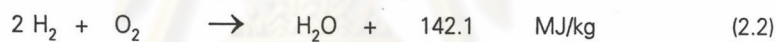


2.1 ทฤษฎีการเผาไหม้ ( Combustion theory ) [3]

การเผาไหม้ หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ ( combustion element ) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งๆ สารเผาไหม้โดยหลักๆแล้วจะมี คาร์บอน , ไฮโดรเจน และ กำมะถัน สำหรับกำมะถัน ขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ ความร้อนไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ คาร์บอนและไฮโดรเจน ในทางตรงกันข้ามกับเพิ่มปัญหา ในด้านการกัดกร่อนชิ้นส่วน หรือ อุปกรณ์ รวมทั้งทำให้เกิดปัญหาของมลพิษในอากาศ

สำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของ คาร์บอน และ ไฮโดรเจนกับออกซิเจนนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



การเผาไหม้ เชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการคือ

- 1 . เวลาต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้หมด
- 2 . อุณหภูมิในการเผาไหม้ต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ อย่างต่อเนื่องได้
- 3 .การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศต้องอยู่ในลักษณะของการไหลผสมแบบ ปั่นป่วน

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ภายใต้การทำให้สารที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงนั้นเย็นลง ถึงอุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศและเชื้อเพลิงนั้นมีหน่วยเป็น KJ/kg หรือ MJ/kg ของเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็น ค่าความร้อนสูง ( HHV ) และค่าความร้อนต่ำ ( LHV ) กรณีวิเคราะห์โดยมีไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ นั้นควบแน่นจะได้ HHV และถ้าไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ระเหยตัวจะได้ LHV ความสัมพันธ์ระหว่าง 2 เทอมคือ

$$LHV = HHV - m_w h_{fg} \quad (2.3)$$

$$LHV = HHV - 9 m_{H_2} h_{fg} \quad (2.4)$$

โดยที่  $m_w$  = มวลของไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ต่อ 1 หน่วยมวลของเชื้อเพลิง เนื่องจาก การเผาไหม้ของ H ในเชื้อเพลิง  $m_{H_2}$  = มวลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง 1 kg ซึ่งวิเคราะห์จาก

( Ultimate Analysis คือการวิเคราะห์ องค์ประกอบของเชื้อเพลิง ในห้องทดลองเพื่อต้องการทราบ %C , %H , %O , %N , %S , %ash ) และ  $h_{fg}$  คือ ค่าความร้อนแฝง ของการระเหย หรือ ค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นของไอน้ำ ที่ความดันย่อยในสารที่ได้จากการเผาไหม้

ถ้าเราทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ( C , H , O , S ) HHV ( Dulong 's equation ) MJ/kg

$$\text{HHV} = 33.7C + 144(H - O/8) + 9.4 S \quad (2.5)$$

### 2.1.1 อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิง

อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงก็คือ อัตราส่วนระหว่าง มวล ( หรือ จำนวนโมล ) ของอากาศต่อ มวล ( หรือจำนวนโมล ) ของเชื้อเพลิงในระหว่างการเผาไหม้ทั่วไป แบ่งออกเป็นอัตราส่วน อากาศกับ เชื้อเพลิงทางเชิงทฤษฎี (  $AF_{\text{theo}}$  ) และอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงจริง (  $AF_{\text{actual}}$  )

โดยที่  $AF_{\text{theo}}$  คำนวณจาก

$$AF_{\text{theo}} = \frac{\text{น้ำหนักของอากาศ}}{\text{น้ำหนักของเชื้อเพลิง}} \quad (2.6)$$

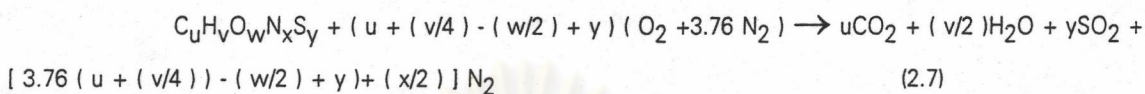
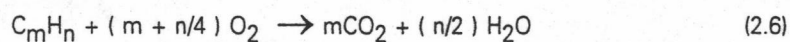
ส่วนที่ช่วยในการเผาไหม้ ( ตัวออกซิไดซ์ ) ก็คือ ออกซิเจน ส่วนที่เหลือจัดอยู่ในกลุ่มของ ไนโตรเจน , ก๊าซเฉื่อย และความชื้นในอากาศ เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของ ส่วนที่เหลือนี้ จะเป็น ไนโตรเจนโดยส่วนใหญ่

องค์ประกอบของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

องค์ประกอบ	% องค์ประกอบ	
	by Volume	by Mass
ออกซิเจน ( $O_2$ )	21	23
ไนโตรเจน( $N_2$ )	79	77
$O_2 / N_2$	1:3.76	1:3.35

ในการเผาไหม้จริง จะใช้อากาศในปริมาณที่มากกว่าอากาศที่ ทำปฏิกิริยา พอดีในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทางทฤษฎี ( stoichiometric air ) และจะบอก ปริมาณการใช้อากาศ เป็นจำนวนเท่าของอากาศที่พอดี ในการเผาไหม้สมบูรณ์

การเผาไหม้แบบ สโตยคิโอเมตริก ( stoichiometric ) คือการเผาไหม้สมบูรณ์ทางทฤษฎีที่มีอัตราส่วน  
ผลระหว่าง ออกซิเจนและเชื้อเพลิง โดยออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเชื้อเพลิงได้หมดพอดี ในกรณี  
ของเชื้อเพลิงใดๆที่มีส่วนประกอบของ คาร์บอน ( C ), ไฮโดรเจน ( H<sub>2</sub> ) , ออกซิเจน ( O<sub>2</sub> ) , ไนโตรเจน ( N ) และ  
กำมะถัน ( S ) ดังมีสมการการเผาไหม้ดังนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การคำนวณหาปริมาณของอากาศที่ใช้ทำปฏิกิริยาพอดีกับผงแป้งมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัม  
( ผงแป้งมันสำปะหลังที่วิจัยนี้ได้ซื้อจากบริษัท ชลธนาค้าแป้ง ในราคา กิโลกรัมละ 9 บาท ซึ่งปกติจะใช้ในการ  
การประกอบอาหาร ) โดยที่ผงแป้งมันสำปะหลังมีส่วนประกอบดังนี้

ABB COMPOSITION SYSTEMS AND SERVICES DIVISIONS

FUEL ANALYSIS REPORT

SAMPLE ID : CASSAVA FLOUR

DATE 02/ 08/94

ANALYSIS	AS RECEIVED	MOISTURE FREE 105 C	DRY ASH FREE
PROXIMATE ANALYSIS( wt. % )			
Moisture ( total 0	11.78	-	-
Ash	4.46	5.06	
Volatile Matter	69.85	79.18	83.39
Fixed Carbon ( difference )	13.91	15.76	16.61
Total	100.00	100.00	100.00
ULTIMATE ANALYSIS ( wt. % )			
Moisture	11.78	-	-
Ash	4.46	5.06	-
Carbon	38.29	43.40	45.71
Hydrogen	5.36	6.08	6.40
Sulfur	0.02	0.02	0.02
Nitrogen	0.13	0.15	0.16
Oxygen ( difference )	39.96	45.29	47.71
Total	100.00	100.00	100.00
CALORIFIC ANALYSIS			
Kcal/Kg	3535	4007	4220
BTU/lb	6363	7213	7597

ที่มา ABB COMPOSITION SYSTEMS AND SERVICES DIVISIONS  
ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของผงแป้งมันสำปะหลัง





ถ้านำผงแป้งมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัม มาทดสอบ ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการเผาไหม้คาร์บอนในผงแป้งมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัมคือ

$$(38.29 \times 32) / (100 \times 12) = 1.021 \text{ Kg}$$

โดยที่มวลโมเลกุลของ คาร์บอน (C) คือ 12 , มวลโมเลกุลออกซิเจนคือ 32

ในทำนองเดียวกันสำหรับการเผาไหม้ ไฮโดรเจน H<sub>2</sub> ปริมาณของออกซิเจนที่ต้องการในการเผาไหม้ H<sub>2</sub> ในผงแป้งมันสำปะหลัง 1.0 Kg คือ



$$(5.36/100) \times (16/2) = 0.4288 \text{ Kg}$$

สำหรับการเผาไหม้ ซัลเฟอร์ S ปริมาณ oxygen ที่ต้องการคือ



$$(0.02/100) \times (32/32) = 2 \times 10^{-4} \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณที่ต้องการออกซิเจนทั้งหมดคือ} &= 1.021 + 0.4288 + 2 \times 10^{-4} \\ &= 1.45 \text{ Kg} \end{aligned}$$

คือใช้ oxygen 1.45 Kg ต่อผงแป้งมันสำปะหลัง 1 Kg แต่ในผงแป้งมันสำปะหลัง 1 Kg มี O<sub>2</sub> อยู่แล้ว 0.3996 Kg ดังนั้นความต้องการ oxygen ที่แท้จริงจะได้เป็น (1.45 - 0.3996) = 1.0504 Kg ต่อผงแป้งมันสำปะหลัง 1 Kg ในอากาศจะมี oxygen อยู่ 23 % โดยน้ำหนัก

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นน้ำหนักอากาศที่ต้องการใช้คือ} &= 1.0504 \times 100/23 \\ &= 4.567 \text{ Kg ต่อผงแป้งมันสำปะหลัง 1 Kg} \end{aligned}$$

น้ำหนักโมเลกุลของอากาศโดยเฉลี่ยคือ 29 ความหนาแน่นของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (101.3 KN/m<sup>2</sup> และ 273 K) 29 = 1.29 kg/m<sup>3</sup>

ดังนั้นปริมาตรของอากาศที่ต้องการในการสันดาปคือ

$$4.567/1.29 = 3.54 \text{ m}^3 \text{ ต่อผงแป้งมันสำปะหลัง 1 Kg}$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 เชื้อเพลิง หมายถึง สารที่เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศที่อุณหภูมิติดไฟแล้ว จะเผาไหม้ให้พลังงานความร้อนออกมา โดยมีธาตุองค์ประกอบที่สำคัญของเชื้อเพลิงคือ ธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจน เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนในอากาศ จะได้ก๊าซ  $CO_2$  และ น้ำ

#### 2.1.2.1 ลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิงที่ดีคือ

- 1) เชื้อเพลิงที่สามารถถูกเผาไหม้ได้ง่าย และสามารถควบคุมการเผาไหม้ได้
- 2) มีค่าความร้อนสูง
- 3) ราคาไม่แพง
- 4) เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วให้สารมลพิษในระดับต่ำ
- 5) ง่ายต่อการลำเลียง , ขนส่งและการเก็บรักษา
- 6) มีความปลอดภัยทั้งเวลาใช้และการเก็บรักษา



#### 2.1.2.2 ประเภทของเชื้อเพลิง [4]

เชื้อเพลิงที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ

2.1.2.2.1 เชื้อเพลิงแข็ง ( Solid fuel ) หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ ธาตุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประเภทนี้ประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน ซัลเฟอร์ และ ความชื้น เชื้อเพลิงแข็งอาจแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

- 1) เชื้อเพลิงจากธรรมชาติโดยตรง ได้แก่ ไม้ฟืน , ถ่านหิน , หินน้ำมัน
- 2) เชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตขึ้นมา เช่น ถ่านไม้ , ถ่านโคก
- 3) เชื้อเพลิงแข็งที่เป็นผลพลอยได้จากผลิตภัณฑ์การเกษตร ได้แก่ ชี้อย่อย , มันสำปะหลัง , กากอ้อย , กากปาล์ม

2.1.2.2.2 เชื้อเพลิงเหลว ( Liquid fuel ) เป็นเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ให้ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงสูง เช่น น้ำมัน แกสโซลีน , น้ำมันก๊าด และน้ำมันเตา

2.1.2.2.3 ก๊าซเชื้อเพลิง ( Gaseous fuel ) หมายถึงเชื้อเพลิงที่มีลักษณะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิปกติ เช่น ก๊าซธรรมชาติ , ก๊าซหุงต้ม ( LPG ) และก๊าซชีวภาพ



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
- 3) เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม ( Industrial wastes ) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล เช่น กากอ้อย , กากสัปรด
- 4) เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน ( Domestic Wastes ) เช่น ขยะของเทศบาล

### 2.1.2.3 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

กรณีของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว องค์ประกอบส่วนใหญ่คือ C , H , และ S นอกจากนั้นอาจจะมี N และ O ส่วนเชื้อเพลิงก๊าซมีองค์ประกอบ พื้นฐานของ  $C_mH_n$

การควบคุมปริมาณอากาศเกินพอนี้ นับว่า เป็นเรื่องสำคัญยิ่งต่อประสิทธิภาพทางความร้อน ของ หัวเผา กล่าวคือ ถ้าปริมาณของอากาศเกินพอนี้มากเกินไป จะทำให้อุณหภูมิในหัวเผามีค่าลดลง และมีความร้อนสูญเสียเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณอากาศเกินพอนี้น้อยเกินไป อากาศ และเชื้อเพลิงไม่สามารถผสมกันอย่างทั่วถึง ขณะเผาไหม้จะมีเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้หลงเหลืออยู่ ในส่วนของเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ก็คือ พลังงานสูญเสียเปล่า กำมะถันในเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (  $SO_2$  ) และ  $SO_2$  นี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่เหลือ ในกรณีที่ใช้อากาศเกินพอนในการเผาไหม้กับเชื้อเพลิง ซึ่งจะได้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (  $SO_3$  ) เมื่อ  $SO_3$  รวมตัวกับความชื้นจะได้ไฮดรอกซิมะถัน (  $H_2SO_4$  ) ถ้าอุณหภูมิของก๊าซไอเสียลดลงต่ำถึง จุดเริ่มกลั่นตัวของไฮดรอกซิมะถัน ไฮดรอกซิมะถันจะกลั่นตัวลงพื้นผิวโลหะ และกัดกร่อน อุปกรณ์ที่ใช้ประโยชน์ จากก๊าซไอเสียนั้นในการออกแบบอุปกรณ์ ใช้ก๊าซไอเสียอุ่นอากาศหรืออุ่นน้ำเลี้ยงจะต้องคำนึงถึง อุณหภูมิจุดเริ่มกลั่นตัวของไฮดรอกซิมะถัน เป็นสิ่งสำคัญ

#### 2.1.2.4 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Calorific Value) [4]

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน กำมะถัน ซัลเฟอร์ และกำมะถัน ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีธาตุประกอบตามที่กล่าวมาข้างต้นแตกต่างกันไปตามลักษณะและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงนั้นๆ

ถ้าให้  $c$  เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 Kg

$h$  เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง 1 Kg

$o$  เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุออกซิเจนในเชื้อเพลิง 1 Kg

$s$  เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุกำมะถันในเชื้อเพลิง 1 Kg

$w$  เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำ ( ความชื้น ) ในเชื้อเพลิง 1 Kg

HHV เป็นค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง ( kcal )

และ LHV เป็นค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง ( kcal )

เราสามารถคำนวณหาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงได้จากสมการ

$$HHV = 8080c + 34200(h - o/8) + 2500s \quad (\text{kcal/kg}) \quad (2.11)$$

เมื่อเทอม 8080 เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของธาตุคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 Kg เทอม 34200  $h$  เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาของธาตุไฮโดรเจนแล้วได้น้ำ แต่เนื่องจากในเชื้อเพลิงอาจจะมีธาตุออกซิเจนประกอบอยู่ด้วยซึ่งออกซิเจนในส่วนนี้จะรวมกับไฮโดรเจนเป็นความชื้นที่แฝงอยู่ในเชื้อเพลิง นอกเหนือจากความชื้นทั่วไป ปฏิกิริยาเคมีในส่วนนี้จึงไม่ให้ความร้อน ออกซิเจน 8 Kg จะรวมตัวไฮโดรเจน 1 Kg ได้น้ำ 9 Kg ดังนั้นจึงต้องนำเทอม  $o/8$  มาหักออกจาก  $h$  เพื่อที่จะได้ปริมาณของไฮโดรเจนที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และให้ความร้อนออกมา จริง เทอม 2500  $s$  เป็นปริมาณ ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยา ของกำมะถันกับออกซิเจน

ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงคำนวณได้จากสมการ

$$LHV = 8080c + 28800(h - o/8) + 2500s - 540(9o/8 + w) \quad (\text{kcal/Kg}) \quad (2.12)$$

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



ถ้าให้  $A_0$  เป็นปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีที่ต้องใช้ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้วเราสามารถคำนวณหา  $A_0$  ได้จากสมการ

$$A_0 = (1/0.232) [ (1/12) \times 32 \times c + (1/2) \times (32/2) \times (h - o/8) + (1/32) \times 32 \times s ]$$

( kg.AIR/kg.fuel ) (2.13)

สมการข้างต้นคำนวณหาปริมาณอากาศในหน่วยน้ำหนัก โดยเทียบจากปริมาณของ  $O_2$  ที่ธาตุต่างๆ จะต้องใช้เพื่อให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากในอากาศมีอัตราส่วนของ  $O_2$  0.232 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงต้องคูณด้วยเทอม  $(1/0.232)$  ส่วนเทอม  $(1/12) \times (32/2) \times (h - o/8)$  เป็นปริมาณของ  $O_2$  ที่ธาตุไฮโดรเจนต้องการเชิงทฤษฎี โดยหักปริมาณของออกซิเจนที่มีอยู่ในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงออก ( ในเทอมของไฮโดรเจน ) และเทอม  $(1/32) \times 32 \times s$  เป็นปริมาณ  $O_2$  ที่ธาตุกำมะถันต้องการเชิงทฤษฎี เมื่อต้องการคำนวณหาปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีในหน่วยปริมาตรของอากาศก็จะได้สมการเป็น

$$A_0 = (1/0.21) [ (1/12) \times 22.4 \times c + (1/2) \times (22.4) \times (h - o/8) + (1/32) \times 22.4 \times s ]$$

(  $m^3$ . air / kg.fuel ) (2.14)

เมื่อเทอม  $(1/0.21)$  เป็นการคิดเทียบจากปริมาตรของ  $O_2$  ที่ธาตุต่างๆต้องการใช้ในการเผาไหม้เชิงทฤษฎี เนื่องจากในอากาศมีอัตราส่วนของ  $O_2$  0.21 โดยปริมาตรเทอม  $(1/12) \times 22.4 \times c$  เป็นปริมาตรของ  $O_2$  ที่ธาตุคาร์บอนต้องการเชิงทฤษฎี เทอม  $(1/2) \times (22.4/2) \times (h - o/8)$  เป็นปริมาตรของ  $O_2$  ที่ธาตุไฮโดรเจนต้องการเชิงทฤษฎีโดยหักปริมาณของออกซิเจนในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงออก ( ในเทอมของออกซิเจน ) และเทอม  $(1/32) \times 22.4 \times s$  เป็นปริมาตรของ  $O_2$  ที่ธาตุกำมะถันต้องการเชิงทฤษฎีในการเผาไหม้สมบูรณ์

ในกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในหัวเผานั้น เป็นการยากที่จะผสมเชื้อเพลิงและอากาศให้สม่ำเสมออย่างทั่วถึงในส่วนที่เผาไหม้ของหัวเผา โดยการป้อนปริมาณอากาศให้เท่ากับปริมาณอากาศที่เชื้อเพลิงต้องการตามทฤษฎี ดังนั้นจึงต้องป้อนอากาศเข้าไปในห้องเผาไหม้ในปริมาณที่มากกว่าปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีเล็กน้อย อัตราส่วนของปริมาณอากาศที่ใช้จริงต่อปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี เรียกว่าอัตราส่วนอากาศ

ถ้าให้  $m$  แทนอัตราส่วนอากาศ และ  $A$  แทนปริมาณของอากาศที่ใช้จริง จะได้ว่า  $m = A/A_0$  หรือ  $A = mA_0$  ปริมาณอากาศส่วนที่เกินคือ  $(m-1)A_0$  และอัตราส่วนอากาศส่วนเกินคือ  $(m-1)$  หรือ % อากาศส่วนเกินคือ  $(m-1) \times 100 \%$

การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้มากกว่าที่ต้องการตามทฤษฎี เพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์นั้น อาจช่วยเพิ่มการสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซเสีย และอาจทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดลง ซึ่งมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังพื้นผิวรับความร้อน นอกจากนี้ปริมาณอากาศส่วนเกินจะก่อให้เกิด  $(NO_x)$  ซึ่งเป็นมลภาวะที่สำคัญตัวหนึ่ง และหากเชื้อเพลิงประกอบด้วยกำมะถันก็จะเกิดเป็น  $SO_3$  แล้วในที่สุดก็กลายเป็น  $H_2SO_4$  ซึ่งจะกัดกร่อนพื้นผิวของอุปกรณ์ในระบบ ดังนั้นจึงควรลดปริมาณอากาศส่วนเกินให้เหลือน้อยที่สุด โดยที่ยังเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ได้

### 2.1.3 ตัวประกอบที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ [5]

2.1.3.1 ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามส่วนประกอบของเชื้อเพลิง เช่นมี ไฮโดรเจน และ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ปริมาณเท่าไร เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จะมีน้ำในปริมาณหนึ่ง ส่วนปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอากาศจะมีผลน้อยมากอาจไม่คำนึงถึง แต่ผลเนื่องจากการสูญเสียความร้อนแฝง เพื่อทำให้น้ำกลายเป็นไอมีค่าสูงนั้น จะส่งผลกระทบต่ออัตราการเผาไหม้

2.1.3.2 อากาศส่วนเกิน ( Excess air ) เป็นปริมาณที่ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ แต่ก็ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน เนื่องจากความร้อนสัมผัสเพิ่มขึ้น การสูญเสียความร้อนสัมผัสไปกับแก๊สเสีย จะมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิของแก๊สสูงขึ้น การที่ใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินมากขึ้น จะเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์การเผาไหม้ต่ำลง และแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ จะมีอุณหภูมิต่ำลงด้วย ซึ่งจะมีผลให้มีการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นในอุปกรณ์ลดลง แต่จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน ดังนั้นการสูญเสียความร้อนในแก๊สเสีย เนื่องจากอากาศส่วนเกินจึงเป็นปริมาณที่ต้อง พิจารณาถึงระดับของปริมาณอากาศส่วนเกิน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง โดยการพิจารณาถึงความสามารถในการผสม ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงภายในอุปกรณ์การเผาไหม้

2.1.3.3 อัตราส่วนผสม ( Mixture Ratio ) การเผาไหม้เชื้อเพลิงต้องใช้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยา ก็เป็นการยากที่จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว การเผาไหม้จึงใช้อากาศเข้าทำปฏิกิริยา ดังนั้นปริมาณอากาศจึงมีความสำคัญซึ่งจะส่งผลให้มีปริมาณของออกซิเจน เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง (  $m_a/m_f$  ) และเชื้อเพลิงกับอากาศ (  $m_f/m_a$  ) เมื่อกำหนดให้  $\phi$  หมายถึง อัตราส่วนผสมมูล ( Equivalence Ratio ) จะได้

$$\phi = \frac{(m_f/m_a)_{act}}{(m_f/m_a)_{sto}} \quad \text{or} \quad \phi = \frac{(m_a/m_f)_{act}}{(m_a/m_f)_{sto}} \quad (2.15)$$

### 2.1.4 ขอบเขตการเกิดเปลวไฟ

การที่ของผสมสามารถติดไฟได้ จะต้องมีส่วนผสมในอัตราส่วนความเข้มข้น อยู่ใน ช่วงหรือขอบเขตที่เหมาะสมระหว่าง ออกซิเจนกับเชื้อเพลิง ที่สามารถเกิดเปลวไฟ ขอบเขตนี้ครอบคลุมด้วยขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟสูงสุดและต่ำสุด ในภาพแสดงถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว

ช่วงที่สามารถเกิดเปลวไฟจะกว้างหรือแคบ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศ
2. ปริมาณของแก๊สอื่นนอกจากออกซิเจน เช่น ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ เป็นต้น
3. ความเข้มข้นของแก๊สเฉื่อย
4. ทิศทางการแผ่ของเปลวไฟ
5. ความดันและอุณหภูมิของส่วนผสม
6. อัตราส่วนผสม ( Mixture ) ความปั่นป่วน ( Turbulence )
7. การออกแบบอุปกรณ์สำหรับปฏิกิริยาหรือห้องเผาไหม้



อัตราส่วนสมมูลในการเผาไหม้จริง ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ อาจจะมีมากกว่าหรือน้อยกว่าทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่า ปริมาณอากาศทางทฤษฎีจะเรียกว่าอัตราส่วนผสมบาง (Lean Mixture) ตรงกันข้ามถ้าหากปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่าอัตราส่วนผสมหนา (Rich Mixture) เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของ อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง ( $m_a/m_f$ ) หรืออัตราส่วนของเชื้อเพลิงต่ออากาศ ( $m_f/m_a$ ) และอัตราส่วนสมมูลจะหมายถึง

$$\phi = \frac{(m_f/m_a)_{act}}{(m_f/m_a)_{sto}} \quad \text{หรือ} \quad \phi = \frac{(m_a/m_f)_{act}}{(m_a/m_f)_{sto}} \quad (2.16)$$

และเมื่อค่า  $\phi = 1$  จะหมายถึง ปริมาณอากาศที่ใช้จริงเท่ากับ ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ทางทฤษฎี และเรียกอัตรส่วนผสมนี้ว่า stoichiometric ค่า  $\phi$  ที่ได้จากสมการที่ 2 และที่ 3 จะมีความหมายแสดงถึงการเผาไหม้ อัตราส่วนผสมหนาหรือบางหรือพอดี

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้อยู่ทั่วไปมีหลายชนิด เช่น ถ่านไม้ ถ่านหิน ฟืน ชีเสื่อย เป็นต้น ขบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะมีความแตกต่างไปจาก เชื้อเพลิงเหลวหรือแก๊ส เนื่องจาก คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง มักเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆมากมาย และผสมกันอยู่อย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกันนัก อีกทั้งอัตราส่วนของสารต่างๆ ภายในเชื้อเพลิงแข็งยังไม่แน่นอน นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับ ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วยสารต่างๆ ซึ่งมีทั้งเผาไหม้ได้ และไม่สามารถเผาไหม้ได้ สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้จะเรียกว่า สารเฉื่อย (inert) สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับ ก๊าซไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งไม่ช่วยให้เกิดการสันดาบ แต่ในบางครั้งสาร เฉื่อยเหล่านี้ ก็อาจเกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ

สารเฉื่อยที่ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ความชื้นและสารประกอบอนินทรีย์ที่ประกอบขึ้นเป็นซีเมนต์ สารอนินทรีย์เหล่านี้ส่วนมากจะเป็นสารจำพวก ซิลิเกต (Silicates) ซัลไฟด์ (Sulfides) และเกลือของฮาโลเจน (Halogen Salts) เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งสารเหล่านี้จะกลายเป็นซีเมนต์ โดยที่บางส่วนจะตกอยู่ภายในห้องเผาไหม้ บางส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวออกไปกับแก๊สเสียหรือเรียกว่าซีเมนต์ปลิว (Fly Ash)

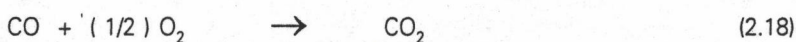
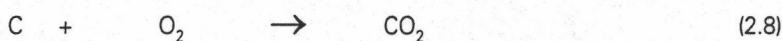
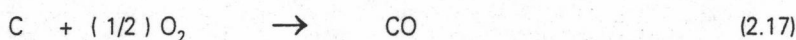
เชื้อเพลิงแข็งในส่วนที่เผาไหม้ได้สามารถแยกได้เป็นส่วนที่ระเหยได้ (Volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (Nonvolatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ประกอบด้วย คาร์บอน และ สารประกอบของคาร์บอน  $C_xH_y$  โดยที่ค่า  $x$  จะมากกว่าค่า  $y$  มากๆหรือเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง ส่วนสารระเหยได้ในที่นี้จะหมายถึง สารประกอบที่ระเหยในช่วงของอุณหภูมิการเผาไหม้ ซึ่งจะประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ

หลักการในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้น โดยจะเกิดขบวนการ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในช่วงของ Solid Phase และแก๊สเฟส (Gas Phase) ในขบวนการไพโรไลซิส สารที่ระเหยได้ในเชื้อเพลิง จะระเหยออกมาจากผิวของอนุภาคเชื้อเพลิง และผสมกับอากาศรอบๆเกิดการเผาไหม้ขึ้นซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า การเผาไหม้ช่วงแรก (Primary Combustion) หลังจากเผาไหม้แล้วยังมีบางส่วนที่ยัง



เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เมื่อมาพบกับอากาศส่วนที่สอง ( Secondary Air ) จะเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ต่อไป และออกมาเป็นก๊าซเสียในที่สุด

ในส่วนของสารที่ไม่ระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็งเช่น คาร์บอน เมื่อเกิดขบวนการเผาไหม้ ออกซิเจนจะเข้าไปสัมผัสกับผิวของคาร์บอน ตามขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

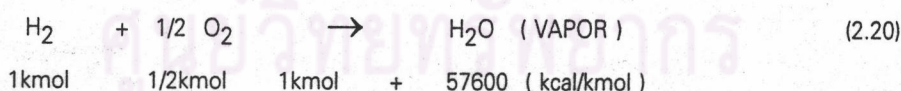
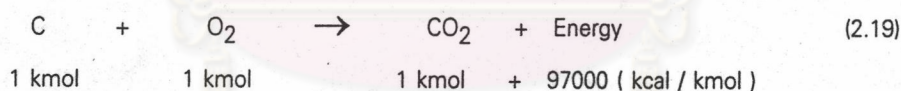


อัตราของการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงแข็งนี้จะได้รับการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีมากที่สุด

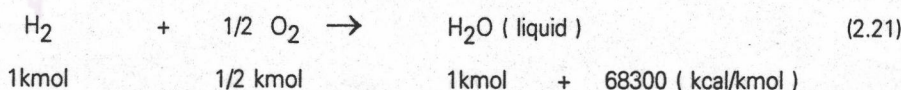
ในส่วนของสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เช่น ความชื้นซึ่งจะระเหยออกไปในช่วงที่มี การเผาไหม้และออกไปกับก๊าซเสีย ความชื้นเหล่านี้จะทำให้อุณหภูมิจของการเผาไหม้ลดลง เพราะจะต้องสูญเสียความร้อนเพื่อทำให้ความชื้นระเหยตัว และมีอุณหภูมิต่ำเท่ากับ อุณหภูมิการเผาไหม้และสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้จำพวกสารอนินทรีย์ต่างๆจะเกิดขึ้นได้ ถ้าอุณหภูมิจของการเผาไหม้สูงมากที่ขีดเหล่านี้จะละลายกลายเป็น slag เช่น ซิลิเกต จะละลายเมื่ออุณหภูมิจของการเผาไหม้สูงกว่า 1000 C เป็นต้น

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาที่เชื้อเพลิง เกิดการออกซิเดชันอย่างรวดเร็ว พร้อมกับปล่อยพลังงานความร้อนและแสงสว่างออกมา

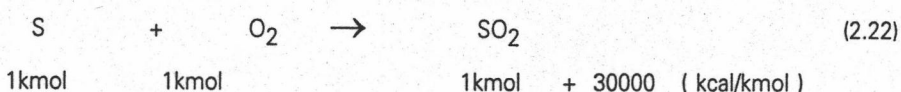
การคำนวณเกี่ยวกับกระบวนการเผาไหม้ต่อไปนี้เป็น การคำนวณเชิงทฤษฎี โดยถือว่าเป็นการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ซึ่งหมายถึงค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ มีค่าเท่ากับค่าความร้อนเชื้อเพลิง และธาตุไนโตรเจนจะไม่เกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่นโดยกระบวนการการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการต่อไปนี้



ไฮโดรเจนเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วได้น้ำ จะให้ความร้อนประมาณ 28800 kcal/kg



ไฮโดรเจนเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วได้น้ำจะจะได้ค่าความร้อนประมาณ 34150 kcal/kg เนื่องจากเมื่อไอน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำจะคายความร้อนออกมาอีก ส่วนใหญ่จะใช้ค่า 34200 kcal/kg





### 2.1.5 ส่วนประกอบและปริมาณของอากาศเสีย [6]

การเผาไหม้โดยใช้ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีนั้น จะเกิดก๊าซเสียซึ่งประกอบด้วย  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  (vapor) และ  $\text{N}_2$  แต่ถ้าเชื้อเพลิงมีธาตุกำมะถันอยู่ด้วยก็จะมี  $\text{SO}_2$  รวมอยู่ในก๊าซเสียด้วย ถ้าให้  $G_0$  เป็นปริมาณก๊าซเสียอันเกิดจากการเผาไหม้โดยปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีแล้ว สามารถคำนวณหา  $G_0$  ได้จากสมการ

$$G_0 = (1 - 0.232) A_0 + (44/12)c + (18/2)h + (64/32)s + w + n \quad (\text{kg.air/kg.fuel}) \quad (2.23)$$

สมการข้างต้น ใช้คำนวณหาปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎีในหน่วยน้ำหนักของอากาศ เมื่อเทอม

$(1 - 0.232) A_0$  เป็นปริมาณของ  $\text{N}_2$  ในอากาศที่แยกเอา  $\text{O}_2$  ไปใช้ในปฏิกิริยาเผาไหม้

เทอม  $(44/12) c$  เป็นปริมาณของ  $\text{CO}_2$  เทอม  $(18/2) h$  เป็นปริมาณของ  $\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งเกิดจากธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง เทอม  $(64/32) s$  เป็นปริมาณของ  $\text{SO}_2$ ,  $w$  เป็นปริมาณของ moisture ในเชื้อเพลิงและเทอม  $n$  เป็นปริมาณของธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่ออกมาเป็นก๊าซเสียในรูปของ  $\text{N}_2$  เมื่อคำนวณหาปริมาณก๊าซเสียอันเกิดจากการเผาไหม้โดยปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี ในหน่วยของปริมาตรอากาศก็จะได้สมการเป็น

$$G_0 = (1 - 0.21) A_0 + (22.4/12) c + (22.4/2) h + (22.4/32) s + (22.4/18) w + (22.4/28) n \quad (\text{Nm}^3.\text{air/kg.fuel}) \quad (2.24)$$

เมื่อ  $n$  เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิง 1 kg เทอม  $(1 - 0.21) A_0$  เป็นปริมาตรของ  $\text{N}_2$  ในอากาศที่แยกเอา  $\text{O}_2$  ไปใช้ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ เทอม  $(22.4/12) c$  เป็นปริมาตรของ  $\text{CO}_2$  เทอม  $(22.4/2) h$  เป็นปริมาตรของ  $\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งเกิดจากธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง เทอม  $(22.4/32) s$  เป็นปริมาตรของ  $\text{SO}_2$  เทอม  $(22.4/18) w$  เป็นปริมาตรของไอน้ำในก๊าซเสีย และเทอม  $(22.4/28) n$  เป็นปริมาตรของ  $\text{N}_2$  ซึ่งเกิดจากธาตุไนโตรเจนในองค์ประกอบของเชื้อเพลิง แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ก๊าซเสียโดยทั่วไป มักจะกระทำในลักษณะที่เป็นก๊าซเสียแห้ง โดยสกัดเอาความชื้นหรือไอน้ำที่ปนมาในก๊าซเสียออกก่อน ดังนั้นถ้าให้  $G_0$  เป็นปริมาณก๊าซเสียแห้ง อันเกิดจากการเผาไหม้ด้วยปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีแล้ว จะสามารถคำนวณหาค่า  $G_0$  ได้จากสมการ

$$G_0 = (1 - 0.232) A_0 + (44/12) c + (64/32) s + n \quad (\text{kg.air/kg.fuel}) \quad (2.25)$$

$$\text{หรือ } G_0 = (1 - 0.21) A_0 + (22.4/12) c + (22.4/32) s + (22.4/28) n \quad (\text{Nm}^3.\text{air /kg.fuel}) \quad (2.26)$$

โดยที่  $\text{Nm}^3$  เป็นปริมาตรของก๊าซ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรที่ความดันบรรยากาศ

ด้วยเหตุที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงเราต้องใช้ปริมาณอากาศเกินพอ ดังนั้นก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจึงประกอบด้วย  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  (vapor),  $\text{N}_2$  และ  $\text{O}_2$  ซึ่งถ้าเชื้อเพลิงมีธาตุกำมะถันอยู่ด้วย ก็จะมี  $\text{SO}_2$  อยู่ในก๊าซเสียด้วย เมื่อให้  $G$  เป็นปริมาณก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้ปริมาณอากาศเกินพอ

ก็สามารถคำนวณหาค่า  $G$  ได้จากสมการ

$$G = 0.232 (m-1) A_0 + (1 - 0.232) m A_0 + (44/12) c + (18/2) h + (64/32) s + w + n \quad (\text{kg.air/kg.fuel}) \quad (2.27)$$

เมื่อเทอม  $0.232 (m-1) A_0$  เป็นปริมาณของ  $\text{O}_2$  เกินพอที่ออกมาเป็นก๊าซเสีย เทอม  $(1 - 0.232) m A_0$  เป็นปริมาณของ  $\text{N}_2$  ในอากาศ เทอม  $(44/12) c$  เป็นปริมาณของ  $\text{CO}_2$  เทอม  $(18/2) h$  เป็นปริมาณของ  $\text{H}_2\text{O}$  ที่เกิดจากธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง เทอม  $(64/32) s$  เป็นปริมาณของ  $\text{SO}_2$  โดยมี  $w$  เป็นปริมาณของ moisture และ  $n$  เป็นปริมาณของ  $\text{N}_2$  อันเกิดจากธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิง

และเมื่อคำนวณหาก๊าซเสียที่เกิดจากการใช้ปริมาณอากาศเกินพอ ในหน่วยของปริมาตรอากาศก็จะมีสมการเป็น

$$G = 0.21 (m-1) A_0 + (1-0.21) m A_0 + (22.4/12) c + (22.4/2) h + (22.4/32) s + (22.4/18) w + (22.4/28) n$$

( Nm<sup>3</sup> .air.kg.fuel ) (2.28)

เมื่อ  $0.21 (m-1) A_0$  เป็นปริมาตรของ O<sub>2</sub> เกินพอที่ออกมาพร้อมกับก๊าซเสีย เทอม  $(1-0.21) m A_0$  เป็นปริมาตรของ N<sub>2</sub> ในอากาศ เทอม  $(22.4/12) c$  เป็นปริมาตรของ CO<sub>2</sub> เทอม  $(22.4/2) h$  เป็นปริมาตรของ H<sub>2</sub>O อันเกิดจากธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง เทอม  $(22.4/32) s$  เป็นปริมาตรของ SO<sub>2</sub> เทอม  $(22.4/18) w$  เป็นปริมาตรของไอน้ำในก๊าซเสีย และเทอม  $(22.4/28) n$  เป็นปริมาตรของ N<sub>2</sub> ในก๊าซเสีย ซึ่งเกิดจากธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิง ถ้าให้ G เป็นปริมาณก๊าซเสียแห่งอันเกิดจากการสกัดความชื้น หรือไอน้ำออกจากก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้อากาศเกินพอแล้ว สามารถคำนวณหา G ได้จากสมการ

$$G = 0.232 (m-1) A_0 + (1-0.232) m A_0 + (44/12) c + (64/32) s + n \quad (\text{kg.air/kg.fuel}) \quad (2.29)$$

### 2.1.6 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง [5]

กระบวนการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. เริ่มต้นด้วย ออกซิเจนจะสัมผัสกับผิวคาร์บอน
2. เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา
3. มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาที่ผิว
4. มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ กับ ออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

และจากสาเหตุดังกล่าวนี้ ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะถูกเร่งได้โดยการบดเชื้อเพลิงของแข็งให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการทำให้ Volatile Matters ระเหยออกมาได้เร็วและช่วยให้เกิดการผสมกับอากาศดีขึ้น

เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ( Heterogeneous ) ซึ่งจะทำให้มีพื้นผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับออกซิเจนจำกัด คือจะเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อยๆ จากปัญหานี้จะเห็นว่าการออกแบบระบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งควรให้มีพื้นผิวสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น

เชื้อเพลิงแข็งมีสารประกอบที่เกิดการเผาไหม้แบ่งออกได้สองชนิดคือ ชนิดที่เป็นสารระเหย ( Volatile Matter ) เช่น น้ำ ไฮโดรคาร์บอน และชนิดที่ไม่เป็นสารระเหย เช่น คาร์บอน Polymerlic สำหรับสารประกอบที่ไม่เกิดการเผาไหม้ได้แก่ความชื้น และสารประกอบอนินทรีย์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวและแก๊ส เมื่ออากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงเกิดการกระบวนการเผาไหม้ ออกซิเจนจะเข้าไปสัมผัสกับผิวของ คาร์บอน ตามขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดัง สมการที่ (2.17) ,(2.8), (2.18)

หลังจากที่เกิดปฏิกิริยา จะให้ผลิตภัณฑ์ ไพโรไลซิส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก มีสองสถานะคือแก๊ส และ ของแข็ง สำหรับ แก๊สประกอบด้วย CO ,CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ,O<sub>2</sub> ,H<sub>2</sub>O และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกเล็กน้อยที่ปล่อยออกมารอบๆอนุภาคของเชื้อเพลิง เมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิว (Surface Flux of Volatile) ของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สดังกล่าว เกิดการเผาไหม้แบบผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันของแก๊สแต่ละชนิด ในทางตรงข้ามถ้าปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมาก จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊ส เป็นผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดน้อย ฉะนั้นจึงต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหย



เชื้อเพลิงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ในส่วนที่เป็นของแข็งจำพวกถ่าน จะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้น เนื่องจากแก๊สที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจน เข้าทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิยังไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ หลังจากแก๊สต่างๆเกิดปฏิกิริยา จะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยา และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ (2.17) และสมการ



อัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอน เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคาร์บอนมากที่สุด การแผ่รังสี จัดเป็นกลไกที่สำคัญที่สุด ถ้า  $T_w, T_s$  คือ อุณหภูมิรอบผิว และที่ผิวตามลำดับ จะได้ฟลักซ์ของการแผ่รังสี  $q_{ra}$  คือ

$$q_{ra} = \sigma \epsilon (T_w^4 - T_s^4) \quad (2.31)$$

ซึ่ง  $\sigma$  เป็นค่าคงที่ Stefan Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{K}^{-4}$  และ  $\epsilon$  คือค่าการแผ่รังสี ส่วนการถ่ายเทความร้อนโดยการนำจะมีบทบาทมากเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็ก เมื่อ  $k$  เป็นค่าการนำความร้อน ดังนั้น ฟลักซ์ของการนำความร้อน  $q_c$  หาได้จากสมการ

$$q = -k \frac{dT}{dr} \quad (2.32)$$

ในกรณีที่มีการป้อนเชื้อเพลิงด้วยความเร็วที่สูง ทำให้  $Re$  มีค่าสูงด้วย จะเกิดการถ่ายเทความร้อน  $q_v$  โดยการพา คือ

$$q_v = h (T_\alpha - T_s) \quad (2.33)$$

โดยที่  $h$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยที่  $T_\alpha$  คืออุณหภูมิแวดล้อม โดยการรวมสมการทั้งสามจะสามารถจัดอยู่ในรูปของสมดุลพลังงานได้ว่า

$$\sigma \epsilon (T_w^4 - T_s^4) - k \left( \frac{dT}{dr} \right) + h (T_\alpha - T_s) = 0 \quad (2.34)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.1.7 ตัวประกอบในการเผาไหม้ที่มีผลต่อการสูญเสียความร้อน [5]

1. การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จะทำให้คาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจน กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จนหมด แต่เนื่องจากการเผาไหม้ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้น คาร์บอนบางส่วนรวมตัวกับออกซิเจน กลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งให้ค่าความร้อนต่ำกว่าดังสมการ



และสมการ (2.19) ดังนั้นหากการเผาไหม้เกิด คาร์บอนมอนอกไซด์มาก ทำให้ได้รับค่าความร้อนจากการเผาไหม้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

2. การสูญเสียความร้อนไปกับแก๊สเสีย การเผาไหม้จำเป็นต้องนำอากาศจากภายนอกเข้ามาใช้และปล่อยแก๊สเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ทิ้งไป โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิของแก๊สเสียจะสูงกว่าอากาศที่นำเข้ามา ความแตกต่างของอุณหภูมินี้คือความร้อนที่ต้องสูญเสียออกไป ความร้อนที่สูญเสียนี้สามารถคำนวณได้จาก

$$Q = m_g c_g (T_{out} - T_{in}) \quad (2.36)$$

3. การสูญเสียความร้อน เนื่องจากความชื้นของเชื้อเพลิง โดยเฉพาะเชื้อเพลิงแข็งมักจะมี ความชื้นปะปนอยู่ในปริมาณสูงพอสมควร เมื่อมีการเผาไหม้ความชื้นเหล่านี้จะดูดความร้อน เพื่อทำให้กลายเป็นไอออกไปกับแก๊สเสีย นอกจากนี้ยังมีไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ ระหว่างไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ในอากาศ กลายเป็นไอน้ำระเหยออกไปด้วย ดังนั้นจึงสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ เนื่องจากความชื้นเหล่านี้

4. การสูญเสียความร้อน เนื่องจากเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด การเผาไหม้โดยเฉพาะเชื้อเพลิงแข็งมักจะมีเผาไหม้ไม่หมด เหลือเป็นขี้เถ้า (Ash) และบางครั้งจะเหลือส่วนที่เป็นคาร์บอนอยู่ด้วย การที่เผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมด ทำให้ได้รับปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น และปริมาณส่วนที่เหลือนี้หลังจากการเผาไหม้ต้องระบายทิ้งไป และส่วนที่เหลือนี้มีอุณหภูมิสูงจึงเปรียบเสมือนกับระบายความร้อนทิ้งไปด้วยจึงเป็นการสูญเสียความร้อนอีกประการหนึ่ง

### 2.1.8 สาเหตุที่การเผาไหม้ไม่ค่อยจะสมบูรณ์ [4]

ในภาวะอากาศพอดี แต่การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ยาก ในทางปฏิบัติทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจาก

1) เนื่องมาจากการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงไม่ทั่วถึง ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์เกิดขึ้นได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณใกล้กับผนังเตาหรือผนังห้องเผาไหม้ จำเป็นต้องใช้อัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงในภาวะมีอากาศเกินพอ

2) ภาวะความร้อนเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ จึงทำให้ปริมาณความต้องการอากาศ และเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การควบคุมให้ได้อัตราส่วนในปริมาณการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ นั้นจึงเป็นไปได้ยาก



3) เนื่องจากอากาศที่ใช้เผาไหม้จริง ในทางปฏิบัตินั้นมีความชื้นเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ปริมาณอากาศที่ใช้เพื่อให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์นั้น จะมากกว่ากรณีของการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์เชิง ทฤษฎีโดยใช้อากาศแห้ง

4) เวลาในการเผาไหม้ไม่นานเพียงพอ จึงมีเชื้อเพลิงที่ไหม้ไม่หมดติดไปกับอากาศ ส่วนที่เหลือ ( ในกรณีที่ใช้ภาวะของอากาศเกินพอในการเผาไหม้ )

## 2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเปลวไฟ [2]

สรุปลักษณะที่สำคัญของเปลวไฟได้ดังนี้

1) Premixed Flame หมายถึงเชื้อเพลิงและอากาศ ( ที่มีตัว oxidized คือก๊าซออกซิเจน ) สัมผัสกัน ก่อนเข้าสู่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยา ( Reaction Zone )

Diffusion Flame หมายถึงเชื้อเพลิงและอากาศสัมผัสกัน ณ จุดที่มีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ สำหรับ Premixed Flame เนื่องจากเชื้อเพลิงและก๊าซออกซิเจน มีการผสมกันล่วงหน้าก่อนการจุดระเบิด ความเร็วในการเผาไหม้จึงสูงกว่า Diffusion Flame และมีการเกิดมลภาวะเนื่องจากก๊าซ NO น้อยกว่า Diffusion Flame

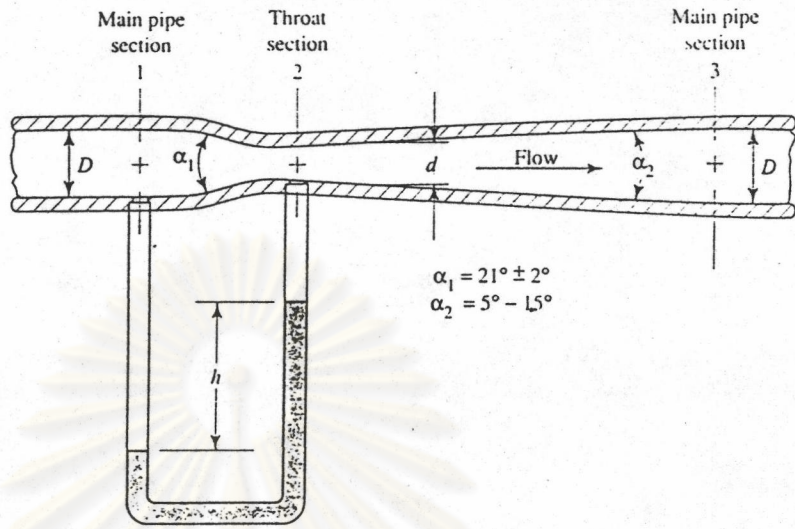
2) ขบวนการการเผาไหม้ของ Turbulent Flame จะมีความเร็วกว่า Laminar Flame เปลวไฟของ Turbulent Flame จะสั้นกว่าโดยวัดที่ค่าอัตราส่วนผสมเดียวกัน เสียงของ Turbulent Flame ก็จะมีดังกว่า Laminar Flame ก๊าซที่ได้จากเปลวไฟแบบ Turbulent Flame ก็จะมี NO ออกสู่บรรยากาศน้อยกว่า

3) สำหรับ Laminar Diffusion Flame ความยาวของเปลวไฟจะแสดงถึงอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ถ้าเปลวไฟมีความยาวมากแสดงถึงว่ามีอัตราการเผาไหม้ต่ำ ความยาวของ Turbulent Diffusion Flame เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของ burner nozzle

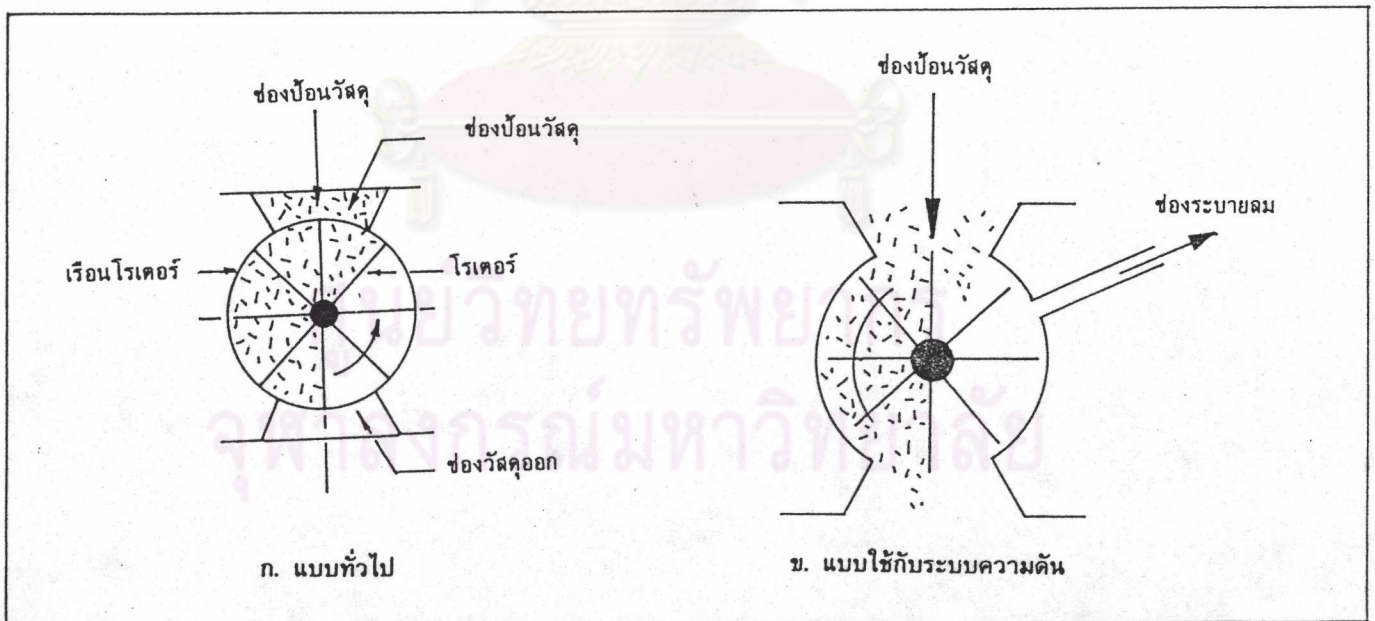
4) Stability of diffusion flame ความมีเสถียรภาพของเปลวไฟขึ้นกับขบวนการผสมผสานกันของเชื้อเพลิงและอากาศ ก่อนการเผาไหม้ จากการทดลองพบว่า ความเร็วของส่วนผสม ที่ burner nozzle จะช่วยเพิ่มการผสมผสานระหว่าง เชื้อเพลิงและก๊าซออกซิเจน และความเป็น Turbulence มากขึ้น

5) สำหรับเปลวไฟที่ได้จากหัวเผา รูปร่างของเปลวไฟขึ้นกับสัดส่วนของอากาศและเชื้อเพลิง โดยถ้ามีอากาศมาก ( over ventilated flame ) จะทำให้เปลวไฟมีรูปร่างเรียวในแนวแกน และถ้ามีอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้น้อย ( under ventilated flame ) เปลวไฟจะมีรูปร่างบานติดกับขอบท่อทางออก

6) Swirl Flame ความยาวของเปลวไฟเนื่องมาจาก ส่วนผสมที่หมุนวน ( swirl ) จะสั้น เนื่องจากส่วนผสมที่มีความเร็วในการหมุนวนสูง อากาศโดยรอบของเปลวไฟจะถูกส่งเข้าไปภายในเปลวไฟมากขึ้น และจะทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่ช่วยในการเผาไหม้มากขึ้น ขบวนการการเผาไหม้จะถูกเร่งขึ้น และจุดที่มีปฏิกิริยาแบบ stoichiometric mixture จะเลื่อนเข้าใกล้ burner nozzle มากขึ้น และทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ ง่ายต่อการควบคุมรูปร่างและขนาดของเปลวไฟ

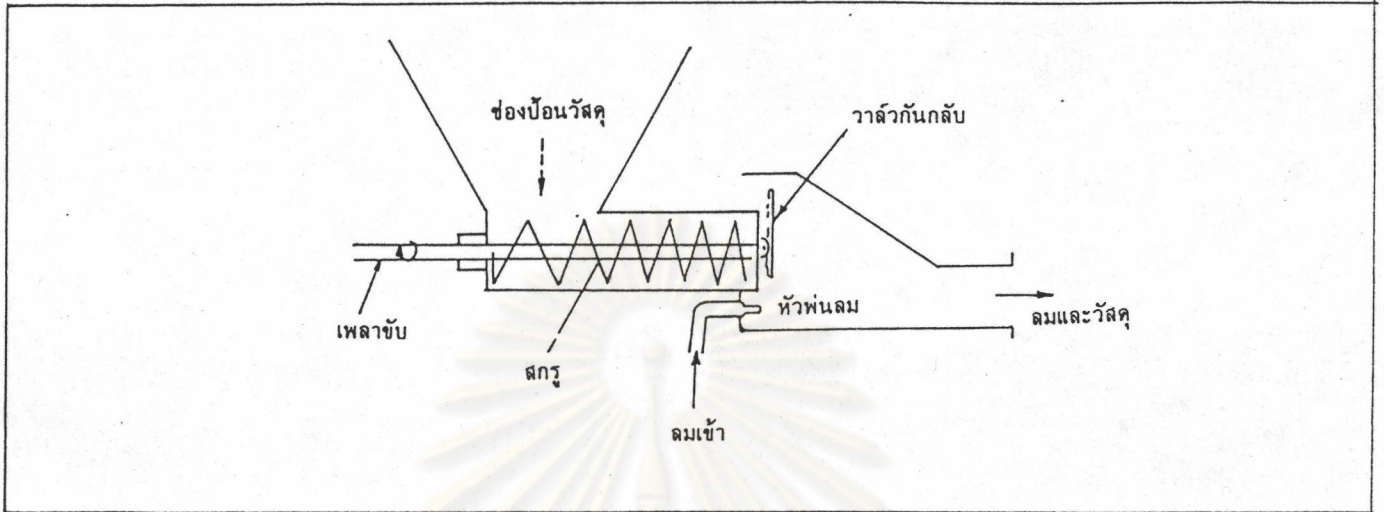


รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของท่อเวนจูรี

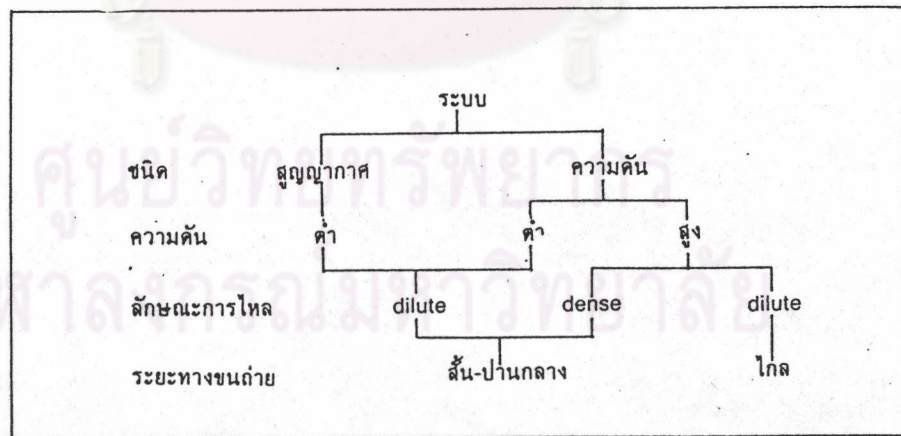


รูปที่ 2.2 ลักษณะการใช้งานโรตารีวาล์ว

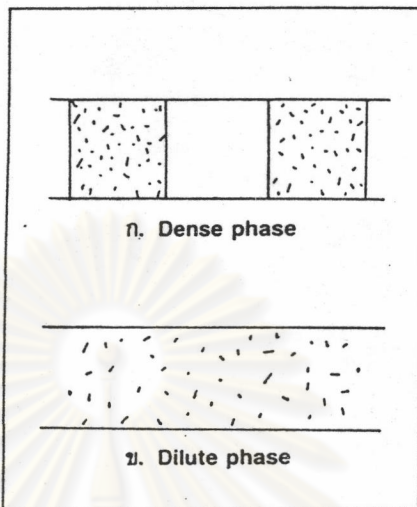




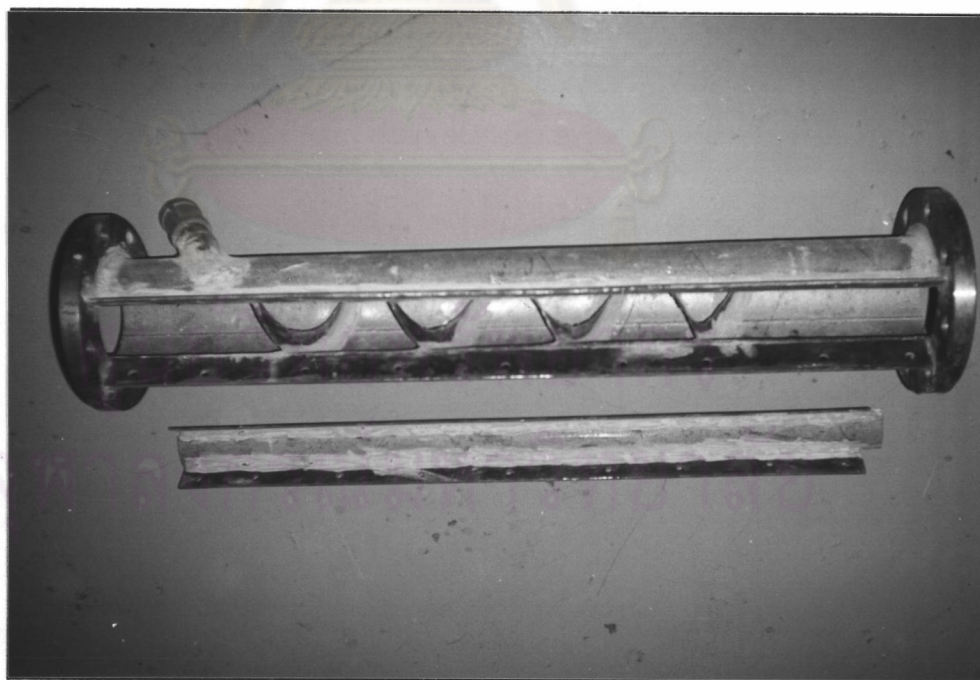
รูปที่ 2.3 สกรูคอนเวเยอร์สำหรับการจ่ายวัสดุในระบบความดัน



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของลม ลักษณะการไหลของวัสดุในท่อและระยะทางขนถ่าย



รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลของวัสดุในท่อ



รูปที่ 2.6 ลักษณะไบเทสลิยวในหัวเผาแบบที่ 2 ( diffusion burner )