่ปนเข้าไปในเตามีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงคำนวณความร้อนที่มีอยู่ในก๊าซเสียแห้งเพียงอย่างเดียว ดังสมการ

$$\dot{Q}_{\text{fluc}} = \dot{m}_f \times G \times C_{p,\text{fluc}} \times 4.187 \times (T_{\text{fluc}} - T_r) \quad (3.22)$$

เมื่อ

\dot{Q}_{fluc}	คือ	ปริมาณความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย (MJ/hr)
\dot{m}_f	คือ	ปริมาณเชื้อเพลิง (Nm ³ /hr)
G	คือ	ปริมาณก๊าซเสียจริง (Nm ³ /Nm ³)
$C_{p,\text{fluc}}$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย (kcal/Nm ³ K)
T_{fluc}	คือ	อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (°C)
T_r	คือ	อุณหภูมิอ้างอิง (°C)

3) ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น (\dot{Q}_w)

ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็นเป็นความร้อนที่เตาหรืออุปกรณ์ให้ความร้อนถ่ายเทสู่น้ำหล่อเย็นที่ทำการหล่อเย็นเตาหรืออุปกรณ์ให้ความร้อน ซึ่งหาจากสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w \times \rho_w \times C_{p,w} \times (T_{w,\text{out}} - T_{w,\text{in}}) \quad (3.23)$$

เมื่อ

\dot{Q}_w	คือ	ปริมาณความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น (MJ/hr)
\dot{m}_w	คือ	ปริมาณน้ำหล่อเย็น (m ³ /hr)
ρ_w	คือ	ความหนาแน่นของน้ำหล่อเย็น (kg/m ³)
$C_{p,w}$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น (kJ/kg °C)
$T_{w,\text{out}}$	คือ	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก (°C)
$T_{w,\text{in}}$	คือ	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า (°C)

4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา (\dot{Q}_{wall})

ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเป็นความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตาหรืออุปกรณ์ให้ความร้อนซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{wall} = \frac{1}{1,000} \left\{ \sum_i^N \left[2.2(T_{wall} - T_{amb})^{5/4} + 4.88 \times \varepsilon \times \left| \left(\frac{T_{wall} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{amb} + 273}{100} \right)^4 \right| \right] \times A_i \times 4.186 \right\} \quad (3.24)$$

เมื่อ

\dot{Q}_{wall}	คือ	ปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตา (MJ/hr)
T_{wall}	คือ	อุณหภูมิผนังเตา ($^{\circ}\text{C}$)
T_{amb}	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)
A_i	คือ	พื้นที่ผิวเตา (m^2)
ε	คือ	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของผิวเตา

5) ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (\dot{Q}_{co})

ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สามารถหาได้จาก

$$\dot{Q}_{co} = \dot{m}_f \times \rho_f \times G \times CO \times 13.76 \times \frac{1}{10^6} \quad (3.25)$$

เมื่อ

\dot{Q}_{co}	คือ	ปริมาณความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (MJ/hr)
\dot{m}_f	คือ	ปริมาณเชื้อเพลิง (Nm^3/hr)
ρ_f	คือ	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/Nm^3)
G	คือ	ปริมาณก๊าซเสียจริง (Nm^3/Nm^3)
CO	คือ	ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเสีย (ppm)

6) ปริมาณความร้อนสูญเสียอื่น ๆ (\dot{Q}_{un})

ปริมาณความร้อนสูญเสียอื่นๆที่ไม่สามารถวัดค่าได้ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{un} = (\dot{Q}_f + \dot{Q}_{sf} + \dot{Q}_{sa}) - (\dot{Q}_{sm} + \dot{Q}_{fluc} + \dot{Q}_w + \dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{co}) \quad (3.26)$$

3.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหลอม

ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์ให้ความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้ถ้าทำสมดุลความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีคำจำกัดความดังนี้

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน = อัตราส่วนของความร้อนยังผลต่อความร้อนที่ป้อน

$$\eta_{th, furnace} = \frac{\dot{Q}_{useful}}{\dot{Q}_{input}} \quad (3.27)$$

เมื่อ

$\eta_{th, furnace}$	คือ	ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอม
\dot{Q}_{useful}	คือ	ปริมาณความร้อนยังผล (MJ/hr)
\dot{Q}_{input}	คือ	ปริมาณความร้อนป้อนเข้า (MJ/hr)