

บทที่ 2

ทฤษฎีการเผาไหม้

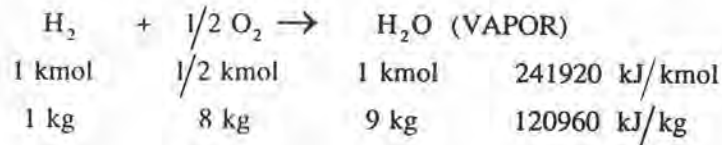
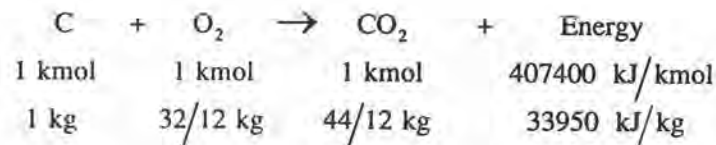
การศึกษาและออกแบบเตาเผาอุตสาหกรรมของเผาไหม้เดี่ยวในบพนี้ได้กล่าวถึง การเผาไหม้ การคำนวณการเผาไหม้ ปริมาณอากาศทางทฤษฎี ปริมาณอากาศที่ใช้จริง การวิเคราะห์แก๊สไอเสียเชิงทฤษฎี การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง ตัวประกอบในการเผาไหม้ที่มีผลต่อการสูญเสียความร้อน สาเหตุการเกิดการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ เอนทัลปีของการรวมตัว ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง การคำนวณหาค่าความร้อนจากการเผาไหม้ อุณหภูมิของการเผาไหม้ และปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังเตาเผาอุตสาหกรรมและผนังปลอกไอเสีย ตามลำดับ

การเผาไหม้

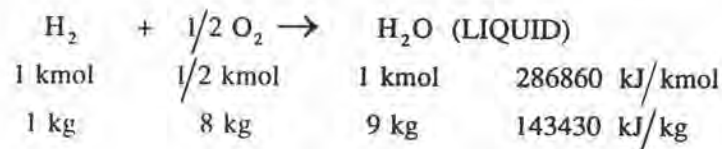
การเผาไหม้ หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารที่เผาไหม้ได้ (combustion component) ของเชื้อเพลิงชนิดนั้น ๆ ในที่นี้สารเผาไหม้ที่เป็นตัวหลักในเชื้อเพลิง คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ค่าความร้อนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ในทางตรงกันข้ามกลับเพิ่มปัญหาในการกัดกร่อนชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ รวมทั้งยังทำให้เกิดปัญหาด้านมลพิษทางอากาศ

สำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (complete combustion) คือ การเผาไหม้ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วสามารถให้ปริมาณความร้อนเท่ากับค่าความร้อน (heating value) ของเชื้อเพลิงนั้น หลังจากการเผาไหม้ผลที่ได้จะอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ สำหรับเชื้อเพลิงที่มีสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจน ก็จะได้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน หรือไนโตรเจนออกไซด์

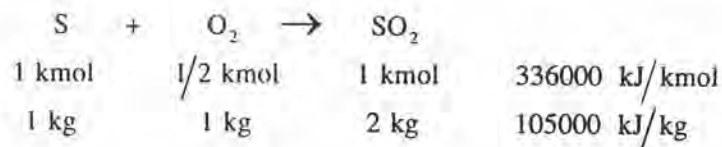
การคำนวณเกี่ยวกับกระบวนการการเผาไหม้ต่อไปนี้เป็น การคำนวณเชิงทฤษฎี [4] โดยถือว่าการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งหมายถึงค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าเท่ากับค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และธาตุไนโตรเจนจะไม่เกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่น โดยกระบวนการการเผาไหม้นี้ กระบวนการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการต่อไปนี้



ไฮโดรเจนเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วได้อิอน้ำและจะให้ค่าความร้อนประมาณ 120960 kJ/kg



ไฮโดรเจนเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วได้น้ำและจะให้ค่าความร้อนประมาณ 143430 kJ/kg
เนื่องจากเมื่ออิอน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำจะคายความร้อนออกมาอีก



การคำนวณการเผาไหม้

หมายถึง การคำนวณเชิงปริมาณก่อนและหลังการเผาไหม้ตามสมการการสมดุลทางเคมี จากองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ เช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ที่มีอยู่ในมูลฝอยหรือในเชื้อเพลิง เพื่อที่จะหาปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้ และการวิเคราะห์แก๊สไอเสีย โดยคำนวณจากหลักการการเผาไหม้สมบูรณ์ซึ่งอาศัยอากาศที่ประกอบด้วย ออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจน โดยปริมาตร และโดยมวล

องค์ประกอบ	% ขององค์ประกอบ	
	โดยปริมาตร	โดยมวล
ออกซิเจน (O ₂)	21	23
ไนโตรเจน (N ₂)	79	77
O ₂ /N ₂	1 : 3.76	1 : 3.35

ปริมาณอากาศทางทฤษฎี (theoretical air) [5]

หมายถึงมวลของอากาศจำนวนน้อยที่สุดที่ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ คำนวณได้จากสมการ

$$m_{t_a} = \frac{1}{0.232} \left[\frac{1}{12} (32 m_c) + \frac{1}{2} \frac{32}{2} \left(m_H - \frac{m_O}{8} \right) + \frac{1}{32} (32 m_s) \right]$$

หรือ

$$m_{t_a} = 11.49 m_c + 34.5 \left(m_H - \frac{m_O}{8} \right) + 4.3 m_s$$

เมื่อ

m_{t_a} แทน มวลของอากาศทางทฤษฎีที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ,
kg_{อากาศ}/kg_{เชื้อเพลิง}

สมการข้างต้นคำนวณหามวลของอากาศในหน่วยน้ำหนัก โดยเทียบจากมวลของ O₂ ที่ธาตุต่าง ๆ จะต้องใช้เพื่อให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากในอากาศมีอัตราส่วนของ O₂ เท่ากับ 0.232 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงต้องคูณด้วยเทอม (1/0.232) เทอม (1/12)(32m_c) เป็นมวลของออกซิเจนที่ธาตุคาร์บอนต้องการทางทฤษฎี ส่วนเทอม (1/12)(32/2)(m_H-m_O/8) เป็นมวลของ O₂ ที่ธาตุไฮโดรเจนต้องการทางทฤษฎี โดยหักมวลของออกซิเจนที่มีอยู่ในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงออก (ในเทอมของไฮโดรเจน) และเทอม (1/32)(32m_s) เป็นมวลของ O₂ ที่ธาตุกำมะถันต้องการทางทฤษฎี เมื่อต้องการคำนวณหาปริมาณอากาศทางทฤษฎีในหน่วยปริมาตรของอากาศก็จะได้สมการเป็น

$$V_{i_a} = \frac{1}{0.21} \left[\frac{1}{12} (22.4 m_c) + \frac{1}{2} \frac{22.4}{2} \left(m_H - \frac{m_o}{8} \right) + \frac{1}{32} (22.4 m_s) \right]$$

หรือ

$$V_{i_a} = 8.89 m_c + 26.7 \left(m_H - \frac{m_o}{8} \right) + 3.33 m_s$$

เมื่อ

V_{i_a} แทน ปริมาตรของอากาศทางทฤษฎีที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์
 $m^3_{\text{อากาศ/kgเชื้อเพลิง}}$ ที่อุณหภูมิ 0°C ความดันบรรยากาศ

สมการข้างต้นเป็นการคิดเทียบจากปริมาตรของ O_2 ที่ธาตุต่าง ๆ ต้องใช้ในการเผาไหม้ทางทฤษฎี เนื่องจากในอากาศมีอัตราส่วนของ O_2 เท่ากับ 0.21 โดยปริมาตร ดังนั้นจึงต้องคูณด้วยเทอม $(1/0.21)$ เทอม $(1/12)(22.4m_c)$ เป็นปริมาตรของ O_2 ที่ธาตุคาร์บอนต้องการทางทฤษฎี เทอม $(1/12)(22.4/2)(m_H - m_o/8)$ เป็นปริมาตรของ O_2 ที่ธาตุไฮโดรเจนต้องการทางทฤษฎีโดยหักปริมาตรของออกซิเจนในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงออก (ในเทอมของออกซิเจน) และเทอม $(1/32)(22.4m_s)$ เป็นปริมาตรของ O_2 ที่ธาตุกำมะถันต้องการทางทฤษฎีในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

ปริมาณอากาศที่ใช้จริง

ความจริงแล้วในทางปฏิบัติการที่จะผสมอากาศกับมวลฟอยภายในเตา เพื่อที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์เป็นไปได้ยากซึ่งอาจเป็นผลมาจาก

1. เนื่องจากการผสมระหว่างอากาศกับมวลฟอยหรือเชื้อเพลิงไม่ทั่วถึง เช่น บริเวณใกล้กับผนังของเตาเผาและกรณีมวลฟอยซ้อนทับกันแน่นเกินไป
2. คุณสมบัติของมวลฟอยจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของมวลฟอยที่ทำการเผา จึงทำให้ความต้องการปริมาณอากาศเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ
3. เนื่องจากอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะมีความชื้นเป็นองค์ประกอบด้วย จึงทำให้ความต้องการปริมาณอากาศมากกว่าทางทฤษฎี

ดังนั้น โดยทั่วไปแล้วจะต้องการปริมาณอากาศเข้าเตาเผามากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี ซึ่งเรียกว่า ปริมาณอากาศส่วนเกิน (excess air) และคำนวณได้จากสมการ

$$\%EA = \left(\frac{m_{a,a} - m_{t,a}}{m_{t,a}} \right) \times 100 \quad (\text{ฐานมวล})$$

$$\%EA = \left(\frac{V_{a,a} - V_{t,a}}{V_{t,a}} \right) \times 100 \quad (\text{ฐานปริมาตร})$$

เมื่อ

%EA แทน เปอร์เซนต์ของอากาศส่วนเกิน

$m_{a,a}$ แทน มวลอากาศที่แท้จริง , $kg_{\text{อากาศ}}/kg_{\text{มูลฝอย}}$

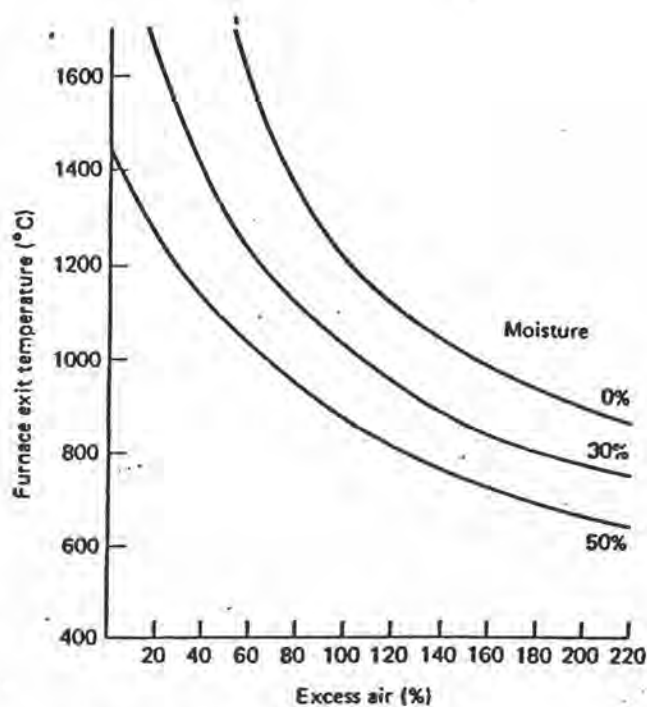
$m_{t,a}$ แทน มวลอากาศทางทฤษฎี , $kg_{\text{อากาศ}}/kg_{\text{มูลฝอย}}$

$V_{a,a}$ แทน ปริมาตรอากาศที่แท้จริง , $m^3_{\text{อากาศ}}/kg_{\text{มูลฝอย}}$

$V_{t,a}$ แทน ปริมาตรอากาศทางทฤษฎี , $m^3_{\text{อากาศ}}/kg_{\text{มูลฝอย}}$

การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้มากกว่าที่ต้องการตามทฤษฎี เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์นั้น อาจช่วยเพิ่มการสูญเสียความร้อนไปกับแก๊สต่าง ๆ และอาจทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ลดลง ซึ่งมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังพื้นผิวรับความร้อน นอกจากนี้ ปริมาณอากาศส่วนเกินจะก่อให้เกิด NO_x ซึ่งเป็นมลภาวะที่สำคัญตัวหนึ่ง และหากเชื้อเพลิงประกอบด้วยกำมะถันก็จะเกิดเป็น SO_2 แล้วในที่สุดก็กลายเป็น H_2SO_4 ซึ่งจะกัดกร่อนพื้นผิวของอุปกรณ์ในระบบ ดังนั้นจึงควรลดปริมาณอากาศส่วนเกินให้เหลือน้อยที่สุด โดยที่ยังเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้

สำหรับเตาเผามูลฝอยชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว ทำการป้อนมูลฝอยโดยใช้แรงงานคน [6] หรือเรียกว่า batch-operated จะใช้อากาศส่วนเกินประมาณ 100% ถึง 200% ถ้าอากาศส่วนเกินน้อยเกินไปก็อาจเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามถ้าอากาศส่วนเกินมากเกินไปจะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ แต่อากาศส่วนเกินก็จะถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วย เป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนออกจากเตาเผามูลฝอย ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สไอเสีย เพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแก๊สไอเสียกับ %EA และความชื้นของมูลฝอย [6]

การวิเคราะห์แก๊สไอเสียเชิงทฤษฎี [5]

แก๊สไอเสีย หมายถึงแก๊สอุณหภูมิสูงที่ได้จากการเผาไหม้ กรณีการเผาไหม้สมบูรณ์ก็จะได้แก๊สต่าง ๆ หลายชนิด เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ถ้าการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ก็อาจจะเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือถ้าการเผาไหม้เป็นแบบอากาศส่วนเกินก็จะมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบของไอเสียด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของมูลฝอยที่ทำการเผา

การเผาไหม้โดยใช้ปริมาณอากาศทางทฤษฎีนั้น จะเกิดแก๊สไอเสียซึ่งประกอบด้วย CO_2 , H_2O (vapor) และ N_2 แต่ถ้าเชื้อเพลิงมีธาตุกำมะถันอยู่ด้วยก็จะมี SO_2 รวมอยู่ในแก๊สไอเสียด้วย ถ้าให้ $m_{i,g}$ เป็นมวลของแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้โดยมวลของอากาศทางทฤษฎีแล้ว สามารถคำนวณหา $m_{i,g}$ ได้ตามสมการ

$$m_{i,g} = (1 - 0.232) m_{i,a} + \left(\frac{44}{12}\right) m_C + \left(\frac{18}{2}\right) m_H + \left(\frac{64}{32}\right) m_S + m_W + m_N$$

หรือ

$$m_{i,g} = (1 - 0.232) m_{i,a} + 3.67 m_C + 9 m_H + 2 m_S + m_W + m_N$$

เมื่อ m_{i_g} มีหน่วยเป็น $\text{kg}_{\text{แก๊สไอเสีย}}/\text{kg}_{\text{เชื้อเพลิง}}$ สมการนี้ใช้คำนวณหามวลของแก๊สไอเสียทางทฤษฎีในหน่วยน้ำหนักของอากาศ เมื่อเทอม $(1 - 0.232)m_{i_a}$ เป็นมวลของ N_2 ในอากาศที่แยกเอา O_2 ไปใช้ในปฏิกิริยาเผาไหม้ เทอม $(44/12)m_C$ เป็นมวลของ CO_2 เทอม $(18/2)m_H$ เป็นมวลของ H_2O ซึ่งเกิดจากธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง เทอม $(64/32)m_S$ เป็นมวลของ SO_2 ส่วน m_W เป็นมวลของความชื้นในเชื้อเพลิง และเทอม m_N เป็นมวลของธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่ออกมาพร้อมกับแก๊สไอเสียในรูปของ N_2 เมื่อคำนวณหาปริมาตรของแก๊สไอเสียอันเกิดจากการเผาไหม้โดยปริมาตรอากาศทางทฤษฎีในหน่วยของปริมาตรอากาศสมการก็จะกลายเป็น

$$V_{i_g} = (1 - 0.21) V_{i_a} + \left(\frac{22.4}{12}\right) m_C + \left(\frac{22.4}{2}\right) m_H + \left(\frac{22.4}{32}\right) m_S + \left(\frac{22.4}{18}\right) m_W + \left(\frac{22.4}{28}\right) m_N$$

หรือ

$$V_{i_g} = (1 - 0.21) V_{i_a} + 1.867 m_C + 11.2 m_H + 0.7 m_S + 1.244 m_W + 0.8 m_N$$

เมื่อ

$$V_{i_g} \text{ แทน ปริมาตรของแก๊สไอเสียทางทฤษฎีที่เกิดจากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์, } \\ m_{\text{แก๊สไอเสีย}}/\text{kg}_{\text{เชื้อเพลิง}} \text{ ที่อุณหภูมิ } 0^\circ\text{C} \text{ ความดันบรรยากาศ}$$

เมื่อ m_N เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิง 1 kg เทอม $(1 - 0.21) V_{i_a}$ เป็นปริมาตรของ N_2 ในอากาศที่แยกเอา O_2 ไปใช้ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ เทอม $(22.4/12)m_C$ เป็นปริมาตรของ CO_2 เทอม $(22.4/2)m_H$ เป็นปริมาตรของ H_2O ซึ่งเกิดจากธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง เทอม $(22.4/32)m_S$ เป็นปริมาตรของ SO_2 เทอม $(22.4/18)m_W$ เป็นปริมาตรของไอน้ำในแก๊สไอเสีย และเทอม $(22.4/28)m_N$ เป็นปริมาณของ N_2 ซึ่งเกิดจากธาตุไนโตรเจนในองค์ประกอบของเชื้อเพลิง แต่เนื่องจากการวิเคราะห์แก๊สไอเสียโดยทั่วไป มักจะกระทำกันในลักษณะที่เป็นแก๊สไอเสียแห้ง โดยสกัดเอาความชื้นหรือไอน้ำที่ปนมาในแก๊สไอเสียออกก่อน ดังนั้นแก๊สไอเสียแห้งอันเกิดจากการเผาไหม้ด้วยปริมาณอากาศทางทฤษฎีแล้ว สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$m_{i_g} = (1 - 0.232) m_{i_a} + \left(\frac{44}{12}\right) m_C + \left(\frac{64}{32}\right) m_S + m_N$$

$$m_{i_g} = (1 - 0.232) m_{i_a} + 3.67 m_C + 2 m_S + m_N$$

หรือ

$$V_{i_g} = (1 - 0.21) V_{i_a} + \left(\frac{22.4}{12}\right) m_C + \left(\frac{22.4}{32}\right) m_S + \left(\frac{22.4}{28}\right) m_N$$

$$V_{i_g} = (1 - 0.21) V_{i_a} + 1.867 m_C + 0.7 m_S + 0.8 m_N$$

ด้วยเหตุที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงเราต้องการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน ดังนั้นแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นจึงประกอบด้วย CO_2 , H_2O (vapor), N_2 และ O_2 ซึ่งถ้าเชื้อเพลิงมีธาตุกำมะถันอยู่ด้วยก็จะมี SO_2 อยู่ในแก๊สไอเสียด้วย เมื่อให้ m_{a_g} เป็นมวลของแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน

$$m_{a_g} = (m_m - 1) m_{i_a} + (1 - 0.232) m_{i_a} + \left(\frac{44}{12}\right) m_C + \left(\frac{18}{2}\right) m_H + \left(\frac{64}{32}\right) m_S + m_W + m_N$$

หรือ

$$m_{a_g} = (m_m - 0.232) m_{i_a} + 3.67 m_C + 9 m_H + 2 m_S + m_W + m_N$$

สมการนี้มีหน่วยเป็น $\text{kgแก๊สไอเสีย/kgเชื้อเพลิง}$ เมื่อ m_m แทนอัตราส่วนของอากาศ ($m_m = m_{a_a} / m_{i_a}$) เมื่อเทอม $0.232(m - 1) m_{i_a}$ เป็นมวลของ O_2 ซึ่งเป็นส่วนเกินที่ออกมากับแก๊สไอเสีย เทอม $(1 - 0.232) m_{i_a}$ เป็นมวลของ N_2 ในอากาศ เทอม $(44/12)m_C$ เป็นมวลของ CO_2 เทอม $(18/2)m_H$ เป็นมวลของ H_2O ที่เกิดจากธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง เทอม $(64/32)m_S$ เป็นมวลของ SO_2 โดยมี m_W เป็นมวลของความชื้น และ m_N เป็นมวลของ N_2 อันเกิดจากธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิง และเมื่อคำนวณหาแก๊สไอเสียจากการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในหน่วยของปริมาตรสมการก็จะกลายเป็น

$$V_{a_g} = (m_v - 1) V_{i_a} + (1 - 0.21) m_v V_{i_a} + \left(\frac{22.4}{12}\right) m_C + \left(\frac{22.4}{2}\right) m_H + \left(\frac{22.4}{32}\right) m_S + \dots$$

$$\dots + \left(\frac{22.4}{18}\right) m_W + \left(\frac{22.4}{28}\right) m_N$$

หรือ

$$V_{a_g} = (m_v - 0.21) V_{i_a} + 1.867 m_C + 11.2 m_H + 0.7 m_S + 1.244 m_W + 0.8 m_N$$

สมการนี้มีหน่วยเป็น $m^3_{\text{แก๊สไอเสีย}}/kg_{\text{เชื้อเพลิง}}$ ที่อุณหภูมิ $0^\circ C$ ความดันบรรยากาศ เมื่อ m_v แทนอัตราส่วนของอากาศ ($m_v = V_{a_a}/V_{i_a}$) เมื่อเทอม $0.21(m_v - 1)V_{i_a}$ เป็นปริมาตรของ O_2 ส่วนเกินที่ออกมาเท่ากับแก๊สไอเสีย เทอม $(1 - 0.21)m_v V_{i_a}$ เป็นปริมาตรของ N_2 ในอากาศ เทอม $(22.4/12)m_C$ เป็นปริมาตรของ CO_2 เทอม $(22.4/2)m_{H_2}$ เป็นปริมาตรของ H_2O อันเกิดจากราคูไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง เทอม $(22.4/32)m_S$ เป็นปริมาตรของ SO_2 เทอม $(22.4/18)m_W$ เป็นปริมาตรของไอน้ำในแก๊สไอเสีย และเทอม $(22.4/28)m_N$ เป็นปริมาตรของ N_2 ในแก๊สไอเสียซึ่งเกิดจากราคูไนโตรเจนในเชื้อเพลิง ถ้าให้ m_{a_g} เป็นมวลของแก๊สไอเสียแห้งอันเกิดจากการสกัดความชื้นหรือไอน้ำออกจากแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้อากาศส่วนเกินแล้ว สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$m_{a_g} = (m_m - 1)m_{i_a} + (1 - 0.232)m_m m_{i_a} + \left(\frac{44}{12}\right)m_C + \left(\frac{64}{32}\right)m_S + m_N$$

หรือ
$$m_{a_g} = (m_m - 0.232)m_{i_a} + 3.67m_C + 2m_S + m_N$$

อนึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง m_{a_g} และ m_{i_g} หาได้โดยค่านึงว่าหลังจากทำการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้วยังคงมีปริมาณอากาศส่วนเกินปนอยู่ในแก๊สไอเสียในสภาพนั้น คือสมการ

$$m_{a_g} = m_{i_g} + (m_m - 1)m_{i_a} \quad (\text{ฐานมวล})$$

$$V_{a_g} = V_{i_g} + (m_v - 1)V_{i_a} \quad (\text{ฐานปริมาตร})$$

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง [7]

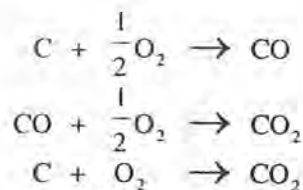
กระบวนการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

1. เริ่มด้วยออกซิเจนจะสัมผัสกับผิวของคาร์บอน
2. เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา
3. มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาที่ผิว
4. มีการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแก๊สออกซิเจน แล้วทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และจากสาเหตุดังกล่าวนี้ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะถูกร่งได้โดยการบด

เชื้อเพลิงแข็งให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการทำให้ volatile matters ระเหยออกมาได้เร็วและช่วยให้เกิดการผสมกับอากาศดีขึ้น

เชื้อเพลิงแข็งจะเกิดการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับแก๊สออกซิเจนจำกัด ก็จะเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อย ๆ จากปัญหานี้จะเห็นว่า การออกแบบระบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งควรให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการทำปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการบดเชื้อเพลิงแข็งให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น

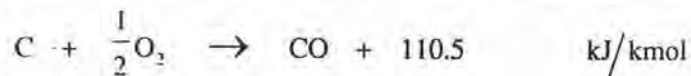
เชื้อเพลิงแข็งมีสารประกอบที่เกิดการเผาไหม้แบ่งออกได้เป็นสองชนิด คือ ชนิดที่เป็นสารระเหย (volatile matter) เช่น น้ำ ไฮโดรคาร์บอน และชนิดที่ไม่เป็นสารระเหย เช่น คาร์บอน polymeric สำหรับสารประกอบที่ไม่เกิดการเผาไหม้ ได้แก่ ความชื้น และสารประกอบอนินทรีย์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวและแก๊ส เมื่ออากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงแล้วเกิดกระบวนการการเผาไหม้ ออกซิเจนจะเข้าไปสัมผัสกับผิวของคาร์บอนตามขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



หลังจากที่เกิดปฏิกิริยาจะให้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก มีสองสถานะคือ แก๊ส และของแข็ง สำหรับแก๊สประกอบด้วย CO CO₂ H₂ O₂ H₂O และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกเล็กน้อยที่ปล่อยออกมารอบ ๆ อนุภาคของเชื้อเพลิง เมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิว (surface flux of volatile) ของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สดังกล่าว เกิดการเผาไหม้แบบผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันของแก๊สแต่ละชนิด ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมาก จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊ส เป็นผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดน้อย ฉะนั้นจึงต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงเกิดปฏิกิริยา ในส่วนที่เป็นของแข็งจำพวกถ่าน จะไม่เกิดปฏิกิริยาและอุณหภูมิยังไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หลังจากแก๊สต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยา จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนให้แก่คาร์บอนจนมีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยา

ตัวประกอบในการเผาไหม้ที่มีผลต่อการสูญเสียความร้อน

1. การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้คาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จนหมด แต่เนื่องจากการเผาไหม้ในความเป็นจริงไม่ได้เป็นเช่นนั้น คาร์บอนบางส่วนรวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งให้ค่าความร้อนต่ำกว่าตามสมการ



ดังนั้นหากการเผาไหม้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มาก ทำให้ได้รับค่าความร้อนจากการเผาไหม้ต่ำกว่าที่ควรจะได้รับ

2. การสูญเสียความร้อนไปกับแก๊สไอเสีย การเผาไหม้จำเป็นต้องนำอากาศจากภายนอกเข้ามาใช้และปล่อยแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ทิ้งไป โดยทั่ว ๆ ไปแล้วอุณหภูมิของแก๊สไอเสียจะสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศที่นำเข้ามามาก ความแตกต่างของอุณหภูมิดังกล่าวนี้คือ ความร้อนที่สูญเสียไปกับแก๊สไอเสีย

3. การสูญเสียความร้อนเนื่องจากความชื้นของเชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงแข็งมักจะมีความชื้นปะปนอยู่ในปริมาณสูงพอสมควร เมื่อมีการเผาไหม้ความชื้นเหล่านี้จะดูดความร้อนเพื่อทำให้กลายเป็นไอออกไปกับแก๊สไอเสีย นอกจากนี้ยังมีไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่างไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศกลายเป็นไอน้ำระเหยออกไปด้วย ดังนั้นจึงสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้เนื่องจากความชื้นเหล่านี้

4. การสูญเสียความร้อนเนื่องจากเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด การเผาไหม้โดยเฉพาะเชื้อเพลิงแข็งมักจะเผาไหม้ไม่หมดเหลือเป็นขี้เถ้า และบางครั้งจะเหลือส่วนที่เป็นคาร์บอนอยู่ด้วย การที่เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมดทำให้ได้รับปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น จึงถือว่าเป็นการสูญเสียความร้อนอีกประการหนึ่ง

สาเหตุการเกิดการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์

ในภาวะอากาศพอดี แต่การเผาไหม้สมบูรณ์เป็นไปได้ยาก ในทางปฏิบัติทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจาก

1. เนื่องมาจากการผสมกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ไม่ทั่วถึง ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์เกิดขึ้นได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณใกล้กับผนังของห้องเผาไหม้
2. ภาวะความร้อนเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ จึงทำให้ปริมาณความต้องการอากาศและเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การควบคุมให้การเผาไหม้เกิดอย่างสมบูรณ์นั้นจึงทำได้ยาก
3. เนื่องจากอากาศที่ใช้เผาไหม้จริงในทางปฏิบัตินั้นมีความชื้นเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ส่วนอากาศที่ชื้นเพื่อให้การเผาไหม้เกิดอย่างสมบูรณ์นั้นจะมีปริมาณมากกว่ากรณีของการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทางทฤษฎีโดยใช้อากาศแห้ง
4. เวลาในการเผาไหม้ไม่นานเพียงพอจึงมีเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดติดไปกับอากาศส่วนที่เหลือ (ในกรณีที่ใช้ภาวะของอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้)

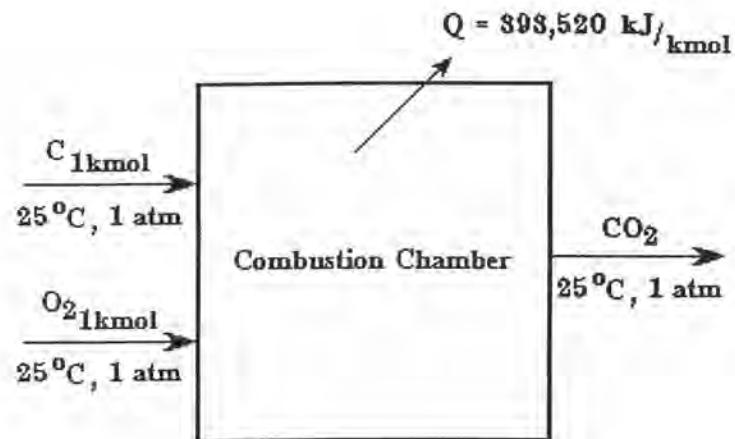
เอนทัลปีของการรวมตัว (enthalpy of formation) [8]

หมายถึง พลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา (released) หรือดูดซับ (absorbed) ต่อระบบ เมื่อธาตุถูกรวมตัวเป็นสารประกอบที่สภาวะมาตรฐานอ้างอิง คือ ที่ 25°C และที่ความดัน 1 บรรยากาศ

ในกระบวนการไหลอย่างสม่ำเสมอ (steady flow process) และไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกมากระทำ จากกฎการอนุรักษ์พลังงานนั้น พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทในกระบวนการจะต้องเท่ากับค่าความแตกต่างระหว่างเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์ (enthalpy of products, H_p) กับเอนทัลปีของสารปฏิกิริยา (enthalpy of reactants, H_R) นั่นคือ

$$Q = H_p - H_R$$

พิจารณาการรวมตัวของ CO_2 จากธาตุ C และ O_2 ในกระบวนการเผาไหม้แบบการไหลอย่างสม่ำเสมอ (a steady flow combustion process)



รูปที่ 2.2 แสดงเอนทาลปีของการรวมตัวภายในห้องเผาไหม้

จากสมการ Q จะได้ว่า

$$Q = H_p - H_R = -393,520 \text{ kJ/kmol}$$

เมื่อสารปฏิกิริยาเป็นธาตุเสถียร (stable element) เช่น O_2 , N_2 , H และ C มีค่าเอนทาลปีเป็นศูนย์ที่สภาวะมาตรฐานอ้างอิง ทำให้ $H_R = 0$ ดังนั้น

$$Q = H_p - 0 = -393,520 \text{ kJ/kmol}$$

และเรียกค่าเอนทาลปีของ CO_2 ที่ $25^\circ C$ 1 atm ว่า ค่าเอนทาลปีของการรวมตัว (enthalpy of formation, \bar{h}°_{f,CO_2}) นั่นคือ

$$\bar{h}^\circ_{f,CO_2} = -393,520 \text{ kJ/kmol}$$

จากที่กล่าวมาทั้งสารปฏิกิริยา (reactants) และผลิตภัณฑ์ (products) อยู่ที่สภาวะเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีในกระบวนการเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบทางเคมีในระบบ ซึ่งคุณสมบัตินี้เรียกว่า enthalpy of reaction สำหรับในกระบวนการการเผาไหม้ เรียกว่า enthalpy of combustion, h_c ซึ่งจะแทนจำนวนของพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาใน

กระบวนการการเผาไหม้แบบการไหลแบบสม่ำเสมอ เมื่อ 1 kmol (หรือ 1 kg) ของเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ คือ

$$h_c = H_P - H_R$$

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (heating value of fuel)

หมายถึง พลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกเมื่อเชื้อเพลิงได้รับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในกระบวนการการไหลอย่างสม่ำเสมอ และผลิตภัณฑ์กลับสู่สถานะของสารปฏิกิริยา ในทำนองเดียวกันค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะเท่ากับค่าสมมูลของเอนทาลปีของการเผาไหม้เชื้อเพลิง นั่นคือ

$$\text{HHV} = |h_c| \quad , \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{เชื้อเพลิง}}}$$

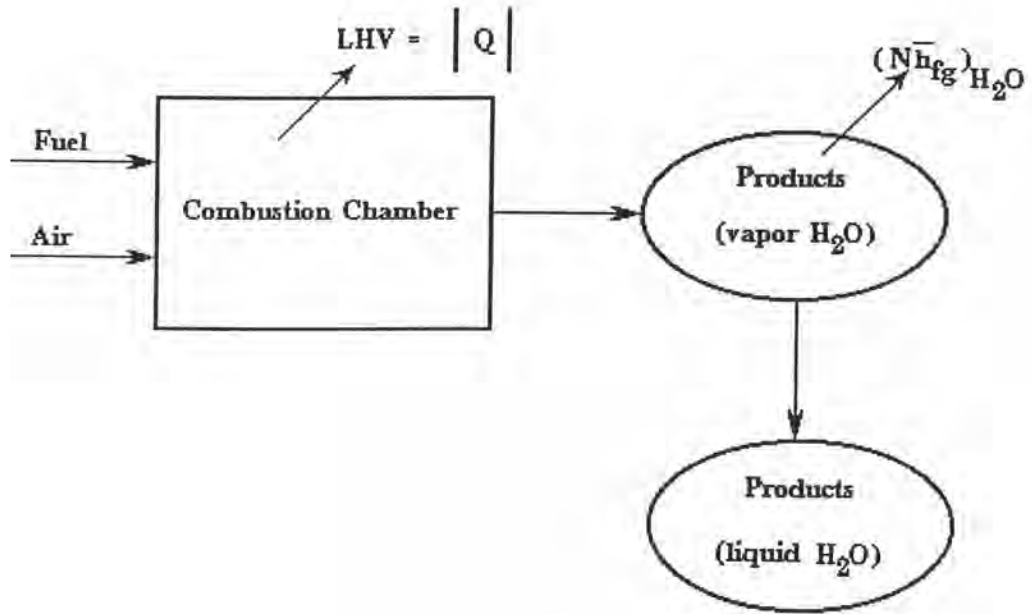
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขึ้นกับสถานะของน้ำในผลิตภัณฑ์ ค่าความร้อนที่เรียกว่า ค่าความร้อนสูง (higher heating value , HHV) คือ สถานะของน้ำภายในผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะของเหลว (liquid) หรือถ้าสถานะของน้ำในผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะของไอ (vapor) จะเรียกว่า ค่าความร้อนต่ำ (lower heating value , LHV) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{HHV} = \text{LHV} + \left(N \bar{h}_{\text{fg}, 25^\circ\text{C}} \right)_{\text{H}_2\text{O}} \quad , \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{เชื้อเพลิง}}}$$

เมื่อ

N แทน จำนวนโมเลกุลของน้ำภายในผลิตภัณฑ์

$\bar{h}_{\text{fg}, 25^\circ\text{C}}$ แทน ค่าเอนทาลปีของการกลายเป็นไอของน้ำที่ 25°C , kJ/kg_{เชื้อเพลิง}



รูปที่ 2.3 แสดงค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์

ในทางปฏิบัติสามารถทดสอบหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลวได้จากการทดสอบโดยอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่า bomb calorimeter ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สสามารถหาได้จากการทดสอบในอุปกรณ์ที่เรียกว่า gas calorimeter

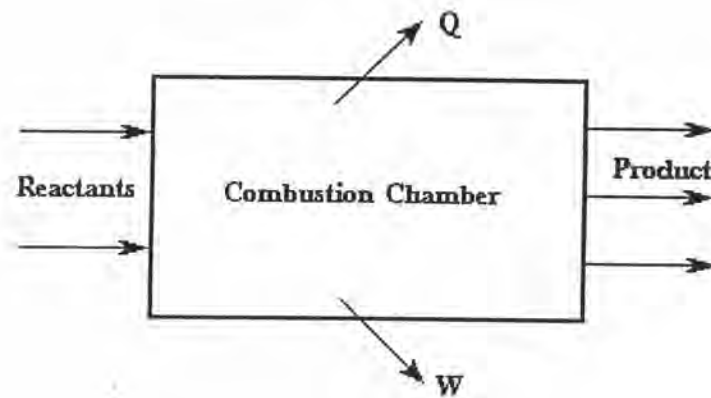
การคำนวณหาค่าความร้อนจากการเผาไหม้

พิจารณาการประยุกต์กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อนำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้จำเป็นต้องรู้ค่าการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในหรือการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีเมื่อองค์ประกอบทางเคมีของระบบเปลี่ยนแปลงไป

กระบวนการไหลอย่างสม่ำเสมอ (steady flow process)

เมื่อไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ จะได้ว่า

$$Q - W = H_P - H_R \quad , \text{ kJ}$$



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการการเผาไหม้แบบการไหลอย่างสม่ำเสมอ

เราสามารถเขียน H_p และ H_R ให้อยู่ในรูปของเอนทาลปี และจำนวนโมล (mole number) ขององค์ประกอบได้ดังนี้

$$H_p = \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p \quad , \text{ kJ}$$

$$H_R = \sum N_R (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R \quad , \text{ kJ}$$

เมื่อ

N_p แทน จำนวนโมลของผลิตภัณฑ์ , kJ

N_R แทน จำนวนโมลของสารปฏิกิริยา , kJ

โดยที่เครื่องหมาย “ ” แทนคุณสมบัติที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐาน (standard reference state) คือที่ 25°C และความดัน 1 บรรยากาศ แทน H_p และ H_R ในกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้ว่า

$$Q - W = \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p - \sum N_R (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R \quad , \text{ kJ}$$

เมื่อ

\bar{h}_f° แทน เอนทาลปีของการรวมตัวของสารที่ 25°C , 1 atm

$\bar{h} - \bar{h}^\circ$ แทน เอนทาลปีเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงที่ 25°C , 1 atm

สำหรับเอนทาลปีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงหาได้จาก

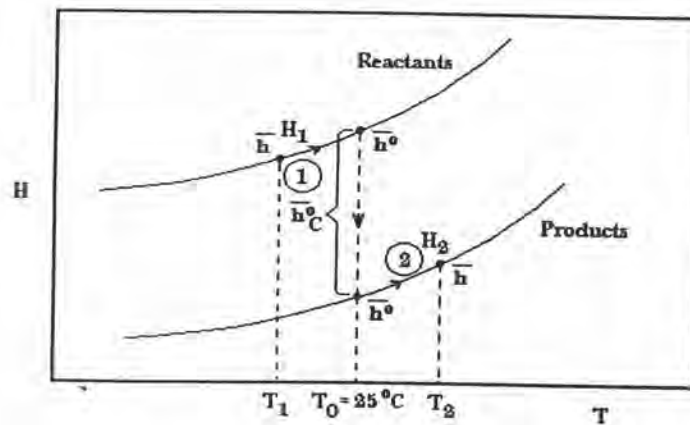
$$Q - W = N_F \bar{h}_C \sum N_P (\bar{h} - \bar{h}^0)_P - \sum N_R (\bar{h} - \bar{h}^0)_R \quad , \text{ kJ}$$

เมื่อ

N_F แทน จำนวนโมลของเชื้อเพลิง

ถ้าไม่มีงานจากภายนอกมากกระทำกับระบบจะได้ว่า

$$Q = N_F \bar{h}_C \sum N_P (\bar{h} - \bar{h}^0)_P - \sum N_R (\bar{h} - \bar{h}^0)_R \quad , \text{ kJ}$$



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง H และ T

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่า จากสภาวะ 1 ไปสภาวะ 2 เป็นกระบวนการการไหลอย่างสม่ำเสมอ โดยไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์ พลังงานจลน์ และงานจากภายนอก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีสามารถหาได้จากการหาค่าความแตกต่างของเอนทาลปีระหว่างสภาวะ 1 และสภาวะ 2 ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$Q = H_2 - H_1 = \sum N_P (\bar{h} - \bar{h}^0)_P + N_F \bar{h}_C - \sum N_R (\bar{h} - \bar{h}^0)_R$$

เมื่อ $T_2 = T_0$ และ $T_1 = T_0$ จะได้

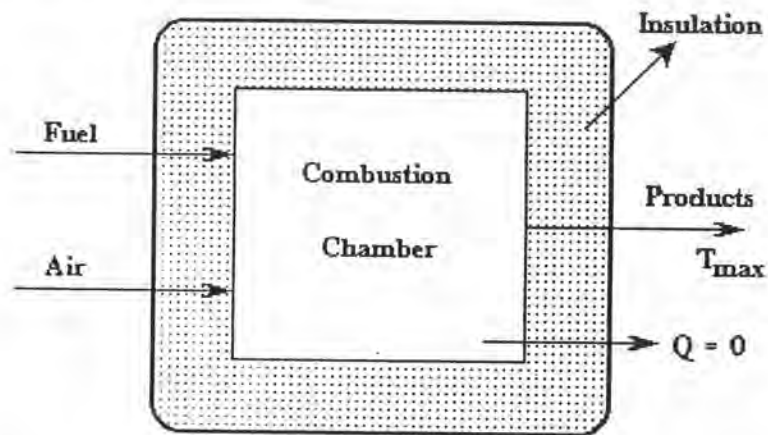
$$Q = H_2 - H_1 = N_F \bar{h}_C$$

อุณหภูมิของการเผาไหม้ (combustion temperature)

ความร้อนจากการเผาไหม้จะถูกเก็บไว้ในผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ในรูปของแก๊ส จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเอนทาลปีของแก๊สเหล่านั้น ทำให้อุณหภูมิสูงและมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สไปยังพื้นที่ที่รับการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีหรือโดยการพาความร้อน จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้กล่าวมาแล้ว เราสามารถคำนวณหาความร้อนจากการเผาไหม้ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และอุณหภูมิของการเผาไหม้ได้ ตามลำดับ

adiabatic flame temperature

กระบวนการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในระบบที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม นั่นคือ $Q = 0$ ไม่มีงานจากภายนอกกระทำ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ พลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยจากปฏิกิริยาทางเคมี จะมีผลทำให้อุณหภูมิและผลิตภัณฑ์สูงมาก ซึ่งเราเรียกว่า adiabatic flame temperature ของปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงอุณหภูมิสูงสุดของห้องเผาไหม้เมื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ และไม่มีการถ่ายเทความร้อน ($Q = 0$)

จากรูปที่ 2.6 พิจารณา adiabatic flame temperature ของระบบที่มีกระบวนการการเผาไหม้ อย่างสม่ำเสมอ จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อ $Q = 0$ และไม่มีงานจากภายนอก $W = 0$ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ จาก

$$Q - W = H_p - H_R$$

เมื่อ $Q = 0$ และ $W = 0$ เพราะฉะนั้น

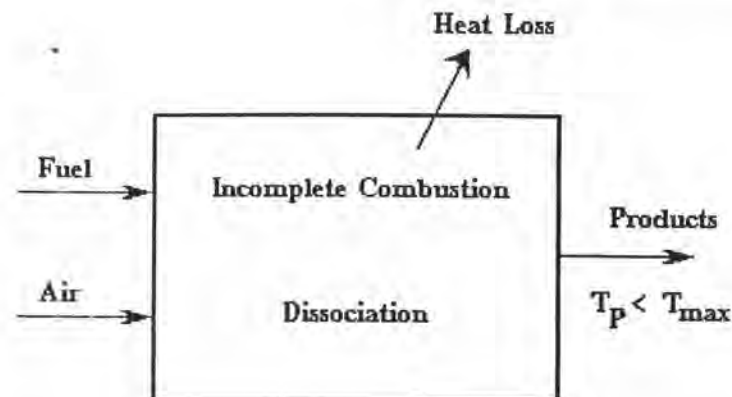
$$H_p = H_R$$

หรือ

$$\sum N_p (\bar{h}^\circ_f + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p = \sum N_R (\bar{h}^\circ_f + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R$$

เอนทาลปีของสารปฏิกิริยา (H_R) สามารถหาได้โดยง่ายที่สภาวะของสารปฏิกิริยานั้น ๆ แต่การหาค่าเอนทาลปีของผลิตภัณฑ์ (H_p) ไม่สามารถหาได้โดยตรง เพราะว่ามันทราบค่าของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ (T_p) ดังนั้นการคำนวณหาค่า adiabatic flame temperature จะต้องใช้เทคนิคในการทดลองแทนค่าในสมการการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของผลิตภัณฑ์

ในการออกแบบห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง ๆ จะต้องคำนึงถึงโครงสร้างด้วย ถึงแม้ว่า adiabatic flame temperature จะมีความสำคัญในการออกแบบห้องเผาไหม้ แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการเผาไหม้ส่วนมากจะเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (incomplete) และจะมีการสูญเสียความร้อน (heat loss) ออกจากกระบวนการ และมีแก๊สบางชนิดแยกตัว (dissociation) ที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงระบบการเผาไหม้ในทางปฏิบัติจริง

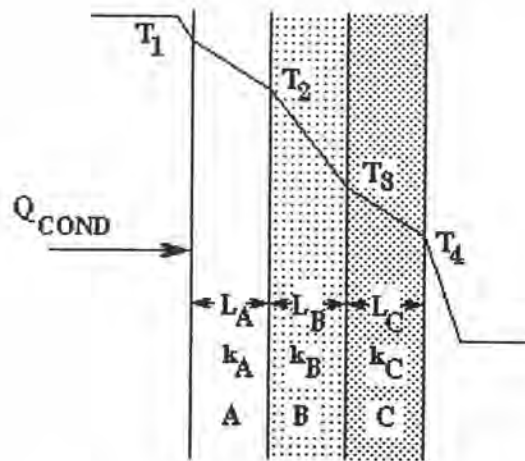
ด้วยเหตุผลดังกล่าว มีผลทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุด T_{max} หรือ adiabatic flame temperature เราสามารถควบคุมอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ได้โดยการควบคุมปริมาณอากาศส่วนเกิน

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังเตาเผาและผนังปล่องไอเสีย [9]

การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตาเผา

เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน (conduction heat transfer) ปัญหาของการนำความร้อนผ่านผนังเตาเผาจะคิดแบบหนึ่งมิติ ในสภาวะสม่ำเสมอ (one dimension steady conduction)

กรณีที่ผนังเตาเป็นผนังหลายชั้น (composite wall) เรียงซ้อนกันแบบอนุกรม สมการการถ่ายเทความร้อนมักจะคิดในเทอมของความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ พิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังราบที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะมีการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุในอัตราเท่ากันทุกชั้น



รูปที่ 2.8 แสดงผนังเตาเผาแบบหลายชั้น

และจากสมการ

$$Q_{COND} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_A}{k_A A_A}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L_B}{k_B A_B}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{L_C}{k_C A_C}}$$

เมื่อ A_{COND} แทน พื้นที่ในทิศตั้งฉากกับการไหลของความร้อนจะมีค่าเท่ากันทั้งหมด

$$\frac{Q_{\text{COND}}}{A_{\text{COND}}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_A}{k_A}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L_B}{k_B}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{L_C}{k_C}}$$

กำหนดให้ $R_{\text{COND}} = \frac{L}{k}$ แทนค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของวัตถุแต่ละชนิด ดังนั้นจะได้สมการการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตาเผาหลายชั้น

$$\frac{Q_{\text{COND}}}{A_{\text{COND}}} = \frac{T_1 - T_2}{R_A} = \frac{T_2 - T_3}{R_B} = \frac{T_3 - T_4}{R_C}$$

ถ้าเราทราบอุณหภูมิเฉพาะผิวด้านนอกและด้านใน คือ T_1 และ T_4 ดังนั้น จะได้สมการการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$\frac{Q_{\text{COND}}}{A_{\text{COND}}} = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_C}$$

หรือ

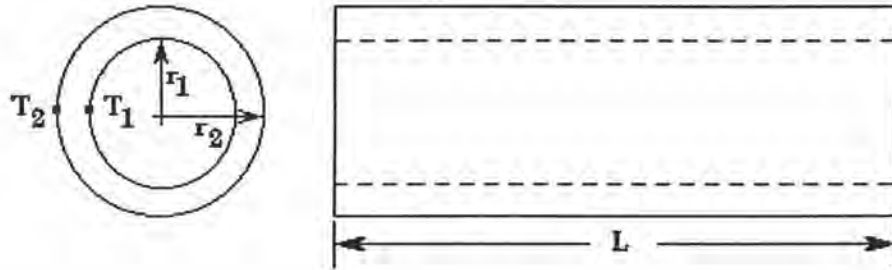
$$Q_{\text{COND}} = A_{\text{COND}} \frac{T_1 - T_4}{R_{\text{COND TOTAL}}}$$

เมื่อ

$$R_{\text{COND TOTAL}} = R_A + R_B + R_C$$

การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังปล่องไอเสีย

เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนตามแนวรัศมี ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดตั้งฉากกับทิศทางของการถ่ายเทความร้อนในลักษณะเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมี ปัญหาการวิเคราะห์จะเป็นแบบหนึ่งมิติ ภายใต้สภาวะสม่ำเสมอ จากสมการของฟูริเยร์ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำผ่านพื้นผิวของผนังปล่องไอเสียซึ่งเป็นรูปทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงผนังปล่องไอเสีย

สมการการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังปล่องไอเสีย คือ

$$Q_{\text{COND}} = \frac{2\pi Lk(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

ดังนั้นความต้านทานความร้อนของรูปทรงกระบอกคือ

$$R_{\text{COND}} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk}$$

เพราะฉะนั้นสมการการถ่ายเทความร้อนผ่านปล่องไอเสียจะลดรูปเป็น

$$Q_{\text{COND}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{COND}}}$$