บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้กล่าวถึง ทฤษฎีเกี่ยวกับการเผาไหม้ สมการการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของธาตุองค์ประกอบต่างๆในเชื้อเพลิง ลักษณะและประเภทของเชื้อเพลิง ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงหากทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งในเชิงทฤษฎีและที่ต้องใช้จริง ตัวประกอบที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ ปริมาณแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้จากการใช้ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีและจากปริมาณอากาศที่ใช้จริง

2.1 ทฤษฎีการเผาไหม้ (Combustion theory)

การเผาไหม้ หมายถึง ปฏิกริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (combustion element) ของเชื้อเพลิง สารเผาไหม้โดยหลักๆมี คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถัน ขณะเกิดปฏิกริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจนและพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และสารที่เหลือจากการเผาไหม้ เช่น ขี้เถ้า ออกซิเจน ไนโตรเจน เป็นต้น

การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ [9] คือ การเผาไหม้ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วให้ปริมาณความร้อนเท่ากับค่าความร้อน (heating value) ของเชื้อเพลิง สมการพื้นฐานของการเผาไหม้มีดังต่อไปนี้

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 97{,}000 \text{ kcal/kmol} \quad (2.1)$$

$$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O_{(g)} + 57{,}600 \text{ kcal/kmol} \quad (2.2)$$

$$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O_{(l)} + 68{,}300 \text{ kcal/kmol} \quad (2.3)$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 + 80{,}000 \text{ kcal/kmol} \quad (2.4)$$

พิจารณาสมการ (2.1) มีความหมายว่า คาร์บอน 1 โมเลกุล รวมตัวกับออกซิเจน 1 โมเลกุล กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล และปฏิกริยานี้คายความร้อน 97,000 kcal ต่อ

คาร์บอน 1 kmol เนื่องจากคาร์บอน 1 kmol มีน้ำหนัก 12 โมเลกุล ดังนั้นห กคาร์บอน 1 kg เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนที่เกิดขึ้นคือ 97,000/12 เท่ากับ ≈8,080 kcal เป็นดัน

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็น ค่าความร้อนสูง (High Heating Value:HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value:LHV) [10] กรณีวิเคราะห์โดยมีไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ควบแน่นนั้นจะได้ HHV และถ้าไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ระเหยตัวจะได้ LHV ความสัมพันธ์ระหว่างสองเทอมคือ

$$LHV = HHV - m_w h_{fg} \quad (2.5)$$

$$HHV = LHV - 9m_{H2} h_{fg} \quad (2.6)$$

โดยที่ m_w คือ มวลของไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ต่อ 1 หน่วยมวลของเชื้อเพลิงเนื่องจากการเผาไหม้ของ H ในเชื้อเพลิง, m_{H2} คือ มวลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง 1 kg ซึ่งวิเคราะห์จาก ultimate analysis (การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงในห้องทดลอง เพื่อต้องการทราบ %C, %H, %O, %N, %S และ %เถ้า) และ h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยหรือควบแน่นของไอน้ำที่ความดันย่อยในสารที่ได้จากการเผาไหม้

2.2 เชื้อเพลิง (fuel) [8,10]

เชื้อเพลิง หมายถึง สารที่เมื่อทำปฏิกริยากับออกซิเจนในอากาศที่อุณหภูมิติดไฟแล้วจะเผาไหม้ให้พลังงานความร้อนออกมา โดยมีธาตุองค์ประกอบที่สำคัญของเชื้อเพลิงคือ คาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นพื้นฐาน

2.2.1 ลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิงที่ดี

1 เชื้อเพลิงทำให้เผาไหม้ได้ง่าย และสามารถควบคุมการเผาไหม้ได้
2 มีค่าความร้อนสูง
3 ราคาไม่แพง
4 เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วให้สารมลพิษในระดับต่ำ
5 ง่ายต่อการลำเลียง ขนส่งและการเก็บรักษา
6 มีความปลอดภัยทั้งเวลาใช้และเก็บรักษา

2.2.2 ประเภทของเชื้อเพลิง

1 เชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ ถ่านหิน ถ่านไม้ ฟืน เป็นต้น
2 เชื้อเพลิงเหลว ได้แก่ น้ำมันเตา น้ำมันเบนซิน และน้ำมันก๊าด เป็นต้น
3 เชื้อเพลิงแก๊ส ได้แก่ แก๊สธรรมชาติ แก๊สหุงต้ม (LPG) และโพรดิวเซอร์แก๊ส

เชื้อเพลิงชีวมวล (biomass) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวลแบ่งเป็น 4 ประเภทคือ

1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็นไม้เนื้ออ่อน (Softwood) และไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกนิน (lignin) อยู่ประมาณ 40% ในไม้เนื้อแข็ง

2 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือใช้จากการเกษตร เช่น แกลบ เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น

3 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial biomass) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล คือ กากอ้อย กากสับปะรด

4 เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic biomass) เช่น ขยะของเทศบาล

2.2.3 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

กรณีของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว องค์ประกอบส่วนใหญ่คือ C, H และ S นอกนั้นอาจมี N และ O ส่วนเชื้อเพลิงแก๊สมีองค์ประกอบพื้นฐานของ C_mH_n

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการคือ

1 เวลาต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้หมด

2 อุณหภูมิในการเผาไหม้ต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง

3 การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศต้องอยู่ในลักษณะของการผสมผสานแบบปั่นป่วนซึ่งมีความสำคัญมากสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

2.4 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value) [9]

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง นอกจากจะสามารถหาได้โดยใช้คาลอริมิเตอร์ (calorimeter) แล้ว ยังสามารถหาค่าโดยประมาณได้จากการคำนวณที่อาศัยส่วนประกอบของเชื้อเพลิง

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน กำมะถัน ขี้เถ้าและความชื้น ถ้าให้

c เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 kg
h เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง 1 kg
o เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุออกซิเจนในเชื้อเพลิง 1 kg
s เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุกำมะถันในเชื้อเพลิง 1 kg
w เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำ(ความชื้น)ในเชื้อเพลิง 1 kg

ปริมาณความร้อนของ C 1 kg คือ 97,000/12 ≈ 8,080 kcal/kg
ปริมาณความร้อนเมื่อ H 1 kg ทำปฏิกริยาเป็นน้ำคือ 68,300/2 = 34,200 kcal/kg
ปริมาณความร้อนเมื่อ H 1 kg ทำปฏิกริยาเป็นไอน้ำ คือ 57,600/2 = 28,800 kcal/kg
ปริมาณความร้อนของ S 1 kg คือ 80,000/32 = 2,500 kcal/kg

เราสามารถคำนวณหาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงได้จากสมการ

$$HHV = 8080 \times c + 34200 \times \left(h - \frac{o}{8} \right) + 2500 \times s \qquad (2.7)$$

เมื่อเทอม 8080c เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของธาตุคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 kg เทอม 34200h เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกริยาของธาตุไฮโดรเจนแล้วได้น้ำ แต่เนื่องจากในเชื้อเพลิงอาจมีธาตุออกซิเจนประกอบอยู่ด้วย ซึ่งออกซิเจนในส่วนนี้จะรวมกับไฮโดรเจนเป็นความชื้นที่แฝงอยู่ในเชื้อเพลิงนอกเหนือจากความชื้นทั่วไป ปฏิกริยาเคมีในส่วนนี้จะไม่ให้ความร้อน ออกซิเจน 8 kg จะรวมตัวกับไฮโดรเจน 1 kg ได้น้ำ 9 kg ดังนั้นจึงต้องนำเทอม o/8 มาหักออกจาก h เพื่อที่จะได้ปริมาณของไฮโดรเจนที่ทำปฏิกริยากับออกซิเจนและให้ความร้อนออกมาจริง เทอม 2500s เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกริยาของกำมะถันกับออกซิเจน

ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงคำนวณได้จากสมการ

$$LHV = 8080 \times c + 28800 \times \left(h - \frac{o}{8} \right) + 2500 \times s - 540 \times \left(\frac{9}{8} \times o + w \right) \qquad (2.8)$$

เมื่อเทอม 28800h เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกริยาของธาตุไฮโดรเจนแล้วได้น้ำ เทอม 9(o/8) เป็นน้ำหนักของน้ำที่แฝงอยู่ในเชื้อเพลิงเนื่องจากองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิง ส่วนเทอม 540 นั้นเป็นค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นของไอน้ำ และ w เป็นปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิง

แก๊สที่จำเป็นต่อกระบวนการเผาไหม้คือ ออกซิเจน โดยใช้แก๊สออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ ค่าโดยประมาณขององค์ประกอบของอากาศแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์องค์ประกอบ	
	โดยปริมาตร	โดยมวล
ออกซิเจน	21	23
ไนโตรเจน	79	77

ตารางที่ 2.1 ค่าประมาณขององค์ประกอบของอากาศ

ถ้าเราทราบอัตราส่วนขององค์ประกอบในเชื้อเพลิง ก็สามารถคำนวณหาปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเชื้อเพลิงได้โดยการรวมปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีขององค์ประกอบแต่ละตัว

ถ้าในเชื้อเพลิงมีออกซิเจน ก็ให้ถือว่าออกซิเจนรวมตัวกับไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงอยู่ในสภาพ H_2O เนื่องจาก

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$

2 kg 32/2 kg 18 kg

1/8 kg 1 kg 9/8 kg

ฉะนั้น H_2O เกิดจากออกซิเจน 1 (kg) รวมตัวกับไฮโดรเจนในอัตราส่วน 1/8 (kg) นั่นคือในจำนวนไฮโดรเจน h (kg/kg เชื้อเพลิง) ส่วนที่รวมตัวกับออกซิเจนในเชื้อเพลิงเป็น H_2O ไปแล้วคือ

O/8 (kg/kg เชื้อเพลิง) ดังนั้นไฮโดรเจนที่เหลือสำหรับการเผาไหม้คือ h-O/8 (kg/kg เชื้อเพลิง) จากตารางที่ 2.2 ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของ C 1 (kg) เท่ากับ

1/12 x 22.4 = 1.867 (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)

หรือ 1/12 x 32 = 2.67 (kg/kg เชื้อเพลิง)

เนื่องจากในเชื้อเพลิง 1 (kg) มี C เท่ากับ c (kg/kg เชื้อเพลิง) ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นคือ

1/12 x 22.4 x c (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)

หรือ 1/12 x 32 x c (kg/kg เชื้อเพลิง)

ในกรณีของ H ในเชื้อเพลิง ปริมาณออกซิเจนในอากาศที่จำเป็นคือ

1/2 x 22.4/2 x (h – o/8) (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)

หรือ 1/2 x 32/2 x (h – o/8) (kg/kg เชื้อเพลิง)

ในกรณีของ S ในเชื้อเพลิง ปริมาณออกซิเจนในอากาศที่จำเป็นคือ

1/32 x 22.4 x s (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)

หรือ 1/32 x 32 x s (kg/kg เชื้อเพลิง)

ผลรวมนี้ทั้งหมดก็คือ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง 1 (kg) เนื่องจากอัตราส่วนของออกซิเจนในอากาศเท่ากับ 0.21 โดยปริมาตรหรือ 0.232 โดยน้ำหนัก ดังนั้นถ้าให้ A_0 เป็นปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีที่ต้องการใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A_0 = \frac{1}{0.232}\left[\frac{1}{12}\times 32 \times c + \frac{1}{2}\times\frac{32}{2}\times\left(h-\frac{o}{8}\right)+\frac{1}{32}\times 32\times s\right]$$

(kgอากาศ/kgเชื้อเพลิง) (2.9)

เมื่อต้องการคำนวณหาปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีในหน่วยปริมาตรของอากาศก็จะได้สมการเป็น

$$A_0 = \frac{1}{0.21}\left[\frac{1}{12}\times 22.4 \times c + \frac{1}{2}\times\frac{22.4}{2}\times\left(h-\frac{o}{8}\right)+\frac{1}{32}\times 22.4\times s\right]$$

(Nm^3 อากาศ/kg เชื้อเพลิง) (2.10)

ตารางที่ 2.2 สมการการเผาไหม้ของธาตุที่เผาไหม้ได้ [9]

ธาตุที่เผาไหม้	สมการของปฏิกริยาการเผาไหม้	ปริมาณต่อธาตุที่เผาไหม้ได้ 1 kg						
		สารที่ได้จากการเผาไหม้		O_2 ที่ใช้ไป	อากาศที่ใช้ไป	N_2 ที่เหลือ	ก๊าซเผาไหม้	
C	(การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์) $C + O_2 = CO_2$ 12kg 32kg 44kg $22.4Nm^3$ $22.4Nm^3$	CO_2	44*1/12= 3.67kg	32*1/12= 2.67kg	(ปริมาณออกซิเจนที่ใช้)/0.232 = 11.50kg	ปริมาณอากาศ-ออกซิเจน = 8.83kg	CO_2 และ N_2	 12.50kg
			$22.4*1/12=$ $1.867Nm^3$	$22.4*1/12=$ $1.867Nm^3$	(ปริมาณออกซิเจนที่ใช้)/0.21 $= 8.89Nm^3$	ปริมาณอากาศ-ออกซิเจน $7.02Nm^3$		 $8.89Nm^3$
	(การเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์) $C + 0.5O_2 = CO$ 12kg 32/2kg 44kg $22.4/2Nm^3$ $22.4Nm^3$	CO	28*1/12= 2.33kg	32/2*1/12= 1.333kg	5.75kg	4.41kg	CO และ N_2	 6.75kg
			$22.4*1/12=$ $1.867Nm^3$	$22.4/2*1/12=$ $0.933Nm^3$	$4.44Nm^3$	$3.51Nm^3$		 $5.38Nm^3$
H	(การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์) $H_2 + 0.5O_2 = H_2O$ 2kg 32/2kg 18kg $22.4Nm^3$ $22.4/2Nm^3$ $22.4Nm^3$	H_2O	18*1/2= 9kg	32/2*1/2= 8kg	34.5kg	26.5kg	H_2O และ N_2	 35.5kg
			$22.4*1/2=$ $11.2Nm^3$	$22.4/2*1/2=$ $5.6Nm^3$	$26.7Nm^3$	$21.1Nm^3$		 $32.3Nm^3$
S	(การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์) $S + O_2 = SO_2$ 32kg 32kg 64kg $22.4Nm^3$ $22.4Nm^3$	SO_2	64*1/32= 2kg	32*1/32= 1kg	4.31kg	3.31kg	SO_2 และ N_2	 5.31kg
			$22.4*1/32=$ $0.7Nm^3$	$22.4*1/32=$ $0.7Nm^3$	$3.33Nm^3$	$2.63Nm^3$		 $3.33Nm^3$

ในกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงนั้น การที่จะผสมอากาศและเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอโดยสมบูรณ์นั้นเป็นไปได้ยาก นั่นคือเพียงแต่ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีเท่านั้นจะก่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้ยาก จึงจำเป็นต้องป้อนปริมาณอากาศเข้าห้องเผาไหม้ในปริมาณที่มากกว่าปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี[8,11]อัตราส่วนของปริมาณอากาศที่ใช้จริงต่อปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี เรียกว่า อัตราส่วนอากาศ

ถ้าให้ m แทนอัตราส่วนอากาศ A_0 แทนปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีและ A แทนปริมาณอากาศที่ใช้จริง จะได้ว่า

$$m = \frac{A}{A_0} \qquad \text{หรือ} \qquad A = mA_0$$

ปริมาณอากาศส่วนที่เกินคือ $(m-1)A_0$ และอัตราส่วนอากาศส่วนเกินคือ (m-1) หรือ เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินคือ (m-1)x100%

2.5 ตัวประกอบที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ [8]

2.5.1 ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามส่วนประกอบของเชื้อเพลิง เช่นมี ไฮโดรเจนและสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ปริมาณเท่าไหร่ เมื่อเกิดปฏิกริยาการเผาไหม้จะมีน้ำในปริมาณหนึ่ง ส่วนปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอากาศจะมีผลน้อยมากอาจไม่คำนึงถึง แต่ผลเนื่องจากการสูญเสียความร้อนแฝง เพื่อทำให้น้ำกลายเป็นไอมีค่าสูงนั้นจะส่งผลกระทบต่อการเผาไหม้

2.5.2 อากาศส่วนเกิน (excess air) เป็นปริมาณที่ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ แต่ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน เนื่องจากความร้อนสัมผัสเพิ่มขึ้น การสูญเสียความร้อนสัมผัสไปกับแก๊สเสียจะมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิของแก๊สสูงขึ้น การที่ใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินมากขึ้น จะเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์การเผาไหม้ต่ำลง และแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นในอุปกรณ์ลดลง แต่จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ดังนั้นการสูญเสียความร้อนในแก๊สเสียเนื่องจากอากาศส่วนเกินจึงเป็นปริมาณที่ต้องพิจารณาถึงระดับของปริมาณอากาศส่วนเกินซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง โดยการพิจารณาถึงความสามารถในการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงภายในอุปกรณ์การเผาไหม้

2.5.3 อัตราส่วนผสม (mixture ratio) การเผาไหม้เชื้อเพลิงต้องใช้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาก็เป็นการยากที่จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว การเผาไหม้จึงใช้อากาศเข้าทำปฏิกิริยาดังนั้นปริมาณอากาศจึงมีความสำคัญซึ่งจะส่งผลให้มีปริมาณของออกซิเจนเพียงพอต่อการ

ทำปฏิกิริยา เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง (m_a/m_f) และเชื้อเพลิงกับอากาศ (m_f/m_a) เมื่อกำหนดให้ ϕ หมายถึง อัตราส่วนสมมูล (fuel/air equivalence Ratio) จะได้

$$\phi = \frac{(m_f / m_a)_{act}}{(m_f / m_a)_{sto}} \qquad (2.11)$$

เมื่อค่า ϕ=1 จะหมายถึง ปริมาณอากาศที่ใช้จริงเท่ากับปริมาณอากาศที่ต้องใช้ทางทฤษฎี และเรียกอัตราส่วนผสมนี้ว่า Stoichiometric ถ้าหาก ϕ<1 หมายถึง อากาศที่ใช้จริงมากกว่าปริมาณอากาศที่ต้องใช้ทางทฤษฎี ซึ่งเป็นการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินนั่นเองและเรียกอัตราส่วนผสมนี้ว่า อัตราส่วนผสมบาง ถ้าหาก ϕ>1 หมายถึง อากาศที่ใช้จริงน้อยกว่าปริมาณอากาศที่ต้องใช้ทางทฤษฎี เรียกอัตราส่วนผสมแบบนี้ว่า อัตราส่วนผสมหนา

ขบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวหรือแก๊ส เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งมักเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆมากมาย และผสมกันอยู่อย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกันอีกทั้งอัตราส่วนของสารต่างๆ ภายในเชื้อเพลิงแข็งยังไม่แน่นอน นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วยสารต่างๆ ซึ่งมีทั้งเผาไหม้ได้และไม่สามารถเผาไหม้ได้ สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้จะเรียกว่าสารเฉื่อย (inert) สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับแก๊สไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งไม่ช่วยให้เกิดการสันดาป แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ก็อาจเกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ สารเฉื่อยนี้แบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือความชื้นและสารประกอบอนินทรีย์ที่ประกอบขึ้นเป็นขี้เถ้า สารอนินทรีย์เหล่านี้ส่วนมากจะเป็นสารจำพวกซิลิเกต (silicates) ซัลไฟด์ (sulfides) และเกลือของฮาโลเจน (halogen salts) เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งสารเหล่านี้จะเป็นขี้เถ้า โดยที่บางส่วนจะตกอยู่ภายในห้องเผาไหม้ บางส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวออกไปกับแก๊สเสียที่เรียกว่าขี้เถ้าปลิว (fly ash)

เชื้อเพลิงแข็งในส่วนที่เผาไหม้ได้ สามารถแยกเป็นส่วนที่ระเหยได้ (volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (nonvolatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ประกอบด้วย คาร์บอนและสารประกอบของคาร์บอน C_XH_Y โดยที่ค่า x จะมากกว่าค่า y มากๆ หรือเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆนั้นเอง ส่วนสารที่ระเหยได้ในที่นี้จะหมายถึงสารประกอบที่ระเหยในช่วงของอุณหภูมิการเผาไหม้ซึ่งจะประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ

2.6 ส่วนประกอบและปริมาณของแก๊สไอเสีย [9]

แก๊สไอเสียประกอบด้วย CO_2, H_2O, SO_2 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง และ O_2 ในอากาศส่วนเกินที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ และ N_2 ในอากาศที่ป้อนเข้า จากตารางที่ 2.2 จะได้ว่า

ปริมาณ CO_2 ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1/12 x 22.4 x c (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)
หรือ 1/12 x 44 x c (kg/kg เชื้อเพลิง)
ปริมาณ H_2O ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1/2 x 22.4 x h (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)
หรือ 1/2 x 18 x h (kg/kg เชื้อเพลิง)
ปริมาณ SO_2 ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1/32 x 22.4 x s (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)
หรือ 1/32 x 64 x s (kg/kg เชื้อเพลิง)

สำหรับความชื้นในเชื้อเพลิงนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้จะกลายเป็นไอน้ำ ดังนั้น

ความชื้นที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1/18 x 22.4 x w (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)
หรือ w (kg/kg เชื้อเพลิง)

ธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิงจะกลายเป็นแก๊สไนโตรเจน ดังนั้น

ปริมาณ N_2 ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1/28 x 22.4 x n (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)
หรือ n (kg/kg เชื้อเพลิง)

ด้วยเหตุที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงเราต้องใช้ปริมาณอากาศเกินพอ ปริมาณอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้เท่ากับ mA_0 (Nm^3/kg เชื้อเพลิง) หรือ mA_0 (kg/kg เชื้อเพลิง) และเนื่องจากปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ $(m-1)A_0$ ดังนั้น

ปริมาณ O_2 ส่วนเกินเท่ากับ 0.21 x $(m-1)A_0$ (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)
หรือ 0.232 x $(m-1)A_0$ (kg/kg เชื้อเพลิง)

เนื่องจากไนโตรเจนในอากาศที่ป้อนเข้าไปย่อมเหลือออกมากับแก๊สไอเสียทั้งหมด จะได้

ปริมาณ N_2 ที่ออกมาเท่ากับ (1-0.21) x mA_0 (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)
หรือ (1-0.232) x mA_0 (kg/kg เชื้อเพลิง)

เมื่อรวมแก๊สทั้งหมดที่เกิดจากการเผาไหม้ ผลรวมทั้งหมดย่อมเป็นปริมาณแก๊สไอเสียอันเกิดจากการเผาไหม้ G ในหน่วยปริมาตรอากาศจะได้

$$G = 0.21 \times (m-1)A_n + (1-0.21)mA_0 + \frac{22.4}{12} \times c + \frac{22.4}{2} \times h + \frac{22.4}{32} \times s + \frac{22.4}{18} \times w + \frac{224}{28} \times n$$

(Nm^3/kg เชื้อเพลิง) (2.11)

ถ้าใช้หน่วยของน้ำหนักจะได้

$$G = 0.232 \times (m-1)A_0 + (1-0.232)mA_0 + \frac{44}{12} \times c + \frac{18}{2} \times h + \frac{64}{32} \times s + w + n$$

(kg/kg เชื้อเพลิง) (2.12)

เมื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ด้วยปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี ปริมาณแก๊สเสียจากการเผาไหม้ที่ได้นี้เรียกว่า ปริมาณแก๊สไอเสียเชิงทฤษฎี แทนด้วย G_0 เพียงแต่แทนค่า m = 1 ลงในสมการแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ จะได้

$$G_n = (1-0.21)A_0 + \frac{22.4}{12} \times c + \frac{22.4}{2} \times h + \frac{22.4}{32} \times s + \frac{22.4}{18} \times w + \frac{22.4}{28} \times n$$

(Nm^3/kg เชื้อเพลิง) (2.13)

ถ้าใช้หน่วยน้ำหนักจะได้

$$G_0 = (1-0.232)A_0 + \frac{44}{12} \times c + \frac{18}{2} \times h + \frac{64}{32} \times s + w + n$$

(kg/kg เชื้อเพลิง) (2.14)

2.7 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง [8]

กระบวนการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1 เริ่มด้วยออกซิเจนจะสัมผัสกับผิวคาร์บอน
2 เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา

3 มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาที่ผิว

4 เกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนออกไซด์กับออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาการเผาไหม้จะถูกเร่งได้โดยการบดเชื้อเพลิงแข็งให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการทำให้ volatile matter ระเหยออกมาได้เร็วและช่วยให้เกิดการผสมกับอากาศดีขึ้น ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

$$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO \qquad (2.15)$$

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \qquad (2.16)$$

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 \qquad (2.17)$$

เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ซึ่งจะทำให้มีพื้นผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับออกซิเจนจำกัด คือ จะเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อยๆ ดังนั้นจะเห็นว่าการออกแบบระบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง ควรให้มีพื้นผิวสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น

เชื้อเพลิงแข็งมีสารประกอบที่เกิดการเผาไหม้แบ่งออกได้สองชนิดคือ ชนิดที่เป็นสารระเหย (volatile matter) เช่น น้ำ ไฮโดรคาร์บอน และชนิดที่ไม่เป็นสารระเหย เช่น คาร์บอน สำหรับสารประกอบที่ไม่เกิดการเผาไหม้ ได้แก่ ความชื้น และสารประกอบอนินทรีย์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวและแก๊สหลังจากเกิดปฏิกิริยาจะให้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซีสซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก มีสองสถานะคือ แก๊สและของแข็ง ซึ่งสถานะแก๊สประกอบด้วย CO, CO_2, H_2, O_2, H_2O เมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิว (surface flux to volatile) ของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สดังกล่าว เกิดการเผาไหม้แบบผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันของแก๊สแต่ละชนิด ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมาก จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊ส เป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดน้อยหรือไม่เกิด ฉะนั้นจึงต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกริยา ในส่วนที่เป็นของแข็งจำพวกถ่าน จะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้น เนื่องจากแก๊สที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซีสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกริยาและอุณหภูมิยังไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หลังจากแก๊สต่างๆเกิดปฏิกิริยา จะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยา และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังสมการ(2.15) และสมการ

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO \qquad (2.18)$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอน เมื่อรวมตัวกับออกซิเจน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคาร์บอนมากที่สุด การแผ่รังสีเป็นกลไกสำคัญที่สุด ถ้า T_w, T_s คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและที่ผิวตามลำดับ จะได้ฟลักซ์การแผ่รังสี q''_{rad} คือ

$$q''_{rad} = \sigma\varepsilon\left(T_w^4 - T_s^4\right) \tag{2.19}$$

ซึ่ง σ เป็นค่าคงที่ Stefan Boltzmann มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} $Wm^{-2}K^{-4}$ และ ε คือค่าการแผ่รังสี ส่วนการถ่ายเทความร้อนโดยการนำจะมีบทบาทมากเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็ก ฟลักซ์ของการนำความร้อน q''_{cond} หาได้จากสมการ

$$q''_{cond} = -k\frac{dT}{dr} \tag{2.20}$$

ในกรณีที่มีการป้อนเชื้อเพลิงด้วยความเร็วที่สูง ทำให้ Re มีค่าสูงด้วย จะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพา q''_v คือ

$$q''_v = h\left(T_a - T_s\right) \tag{2.21}$$

โดยที่ T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
โดยการรวมสมการทั้งสามจะสามารถจัดอยู่ในรูปของสมดุลพลังงานของเชื้อเพลิงแข็งได้ว่า

$$\sigma\varepsilon\left(T_w^4 - T_s^4\right) - k\frac{dT}{dr} + h\left(T_a - T_s\right) = 0 \tag{2.22}$$