

บทที่ 3

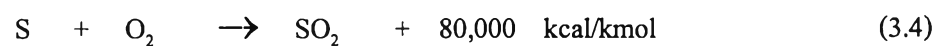
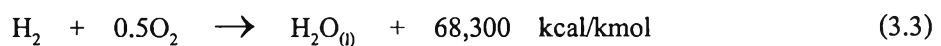
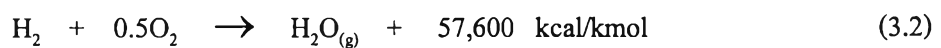
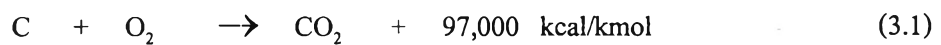
ทฤษฎี

ในบทนี้กล่าวถึง ทฤษฎีเกี่ยวกับการเผาไหม้ สมการการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของธาตุองค์ประกอบต่างๆ ในเชื้อเพลิง ลักษณะและประเภทของเชื้อเพลิง ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงหากทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งในเชิงทฤษฎีและที่ต้องใช้จริง ตัวประกอบที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ ปริมาณแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้จากการใช้ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีและจากปริมาณอากาศที่ใช้จริง

3.1 ทฤษฎีการเผาไหม้ (Combustion theory)

การเผาไหม้ หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารที่สามารถเผาไหม้ได้ (combustion element) ของเชื้อเพลิง สารเผาไหม้โดยหลักๆ มี คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน และพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ให้น้ำ และสารที่เหลือจากการเผาไหม้ เช่น ซัลเฟอร์ ออกซิเจน ไนโตรเจน เป็นต้น

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



พิจารณาสมการ (3.1) มีความหมายว่า คาร์บอน 1 โมเลกุล รวมตัวกับออกซิเจน 1 โมเลกุล กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล และปฏิกิริยานี้คายความร้อนเท่ากับ 97,000 kcal ต่อ

คาร์บอน 1 kmol เนื่องจากคาร์บอน 1 kmol มีน้ำหนัก 12 โมเลกุล ดังนั้นหากคาร์บอน 1 kg เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนที่เกิดขึ้นคือ $97,000/12$ เท่ากับโดยประมาณ $\approx 8,080$ kcal เป็นต้น

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

$$\text{LHV} = \text{HHV} - m_w h_{fg} \quad (3.5)$$

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 9m_{H_2} h_{fg} \quad (3.6)$$

โดยที่ m_w คือ มวลของไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ต่อ 1 หน่วยมวลของเชื้อเพลิงเนื่องจากการเผาไหม้ของ H ในเชื้อเพลิง, m_{H_2} คือ มวลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง 1 kg ซึ่งวิเคราะห์จาก ultimate analysis (การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงในห้องทดลอง เพื่อต้องการทราบ %C, %H, %O, %N, %S และ %น้ำ) และ h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยหรือควบแน่นของไอน้ำที่ความดันย่อยในสารที่ได้จากการเผาไหม้

3.2 เชื้อเพลิง (fuel) [8,10]

เชื้อเพลิง หมายถึง สารที่เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศที่อุณหภูมิติดไฟแล้วจะเผาไหม้ให้พลังงานความร้อนออกมา โดยมีธาตุองค์ประกอบที่สำคัญของเชื้อเพลิง คือ คาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นพื้นฐาน

3.2.1 ลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิงที่ดี

1. เชื้อเพลิงทำให้เผาไหม้ได้ง่าย และสามารถควบคุมการเผาไหม้ได้
2. มีค่าความร้อนสูง
3. ราคาไม่แพง
4. เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วให้สารมลพิษในระดับต่ำ
5. ง่ายต่อการลำเลียง ขนส่ง และการเก็บรักษา
6. มีความปลอดภัยทั้งเวลาใช้และเก็บรักษา

3.2.2 ประเภทของเชื้อเพลิง

1. เชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ ถ่านหิน ถ่านไม้ ฟืน เป็นต้น
2. เชื้อเพลิงเหลว ได้แก่ น้ำมันเตา น้ำมันเบนซิน และน้ำมันก๊าด เป็นต้น
3. เชื้อเพลิงก๊าซ ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซหุงต้ม (LPG) และโพรคิวเซอร์ก๊าซ

เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวลแบ่งเป็น 4 ประเภท คือ

1. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็นไม้เนื้ออ่อน (Softwood) และไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกนิน (lignin) อยู่ประมาณ 40% ในไม้เนื้อแข็ง
2. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือใช้จากการเกษตร เช่น แกลบ เหย้ามันสำปะหลัง เป็นต้น
3. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial biomass) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล คือ กากอ้อย กากสับปะรด
4. เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic biomass) เช่น ขยะของเทศบาล

3.2.3 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

กรณีของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว องค์ประกอบส่วนใหญ่ของเชื้อเพลิง คือ C, H และ S นอกนั้นอาจมี N และ O ส่วนเชื้อเพลิงก๊าซมีองค์ประกอบพื้นฐานของ C_mH_n

3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. เวลาต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้หมด
2. อุณหภูมิในการเผาไหม้ต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง
3. การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศต้องอยู่ในลักษณะของการผสมผสานแบบปั่นป่วนซึ่งมีความสำคัญมากสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

3.4 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value) [9]

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง นอกจากจะสามารถหาได้โดยใช้แคลอริมิเตอร์ (Calorimeter) แล้วยังสามารถหาค่าโดยประมาณได้จากการคำนวณที่อาศัยส่วนประกอบของเชื้อเพลิง

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน กำมะถัน ซัลเฟอร์ และความชื้น 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 $97,000/12 \approx 8,080$ kcal/kg

ปริมาณความร้อนเมื่อ H 1 kg ทำปฏิกิริยาเป็นน้ำคือ $68,300/2 = 34,200$ kcal/kg

ปริมาณความร้อนเมื่อ H 1 kg ทำปฏิกิริยาเป็นไอน้ำ คือ $57,600/2 = 28,800$ kcal/kg

ปริมาณความร้อนของ S 1 kg คือ $80,000/32 = 2,500$ kcal/kg

เราสามารถคำนวณหาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงได้จากสมการ

$$HHV = 8080 \times c + 34200 \times \left(h - \frac{o}{8} \right) + 2500 \times s \quad (3.7)$$

เมื่อเทอม $8080c$ เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของธาตุคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 kg เทอม $34200h$ เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาของธาตุไฮโดรเจนแล้วได้น้ำ แต่เนื่องจากในเชื้อเพลิงอาจมีธาตุออกซิเจนประกอบอยู่ด้วย ซึ่งออกซิเจนในส่วนนี้จะรวมกับไฮโดรเจนเป็นความชื้นที่แฝงอยู่ในเชื้อเพลิงนอกเหนือจากความชื้นทั่วไป ปฏิกิริยาเคมีในส่วนนี้จะไม่ให้ความร้อน ออกซิเจน 8 kg จะรวมตัวกับไฮโดรเจน 1 kg ได้น้ำ 9 kg ดังนั้นจึงต้องนำเทอม $o/8$ มาหักออกจาก h เพื่อที่จะได้ปริมาณของไฮโดรเจนที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและให้ความร้อนออกมาจริง เทอม $2500s$ เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาของกำมะถันกับออกซิเจน

ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงคำนวณได้จากสมการ

$$LHV = 8080 \times c + 28800 \times \left(h - \frac{o}{8} \right) + 2500 \times s - 540 \times \left(\frac{9}{8} \times o + w \right) \quad (3.8)$$

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

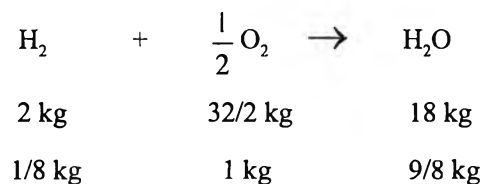
แก๊สที่จำเป็นต่อกระบวนการเผาไหม้คือ ออกซิเจน โดยใช้แก๊สออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ ค่าโดยประมาณขององค์ประกอบของอากาศแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์ต่อองค์ประกอบ	
	โดยปริมาตร	โดยมวล
ออกซิเจน	21	23
ไนโตรเจน	79	77

ตารางที่ 3.1 ค่าประมาณขององค์ประกอบของอากาศ

ถ้าเราทราบอัตราส่วนขององค์ประกอบในเชื้อเพลิง ก็สามารถคำนวณหาปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเชื้อเพลิงได้โดยการรวมปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีขององค์ประกอบแต่ละตัว

ถ้าในเชื้อเพลิงมีออกซิเจน ก็ให้ถือว่าออกซิเจนรวมตัวกับไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงอยู่ในสภาพ H_2O เนื่องจาก



ฉะนั้น H_2O เกิดจากออกซิเจน 1 (kg) รวมตัวกับไฮโดรเจนในอัตราส่วน $1/8$ (kg) นั่นคือในจำนวนไฮโดรเจน h (kg/kg เชื้อเพลิง) ส่วนที่รวมตัวกับออกซิเจนในเชื้อเพลิงเป็น H_2O ไปแล้วคือ $0/8$

(kg/kg เชื้อเพลิง) ดังนั้นไฮโดรเจนที่เหลือสำหรับการเผาไหม้คือ $h - O/8$ (kg/kg เชื้อเพลิง) จากตารางที่ 3.2 ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้ของ C จำนวน 1 (kg) เท่ากับ

$$\begin{aligned} & 1/12 \times 22.4 & = & 1.867 \quad (\text{Nm}^3/\text{kg} \text{ เชื้อเพลิง}) \\ \text{หรือ} & 1/12 \times 32 & = & 2.67 \quad (\text{kg/kg} \text{ เชื้อเพลิง}) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} & 1/12 \times 22.4 \times c & & (\text{Nm}^3/\text{kg} \text{ เชื้อเพลิง}) \\ \text{หรือ} & 1/12 \times 32 \times c & & (\text{kg/kg} \text{ เชื้อเพลิง}) \end{aligned}$$

ในกรณีของ H ในเชื้อเพลิง ปริมาณออกซิเจนในอากาศที่จำเป็นคือ

$$\begin{aligned} & 1/2 \times 22.4/2 \times (h - o/8) & & (\text{Nm}^3/\text{kg} \text{ เชื้อเพลิง}) \\ \text{หรือ} & 1/2 \times 32/2 \times (h - o/8) & & (\text{kg/kg} \text{ เชื้อเพลิง}) \end{aligned}$$

ในกรณีของ S ในเชื้อเพลิง ปริมาณออกซิเจนในอากาศที่จำเป็นคือ

$$\begin{aligned} & 1/32 \times 22.4 \times s & & (\text{Nm}^3/\text{kg} \text{ เชื้อเพลิง}) \\ \text{หรือ} & 1/32 \times 32 \times s & & (\text{kg/kg} \text{ เชื้อเพลิง}) \end{aligned}$$

ผลรวมนี้ทั้งหมดคือ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง 1 (kg) เนื่องจากอัตราส่วนของออกซิเจนในอากาศเท่ากับ 0.21 โดยปริมาตรหรือ 0.232 โดยน้ำหนัก ดังนั้นถ้าให้ A_0 เป็นปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีที่ต้องการใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ของสมบรูณ์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A_0 = \frac{1}{0.232} \left[\frac{1}{12} \times 32 \times c + \frac{1}{2} \times \frac{32}{2} \times \left(h - \frac{o}{8} \right) + \frac{1}{32} \times 32 \times s \right] \quad (\text{kgอากาศ/kgเชื้อเพลิง}) \quad (3.9)$$

เมื่อต้องการคำนวณหาปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีในหน่วยปริมาตรของอากาศก็จะได้สมการเป็น

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

(Nm³ อากาศ/kg เชื้อเพลิง) (3.10)

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

ถ้าให้ m แทนอัตราส่วนอากาศ A_0 แทนปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีและ A แทนปริมาณอากาศที่ใช้จริง จะได้ว่า

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

ปริมาณอากาศส่วนที่เกินคือ $(m-1)A_0$ และอัตราส่วนอากาศส่วนเกินคือ $(m-1)$ หรือเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินคือ $(m-1) \times 100\%$

ตารางที่ 3.2 สมการการเผาไหม้ของธาตุที่เผาไหม้ได้ [9]

ธาตุที่เผาไหม้	สมการของปฏิกิริยาการเผาไหม้	ปริมาณต่อธาตุที่เผาไหม้ได้ 1 kg						
		สารที่ได้จากการเผาไหม้	O ₂ ที่ใช้ไป	อากาศที่ใช้ไป	N ₂ ที่เหลือ	ก๊าซเผาไหม้		
C	(การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์)	CO ₂	44*1/12 = 3.67 kg	32*1/12 = 2.67 kg	(ปริมาณออกซิเจนที่ใช้)/0.232 = 11.05kg	ปริมาณอากาศ-ออกซิเจน = 8.83 kg	CO ₂ และ N ₂	(ปริมาณสารที่เกิดจากการสันดาป) + (N ₂ ที่เหลือ) = 12.50 kg
	C + O ₂ = CO ₂ 12kg 32kg 44kg 22.4Nm ³ 22.4Nm ³		22.4*1/12 = 1.867 Nm ³	22.4*1/12 = 1.867 Nm ³	(ปริมาณออกซิเจนที่ใช้)/0.21 = 8.89Nm ³	ปริมาณอากาศ-ออกซิเจน = 7.02 kg		(ปริมาณสารที่เกิดจากการสันดาป) + (N ₂ ที่เหลือ) = 8.89 kg
	(การเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์)	CO	28*1/12 = 2.33 kg	32*1/12 = 2.67 kg	5.75kg	4.41 kg	CO ₂ และ N ₂	6.75 kg
	C + 0.5O ₂ = CO 12kg 32kg 28kg 22.4Nm ³ 22.4Nm ³		22.4*1/12 = 1.867 Nm ³	22.4/2*1/12 = 0.933 Nm ³	4.44 Nm ³	3.51 Nm ³		5.38 Nm ³
H	(การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์)	H ₂ O	18*1/2 = 9 kg	32/2*1/2 = 8 kg	34.5 kg	26.5 kg	H ₂ O และ N ₂	35.5 kg
	H ₂ + 0.5 O ₂ = CO ₂ 2kg 32.2kg 18kg 22.4Nm ³ 22.4Nm ³ 22.4Nm ³		22.4*1/2 = 11.2 Nm ³	22.4/2*1/2 = 5.6 Nm ³	26.7 Nm ³	21.1 Nm ³		32.3 Nm ³
S	(การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์)	SO ₂	64*1/32 = 2 kg	32*1/32 = 1 kg	4.31 kg	3.31 kg	SO ₂ และ N ₂	5.31 kg
	S + 0.5O ₂ = SO ₂ 32kg 32kg 64kg 22.4Nm ³ 22.4Nm ³		22.4*1/32 = 0.7 Nm ³	22.4*1/32 = 0.7 Nm ³	3.33 Nm ³	2.63 Nm ³		3.33 Nm ³

3.5 ตัวประกอบที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ [8]

3.5.1 ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามส่วนประกอบของเชื้อเพลิง เช่น มีไฮโดรเจนและสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ปริมาณเท่าไร เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จะมีน้ำในปริมาณหนึ่ง ส่วนปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอากาศจะมีผลน้อยมากอาจไม่คำนึงถึง แต่ผลเนื่องจากการสูญเสียความร้อนแฝง เพื่อทำให้น้ำกลายเป็นไอมีค่าสูงนั้นจะส่งผลกระทบต่อการใช้เชื้อเพลิง

3.5.2 อากาศส่วนเกิน (*excess air*) เป็นปริมาณที่ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ แต่ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน เนื่องจากความร้อนสัมผัสเพิ่มขึ้น การสูญเสียความร้อนสัมผัสไปกับแก๊สไอเสีย จะมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิของแก๊สไอเสียสูงขึ้น การที่ใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินมากขึ้น จะเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์การเผาไหม้ต่ำลง และแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นในอุปกรณ์ลดลง แต่จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ดังนั้นการสูญเสียความร้อนในแก๊สไอเสียเนื่องจากอากาศส่วนเกินจึงเป็นปริมาณที่ต้องพิจารณาถึงระดับของปริมาณอากาศส่วนเกินซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง โดยการพิจารณาถึงความสามารถในการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงภายในอุปกรณ์การเผาไหม้

3.5.3 อัตราส่วนผสม (*mixture ratio*) การเผาไหม้เชื้อเพลิงต้องใช้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยา ก็เป็นการยากที่จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว การเผาไหม้จึงใช้อากาศเข้าทำปฏิกิริยาดังนั้น ปริมาณอากาศจึงมีความสำคัญซึ่งจะส่งผลให้มีปริมาณของออกซิเจนเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง (m_f/m_p) และเชื้อเพลิงกับอากาศ (m_f/m_a) เมื่อกำหนดให้ ϕ หมายถึง อัตราส่วนสมมูล (*fuel/air equivalence Ratio*) จะได้ว่า

$$\phi = \frac{(m_f / m_a)_{act}}{(m_f / m_a)_{sto}} \quad (3.11)$$

เมื่อค่า $\phi = 1$ จะหมายถึง ปริมาณอากาศที่ใช้จริงเท่ากับปริมาณอากาศที่ต้องใช้ทางทฤษฎี และเรียกอัตราส่วนผสมนี้ว่า **Stoichiometric** ถ้าหาก $\phi < 1$ หมายถึง อากาศที่ใช้จริงมากกว่าปริมาณอากาศที่ต้องใช้ทางทฤษฎี ซึ่งเป็นการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินนั่นเองและเรียกอัตราส่วนผสมนี้ว่า

อัตราส่วนผสมบาง ถ้าหาก $\phi > 1$ หมายถึง อากาศที่ใช้จริงน้อยกว่าปริมาณอากาศที่ต้องใช้ทางทฤษฎี เรียกอัตราส่วนผสมแบบนี้ว่า อัตราส่วนผสมหนา

กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซ เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งมักเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆ มากมาย และผสมกันอยู่อย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกันอีกทั้งอัตราส่วนของสารต่างๆ ภายในเชื้อเพลิงแข็งยังไม่แน่นอน นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วยสารต่าง ๆ ซึ่งมีทั้งเผาไหม้ได้และไม่สามารถเผาไหม้ได้ สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้จะเรียกว่า สารเฉื่อย (inert) สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับแก๊สไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งไม่ช่วยให้เกิดการสันดาป แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ก็อาจเกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ สารเฉื่อยนี้แบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ ความชื้นและสารประกอบอนินทรีย์ที่ประกอบขึ้นเป็นขี้เถ้า สารอนินทรีย์เหล่านี้ส่วนมากจะเป็นสารจำพวกซิลิเกต (silicates) ซัลไฟด์ (sulfides) และเกลือของฮาโลเจน (Halogen salts) เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งสารเหล่านี้จะเป็นขี้เถ้า โดยที่บางส่วนจะตกอยู่ภายในห้องเผาไหม้ บางส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวออกไปกับแก๊สเสียที่เรียกว่า ขี้เถ้าปลิว (fly ash)

เชื้อเพลิงแข็งในส่วนที่เผาไหม้ได้ สามารถแยกเป็นส่วนที่ระเหยได้ (volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (nonvolatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ประกอบด้วย คาร์บอนและสารประกอบของคาร์บอน C_xH_y โดยที่ค่า x จะมากกว่าค่า y มากๆ หรือเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ นั่นเอง ส่วนสารที่ระเหยได้ในที่นี้จะหมายถึงสารประกอบที่ระเหยในช่วงของอุณหภูมิการเผาไหม้ ซึ่งจะประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ

3.6 ส่วนประกอบและปริมาณของแก๊สไอเสีย [9]

แก๊สไอเสียประกอบด้วย CO_2 , H_2O , SO_2 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง และ O_2 ในอากาศส่วนเกินที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ และ N_2 ในอากาศที่ป้อนเข้า จากตารางที่ 3.2 จะได้ว่า

ปริมาณ CO_2 ที่เกิดขึ้นเท่ากับ	$1/12 \times 22.4 \times c$	$(Nm^3/kg \text{ เชื้อเพลิง})$
หรือ	$1/12 \times 44 \times c$	$(kg/kg \text{ เชื้อเพลิง})$

ปริมาณ H_2O ที่เกิดขึ้นเท่ากับ $1/2 \times 22.4 \times h$ (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)

หรือ $1/2 \times 18 \times h$ (kg/kg เชื้อเพลิง)

ปริมาณ SO_2 ที่เกิดขึ้นเท่ากับ $1/32 \times 22.4 \times s$ (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)

หรือ $1/32 \times 64 \times s$ (kg/kg เชื้อเพลิง)

สำหรับความชื้นในเชื้อเพลิงนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้จะกลายเป็นไอน้ำ ดังนั้น

ความชื้นที่เกิดขึ้นเท่ากับ $1/18 \times 22.4 \times w$ (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)

หรือ w (kg/kg เชื้อเพลิง)

ธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิงจะกลายเป็นแก๊สไนโตรเจน ดังนั้น

ปริมาณ N_2 ที่เกิดขึ้นเท่ากับ $1/28 \times 22.4 \times n$ (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 $0.21 \times (m-1)A_0$ (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)

หรือ $0.232 \times (m-1)A_0$ (kg/kg เชื้อเพลิง)

เนื่องจากไนโตรเจนในอากาศที่ป้อนเข้าไปย่อมเหลือออกมากับแก๊สไอเสียทั้งหมด จะได้

ปริมาณ N_2 ที่ออกมาเท่ากับ $(1-0.21) \times mA_0$ (Nm^3/kg เชื้อเพลิง)

หรือ $(1-0.232) \times mA_0$ (kg/kg เชื้อเพลิง)

เมื่อรวมแก๊สทั้งหมดที่เกิดจากการเผาไหม้ ผลรวมทั้งหมดย่อมเป็นปริมาณแก๊สไอเสียอันเกิดจากการเผาไหม้ G ในหน่วยปริมาตรอากาศจะได้

$$G = 0.21 \times (m-1)A_0 + (1-0.21)mA_0 + \frac{22.4}{12} \times c + \frac{22.4}{2} \times h + \frac{22.4}{32} \times s + \frac{22.4}{18} \times w + \frac{22.4}{28} \times n$$

(Nm^3/kg เชื้อเพลิง) (3.12)

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) (3.13)

เมื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ด้วยปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี ปริมาณแก๊สเสียจากการเผาไหม้ที่ได้นี้เรียกว่า ปริมาณแก๊สไอเสียเชิงทฤษฎี แทนด้วย G_0 เพียงแต่แทนค่า $m = 1$ ลงในสมการแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้จะได้

$$G_0 = (1 - 0.21)A_0 + \frac{22.4}{12} \times c + \frac{22.4}{2} \times h + \frac{22.4}{32} \times s + \frac{22.4}{18} \times w + \frac{22.4}{28} \times n$$

(Nm³/kg เชื้อเพลิง) (3.14)

ถ้าใช้หน่วยน้ำหนักจะได้

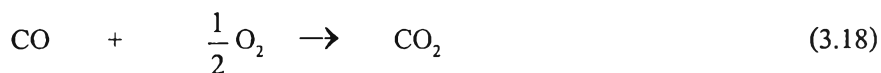
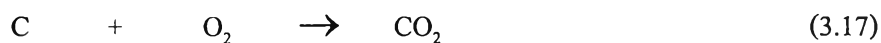
$$G_0 = (1 - 0.232)A_0 + \frac{44}{12} \times c + \frac{18}{2} \times h + \frac{64}{32} \times s + w + n$$

(kg/kg เชื้อเพลิง) (3.15)

3.7 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง [8]

กระบวนการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

1. เริ่มด้วยออกซิเจนจะสัมผัสกับผิวคาร์บอน
2. เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา
3. มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาที่ผิว
4. เกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาการเผาไหม้จะถูกเร่งได้โดยการบดเชื้อเพลิงแข็งให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการทำให้ volatile matter ระเหยออกมาได้เร็วและช่วยให้เกิดการผสมกับอากาศดีขึ้น ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้



เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับออกซิเจนจำกัด คือ จะเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อยๆ ดังนั้นจะเห็นว่า การออกแบบระบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง ควรให้มีพื้นที่ผิวสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กกลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น

เชื้อเพลิงแข็งมีสารประกอบที่เกิดการเผาไหม้แบ่งออกได้สองชนิด คือ ชนิดที่เป็นสารระเหย (Volatile matter) เช่น น้ำ ไฮโดรคาร์บอน และชนิดที่ไม่เป็นสารระเหย เช่น คาร์บอน สำหรับสารประกอบที่ไม่เกิดการเผาไหม้ ได้แก่ ความชื้น และสารประกอบอนินทรีย์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวและแก๊สหลังจากเกิดปฏิกิริยาจะให้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก มีสองสถานะคือ แก๊สและของแข็ง ซึ่งสถานะแก๊สประกอบด้วย CO , CO_2 , H_2 , O_2 , H_2O เมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิว (surface flux to volatile) ของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สดังกล่าว เกิดการเผาไหม้แบบผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันของแก๊สแต่ละชนิด ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมาก จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊ส เป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดน้อยหรือไม่เกิด ฉะนั้นจึงต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ในส่วนที่เป็นของแข็งจำพวกถ่าน จะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้น เนื่องจากแก๊สที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิยังไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หลังจากแก๊สต่างๆ เกิดปฏิกิริยา จะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยา และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (3.16) และสมการ (3.19)



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

$$q''_{\text{rad}} = \sigma \epsilon (T_w^4 - T_s^4) \quad (3.20)$$

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

$$q''_{\text{cond}} = -k \frac{dT}{dr} \quad (3.21)$$

ในกรณีที่มีการป้อนเชื้อเพลิงด้วยความเร็วที่สูง ทำให้ Re (Reynolds number) มีค่าสูงด้วย จะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพา q''_v คือ

$$q''_v = h(T_a - T_s) \quad (3.22)$$

โดยที่ T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

โดยการรวมสมการทั้งสามจะสามารถจัดอยู่ในรูปของสมดุลพลังงานของเชื้อเพลิงแข็งได้ว่า

$$\sigma \epsilon (T_w^4 - T_s^4) - k \frac{dT}{dr} + h (T_a - T_s) = 0 \quad (3.23)$$

ต่อไปจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความรู้พื้นฐานการอบแห้ง กลไกการอบแห้ง เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง และประเภทของเครื่องอบแห้ง

3.8 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง [29]

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุชิ้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย จะใช้ของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าวัสดุเป็นตัวกลางพาความร้อนให้มาสัมผัสกับวัสดุชิ้น เมื่อวัสดุชิ้นได้รับความร้อนอุณหภูมิของวัสดุก็จะเพิ่มสูงขึ้น และระเหยความชื้นออกสู่ตัวกลางที่ไหลผ่านไป ซึ่งมีผลให้ความชื้นของวัสดุลดลง การอบแห้งจะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อวัสดุชิ้นมีความชื้นสมดุลกับความชื้นของตัวกลางนั้น โดยทั่วไปแล้วตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนของการอบแห้งอาจใช้ลมร้อน ก๊าซหรือของเหลวอื่นๆ ก็ได้ พฤติกรรมของการอบแห้งโดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกันคือ เมื่ออบแห้งวัสดุชิ้นด้วยลมร้อนที่มีปริมาณมาก ซึ่งมีความชื้นและความเร็วของลมร้อนคงที่ อุณหภูมิวัสดุจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-state) ที่สภาวะนี้อุณหภูมิของวัสดุชิ้นจะคงที่ขณะเกิดการระเหย ซึ่งถ้าเป็นกรณีการอบแห้งด้วยวิธีสัมผัสกับลมร้อนโดยตรง (Direct Heating) อุณหภูมิของวัสดุชิ้นจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน แต่ถ้าเป็นการอบแห้งด้วยวิธีให้ความร้อนทางอ้อม (Indirect Heating) อุณหภูมิวัสดุชิ้นจะมีค่าอยู่บนเส้นความชื้นอิ่มตัว ช่วงระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับอุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อน ในช่วงสุดท้ายการระเหยจะเริ่มช้าลงและอุณหภูมิของวัสดุชิ้นจะสูงขึ้น

ปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุที่ต้องการอบแห้ง จะนิยามในเทอมของความชื้น (Moisture content) ซึ่งจะอยู่ในรูปอัตราส่วน ดังนี้

ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet-basis)

$$W_w = \frac{m - m_d}{m} \quad (3.24)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry-basis)

$$W_d = \frac{m - m_d}{m_d} \quad (3.25)$$

และความสัมพันธ์ระหว่าง W_w และ W_d เป็นดังนี้

$$W_w = \frac{W_d}{1 + W_d} \quad (3.26)$$

$$W_d = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (3.27)$$

เมื่อ

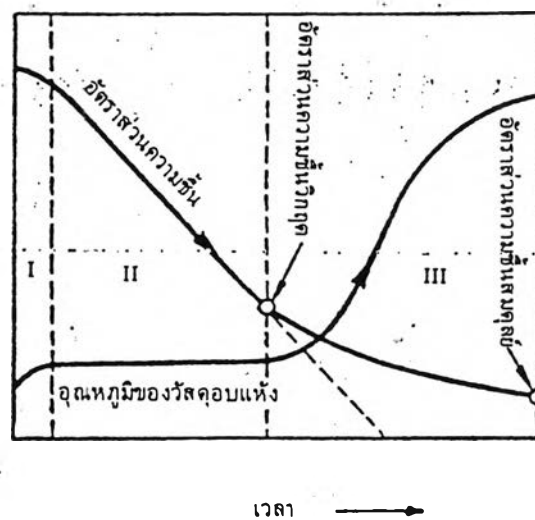
m - น้ำหนักวัสดุชิ้น, kg

m_d - น้ำหนักวัสดุแห้ง, kg

W_w - ความชื้นมาตรฐานเปียก

W_d - ความชื้นมาตรฐานแห้ง

โดยปกติแล้วการอบแห้งจะเริ่มต้นด้วยวัสดุที่มีความชื้นสูงสัมผัสกับลมร้อนด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ขึ้นอยู่กับลักษณะเครื่องอบแห้ง ทำให้วัสดุมีความชื้นลดลงเรื่อยๆ จนเข้าสู่ความชื้นสมดุลซึ่งวัสดุไม่สามารถถ่ายเทความชื้นต่อไปได้อีก ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่วางวัสดุเปียกขึ้นภายในกระแสมปริมาณมากที่มีอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมคงที่ ถ้าเราวัดการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งนี้กับเวลา จะได้เส้นกราฟดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลา

3.8.1 กลไกการอบแห้ง

โดยทั่วไปการอบแห้งวัสดุขึ้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

- ช่วงที่ 1 คือ ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ
- ช่วงที่ 2 คือ ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่
- ช่วงที่ 3 คือ ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

1. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ (Heating up period)

ในช่วงนี้ความชื้นที่ผิวของวัสดุจะอยู่ในรูปน้ำอิสระ(ผิวอิมตัว) ถ้านำวัสดุชิ้นนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่แล้ว ผลจากการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนจะทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนที่ใช้อบแห้ง

2. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ (Constant rate drying period)

เมื่อผ่านช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุแล้ว อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน ผิวของวัสดุยังอิมตัวอยู่ อุณหภูมิของวัสดุจะยังคงที่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนตราบใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ อัตราการระเหยที่ผิววัสดุมีค่าน้อยกว่าอัตราการแพร่ภายในวัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเพียงอย่างเดียว และมีความเร็วของการระเหยคงที่ขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการพาที่ผิวของวัสดุ

จาก

$$\lambda \frac{dW}{dt} = hA(T_a - T_s)$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{hA}{\lambda} (T_a - T_s)$$

อัตราการอบแห้งมีค่าเท่ากับ

$$R_d = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt} = \frac{hA}{\lambda} (T_a - T_s)$$

$$R_d = k_H (H_{sat} - H) \quad (3.28)$$

เมื่อ

- R_d - ความเร็วของการอบแห้ง (kg/s/m^2)
- dW/dt - อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุต่อเวลา (kg/s)
- h - สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{kW/m}^2\text{°C}$)
- A - พื้นที่ของวัสดุ (m^2)
- T_a - อุณหภูมิลมร้อน (°C)
- T_s - อุณหภูมิผิววัสดุ (°C)
- H - ความชื้นลมร้อน (kg/kg)
- H_{sat} - ความชื้นอิ่มตัวของลมร้อน (kg/kg)
- λ - ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (kJ/kg)
- k_H - สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (kg/s/m^2)

ความเร็วของการระเหยในช่วงนี้จะถูกควบคุมโดยเงื่อนไขภายนอกและสามารถปรับได้โดยการปรับเปลี่ยนสภาวะภายนอก เช่น ความเร็ว ความชื้น และอุณหภูมิของลมร้อน

3. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง (Falling rate drying period)

ในช่วงนี้ความชื้นของน้ำที่ผิววัสดุได้หมดไป เพราะอัตราการแพร่ภายในวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับอัตราการระเหยที่ผิววัสดุ สภาวะของอุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่จะหายไป ความร้อนที่ได้รับในช่วงนี้จะระเหยความชื้นออกจากวัสดุพร้อมกับเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วย ความเร็วของการระเหยความชื้นจึงลดลงและอุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงขึ้น ค่าความชื้นของวัสดุที่เปลี่ยนจากช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่เป็นการอบแห้งที่ความเร็วลดลงนี้ เรียกว่า ความชื้นวิกฤต W_c (Critical moisture content)

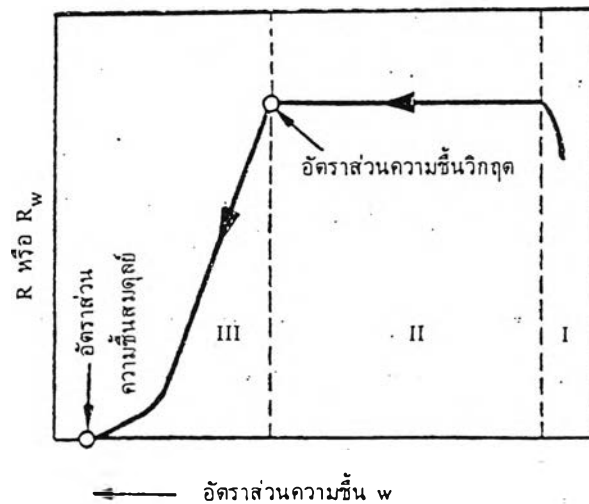
เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในไม่เพียงพอที่จะทำให้ผิวนอกของวัสดุอยู่ในสถานะอิ่มตัวได้ พื้นผิวเปียกนี้ (Plane of Evaporation) จะลดลงเรื่อยๆ จากผิวนอกเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุ เมื่อระยะเวลาของการระเหยเคลื่อนตัวถึงจุดศูนย์กลางของวัสดุ การอบแห้งก็จะสิ้นสุดลง ค่าความชื้นของวัสดุจะมีค่าเท่ากับความชื้นสมดุล W_e (Equilibrium moisture content)

ความชื้นเคลื่อนตัวจากจุดศูนย์กลางของวัสดุสู่ระยะเวลาของการระเหยโดยแรงคาпилลารี (Capillary forces) หรือโดยการแพร่ของของเหลว (Liquid diffusion)

ในกรณีของวัสดุที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่ เริ่มแรกการเคลื่อนตัวของน้ำภายในเนื้อวัสดุจะเกิดขึ้นโดยแรงคาпилลารี หลังจากนั้นที่อยู่ตามรูพรุนระเหยหมดแล้ว การเคลื่อนตัวของน้ำภายในเนื้อวัสดุจะเป็นการแพร่

ความเร็วของการระเหยในช่วงนี้จะถูกควบคุมโดยเงื่อนไขภายใน ได้แก่ รูปร่าง องค์ประกอบ และความชื้นสมดุลของวัสดุ

เส้นกราฟที่ได้จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการอบแห้งทั้ง 3 ช่วงและความชื้นของวัสดุ เรียกว่า เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

การอบแห้งวัสดุเปียกที่อยู่ในความสนใจ เราจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติอบแห้งของวัสดุนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งจำเป็นสำหรับการประเมินเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้ง แม้แต่ในกรณีที่ไม่สามารถหาเส้นกราฟนี้ได้ ข้อมูลเกี่ยวกับความชื้นสมดุล และความชื้นวิกฤต เป็นสิ่งที่ขาดเสียไม่ได้ โดยทั้งปริมาณความชื้นวิกฤตและเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งขึ้นอยู่กับลักษณะการสัมผัสระหว่างวัสดุกับลมร้อน ลักษณะของการสัมผัสขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องอบแห้ง ขนาดและรูปทรงของวัสดุอบแห้ง

ยกตัวอย่าง กรณีของวัสดุที่เป็นอนุภาค ถ้าอนุภาคทุกชิ้นอยู่กระจัดกระจายในระหว่างการอบแห้ง ดังในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic conveying dryer) หรือ แบบหมุน (Rotary dryer) ไม่เพียงแต่พื้นที่ของการอบแห้งจะเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น แต่โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนความชื้นวิกฤตจะมีค่าน้อยลง ทำให้มีช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ยาวขึ้น ผลก็คือสามารถทำการอบแห้งในเสร็จในช่วงระยะเวลาอันสั้นเพราะมีความเร็วของการระเหยสูง

ในทางตรงกันข้ามถ้าวัสดุอนุภาคนี้ถูกวางกองรวมกันเพื่ออบแห้งโดยการเป่าลมร้อนขนานกับผิวบน อัตราส่วนความชื้นวิกฤตจะมีค่าสูงกว่า และความเร็วของการอบแห้งจะลดลงอย่างมากด้วยทำให้ใช้เวลาอบแห้งนานกว่า

3.8.2 ทฤษฎีการแพร่ของของเหลว (Liquid diffusion theory)

พิจารณาการเคลื่อนที่ของความเข้มข้นภายในเนื้อวัสดุเป็นการแพร่ของของเหลว เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำระหว่างอากาศและผิวของวัสดุ อธิบายโดยสมการการแพร่ที่สภาวะไม่คงตัว (Unsteady-state diffusion equation) ในระบบแกนมุมฉาก

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]$$

สมการระบบนี้จะใช้พิจารณาวัสดุที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (long slab) ส่วนวัสดุที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและทรงกระบอกจะใช้สมการในระบบแกนทรงกระบอกและแกนทรงกลมแทน สำหรับผลเฉลยทั่วไปของสมการในระบบแกนมุมฉาก คือ

$$\frac{W - W_e}{W_i - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-Dt \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \right] + \frac{1}{9} \exp \left[-9Dt \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \right] + \frac{1}{25} \exp \left[-25Dt \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \right] + \dots \quad (3.29)$$

เมื่อ

- l - ความหนาของวัสดุ
- W - ความชื้นของวัสดุ
- W_i - ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ
- W_e - ความชื้นสมดุลของวัสดุ
- t - เวลา

กรณีที่ 1 มีค่าน้อยๆ และ D มีค่ามาก ผลรวมของเทอมที่ 2, 3, ... มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมที่ 1 สมการที่ 3.29 จะลดรูปเป็น

$$\frac{W - W_e}{W_i - W_e} = a \exp(-kt) \quad (3.30)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} a &= 1 \\ k &= \text{drying constant} \\ &= D \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \\ t &= \text{เวลา} \end{aligned}$$

นักวิจัยหลายคนได้พัฒนา Empirically Based Equations เมื่อสมการที่ 3.30 ให้ผลไม่สอดคล้องกับการทดลอง โดยใช้วิธี Curve-fitting

Page ได้ทดลองอบแห้ง shell corn พบว่าจำเป็นต้องเพิ่มตัวแปร n ในสมการที่ 3.30 เพื่อให้ได้ผลสอดคล้องกับการทดลอง

$$\frac{W - W_e}{W_i - W_e} = \exp(-kt^n) \quad (3.31)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} k &= \text{drying constant} \\ t &= \text{เวลา} \end{aligned}$$

Uckan และ Ulku ได้เสนอสมการของการอบแห้งข้าวโพดเพื่อให้ได้ผลสอดคล้องกับการทดลองของเขา

$$t = A \ln \frac{W - W_e}{W_i - W_e} + B \left(\ln \frac{W - W_e}{W_i - W_e} \right)^2 \quad (3.32)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} t &= \text{เวลา} \\ A &= 0.00514289 T - 0.785175 \\ B &= 12.038105 \exp(-0.0527455 T) \end{aligned}$$

และ Wang ได้เสนอสมการกำลังสองสำหรับการอบแห้งข้าวเมล็ดยาว ดังนี้

$$\frac{W - W_e}{W_i - W_e} = 1 + A_1 t + B_1^2 t \quad (3.33)$$

3.9 ประเภทของเครื่องอบแห้ง [30]

การอบแห้งสามารถแบ่งตามลักษณะของเบด (bed) ได้เป็น 4 แบบ คือ

1. Static เบดลักษณะนี้วัสดุจะถูกลงกวมกันบนถาด (dense bed) โดยลมร้อนจะถูกเป่าผ่านทางด้านบน ยกตัวอย่างเช่น เครื่องอบแห้งแบบ tray dryer ดังรูปที่ 3.3

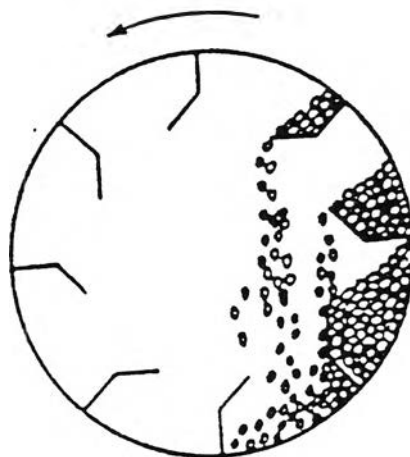
2. Moving เบดลักษณะนี้วัสดุจะค่อนข้างกระจายตัว โดยการกระทำของกลไก (mechanism) และแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้การอบแห้งดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เครื่องอบแห้งแบบโรตารี ดังรูปที่ 3.4

3. Fluidized เบดลักษณะนี้วัสดุจะลอยตัวขึ้นลงกระจัดกระจายอยู่ในกระแสลมร้อนอย่างไม่คงตัว (unstable) เพราะความเร็วของลมร้อนไม่เพียงพอที่จะยกวัสดุทั้งหมดให้ลอยไปกับกระแสลมร้อนได้ โดยวัสดุจะมีพฤติกรรมคล้ายของไหล และความเร็วลมร้อนต่ำสุดที่ทำให้เกิด fluidized bed นี้เรียกว่า minimum fluidization velocity ยกตัวอย่างเช่น เครื่องอบแห้งแบบ fluidized bed ดังรูปที่ 3.5

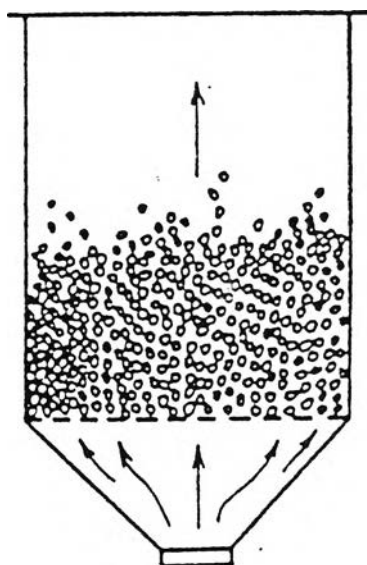
4. Dilute เบดลักษณะนี้วัสดุจะกระจัดกระจายอย่างสมบูรณ์ในกระแสลมร้อน โดยความเร็วของลมร้อนมีค่ามากกว่า terminal settling velocity ทำให้วัสดุทั้งหมดถูกยกและขนส่งไปตามกระแสลมร้อนอย่างต่อเนื่อง ยกตัวอย่างเช่น เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ดังรูปที่ 3.6



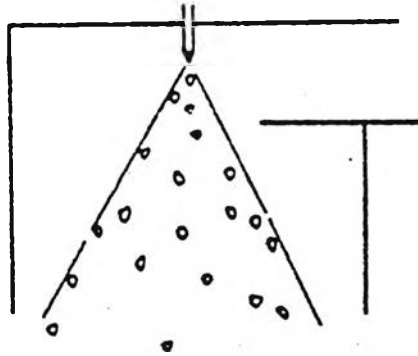
รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบ tray dryer



รูปที่ 3.4 เครื่องอบแห้งแบบ rotary dryer with lifters



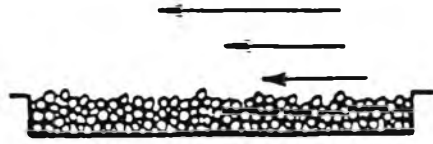
รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งแบบ fluidized bed dryer



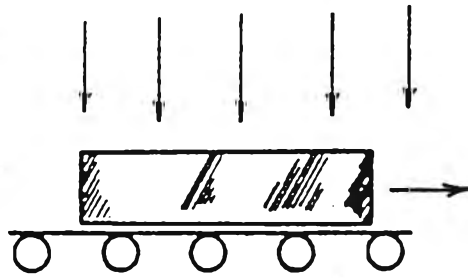
รูปที่ 3.6 เครื่องอบแห้งแบบ Spray dryer

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามลักษณะการสัมผัสกันระหว่างวัสดุและลมร้อน หรือลักษณะการไหลของลมร้อนได้ ดังนี้

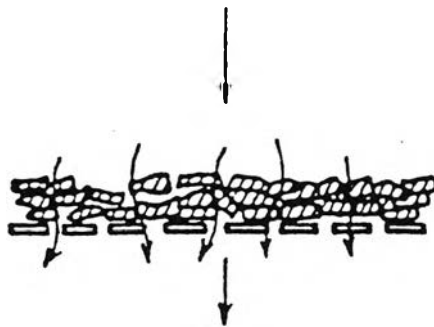
1. Parallel flow ลมร้อนไหลขนานกับผิวด้านบนของกองวัสดุ วัสดุจะสัมผัสกับลมร้อนที่บริเวณผิวด้านบนเป็นส่วนใหญ่ และมีลมร้อนบางส่วนลอดเข้าไปภายในกองวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 การสัมผัสลักษณะนี้จะเกิดใน static bed
2. Perpendicular flow ลมร้อนจะไหลตั้งฉากกับผิวของกองวัสดุ เช่นเดียวกับการสัมผัสลักษณะนี้จะเกิดใน static bed ดังแสดงในรูปที่ 3.8
3. Through circulation ลมร้อนจะไหลทะลุผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุ การสัมผัสลักษณะนี้จะเกิดขึ้นได้ทั้ง static bed, moving bed, fluidized bed และ dilute bed ดังแสดงในรูปที่ 3.9
4. Concurrent flow ลมร้อนไหลในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของวัสดุ ดังรูปที่ 3.10
5. Countercurrent flow ลมร้อนไหลในทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของวัสดุ
6. Cross flow ลมร้อนไหลตัดผ่านการเคลื่อนที่ของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



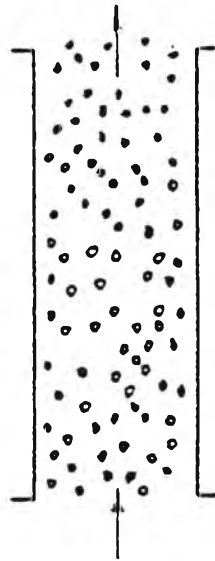
รูปที่ 3.7 Parallel flow



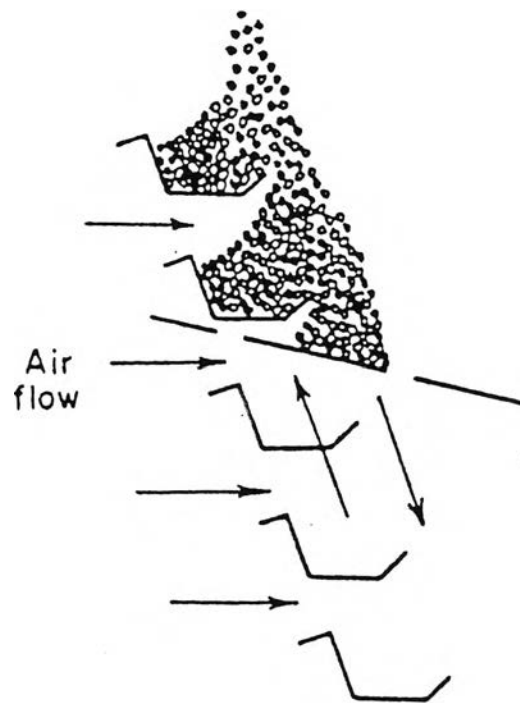
รูปที่ 3.8 Perpendicular flow



รูปที่ 3.9 Through circulation



รูปที่ 3.10 Concurrent flow



รูปที่ 3.11 Cross flow