

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ห้องเผาไหม้แบบไซโคลน (Cyclone Combustor) ได้มีการพัฒนาขึ้นมาตั้งแต่ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งในขณะนั้นใช้สำหรับเผาไหม้ถ่านหิน เพื่อผลิตไอน้ำสำหรับใช้ผลิตไฟฟ้า และทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบห้องเผาไหม้แบบไซโคลนพัฒนามาจากไซโคลนที่ใช้ดักฝุ่น (Cyclone Dust Separator) และได้มีผู้ทำการวิจัยต่อมาโดยใช้เชื้อเพลิงที่แตกต่างกันไปตลอดจนลักษณะของห้องเผาไหม้ที่แตกต่างกันไปด้วย

#### 2.2. ทฤษฎีการเผาไหม้ [7]

ก๊าซชีววมวลได้จากการเผาไหม้ (ปฏิกิริยา Oxidation) บางส่วนของเชื้อเพลิงแข็ง การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ ไม้, ถ่านไม้, ถ่านหินต่างๆ, แกลบ, ขี้เลื่อย หรือวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรที่ติดไฟได้ ก๊าซชีววมวลส่วนใหญ่ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, ไฮโดรเจนและมีเทน

โดยปฏิกิริยาเคมีของการเกิดก๊าซชีววมวล ในเตาผลิตก๊าซ สามารถแบ่งออกได้เป็น โซนต่างๆ ได้ดังนี้

- Combustion Zone
- Reduction Zone
- Pyrolysis หรือ Distillation Zone
- Drying Zone

การแบ่งโซนต่างๆ สามารถแบ่งออกจากกันตามปฏิกิริยาเคมีและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

2.2.1 Combustion Zone ในโซนนี้สามารถแยกธาตุหลักที่จำเป็นออกได้ 2 ธาตุ ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ได้แก่ คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ในกระบวนการเผาไหม้ คาร์บอน 1 โมล ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O<sub>2</sub>) 1 โมล ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) 1 โมล จึงทำให้เกิดบริเวณ combustion zone ขึ้นโดยอากาศที่ส่งเข้าไปในบริเวณนี้ จะสัมผัสเชื้อเพลิงเป็นจุดแรกก่อนเกิดการเผาไหม้ การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ในเชื้อเพลิงทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการ



ไฮโดรเจน 2 โมล ทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจน 1 โมล ได้น้ำ (H<sub>2</sub>O) ดังสมการ (2.2) การเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ (2.1) และ (2.2) เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นในโซนนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนใน Reduction และ Pyrolysis Zone อุณหภูมิ Combustion Zone จะอยู่ระหว่าง 1100 – 1500 องศาเซลเซียส

2.2.2 Reduction Zone เมื่ออากาศผ่านเข้าสู่ Combustion Zone และทำปฏิกิริยากับ คาร์บอนและไฮโดรเจน ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แล้วจะไหลผ่านเข้าสู่ Reduction Zone ดังนั้นในโซนนี้จะเป็น Reduction reaction อุณหภูมิในโซนนี้ 500 – 900 องศาเซลเซียส ในโซนนี้ จะเปลี่ยนก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ให้เผาไหม้ได้ ดังสมการ

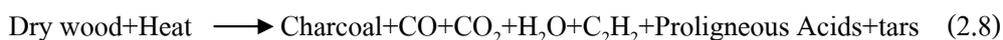


จากสมการ (2.3) และ (2.4) เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และก๊าซที่ได้จะเป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในก๊าซผสมที่ได้จากเตาผลิตก๊าซ ก๊าซหลักนี้คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยหลักการแล้วควรทำให้ก๊าซมีปริมาณมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดได้มากกับผิวของเชื้อเพลิงแข็งใน Reduction Zone และอุณหภูมิในขณะนั้น ดังนั้นขนาดของเชื้อเพลิงที่ใส่ในเตาผลิตก๊าซ จึงมีผลต่อการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังนั้นเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ เมื่อจะทำการติดเตาจึงติดไฟยากกว่าปกติ เพราะมีช่องว่างมากทำให้ก๊าซออกซิเจนบางส่วนไหลผ่านช่องว่างของเชื้อเพลิงโดยที่ไม่ได้สัมผัสกับผิวเชื้อเพลิง ทำให้การติดไฟเป็นไปได้ยาก และปฏิกิริยาที่เกิดจึงมีน้อย ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้เกิดความดันสูญเสียในเตามาก จำเป็นต้องใช้พัดลมที่มีขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าปกติ เนื่องจากความต้านทานต่อการไหลของก๊าซสูง และก๊าซที่ผลิตได้จะมีฝุ่นมากกว่าปกติ ในบางครั้งการใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างเล็กๆ ขึ้นในตัวเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ทำให้อากาศพยายามแทรกตัวขึ้นตามช่องว่างเหล่านี้ และมีความเร็วมาก ดังนั้นอากาศที่ไหลขึ้นตามช่องนี้จึงไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง เป็นเหตุให้ก๊าซที่ได้มีคุณภาพต่ำลง จากปฏิกิริยา (2.3) ถ้าอุณหภูมิใน Reduction สูงกว่า 900 องศาเซลเซียส และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส CO<sub>2</sub> จะเปลี่ยนเป็น CO หกค ดังนั้นประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น ตามอุณหภูมิของ Reduction Zone ในเตาผลิตก๊าซ

เมื่อก๊าซมีอุณหภูมิสูงจาก Combustion ไหลเข้าสู่โซนนี้ อุณหภูมิจะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนในปฏิกิริยา (3.4) และ (3.5) ส่วนใหญ่ปฏิกิริยาที่ (3.6) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ คือ 500 – 600 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญ เพราะทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนในก๊าซมีมากขึ้น ถ้ามีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำให้ปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนคังสมการ (3.7) เรียกว่า Water Shift Reaction ทำให้ค่าความร้อนของก๊าซที่ลดลง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องระมัดระวังเกี่ยวกับเรื่องความชื้นของเชื้อเพลิง ที่จะเข้าสู่เตาผลิตก๊าซ

### 2.2.3 Pyrolysis Zone

ในโซนนี้จะได้รับความร้อนจาก Reduction Zone เพื่อที่สลายสารพวก organic ในเชื้อเพลิง ทำให้ได้เมทานอล, กรดน้ำส้ม และ น้ำมันดิบ อุณหภูมิในโซนนี้จะเกิดประมาณ 200 – 500 องศาเซลเซียส ของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้ว คือ คาร์บอนในรูปของถ่าน ซึ่งทำปฏิกิริยาต่อใน Reduction Zone และ Combustion Zone คังสมการ



### 2.2.4 Drying Zone

บริเวณโซนนี้ อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารจำพวกสารระเหยแต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะถูกความร้อนทำให้ระเหยออกมาในรูปของไอน้ำ โซนนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 100 – 200 องศาเซลเซียส



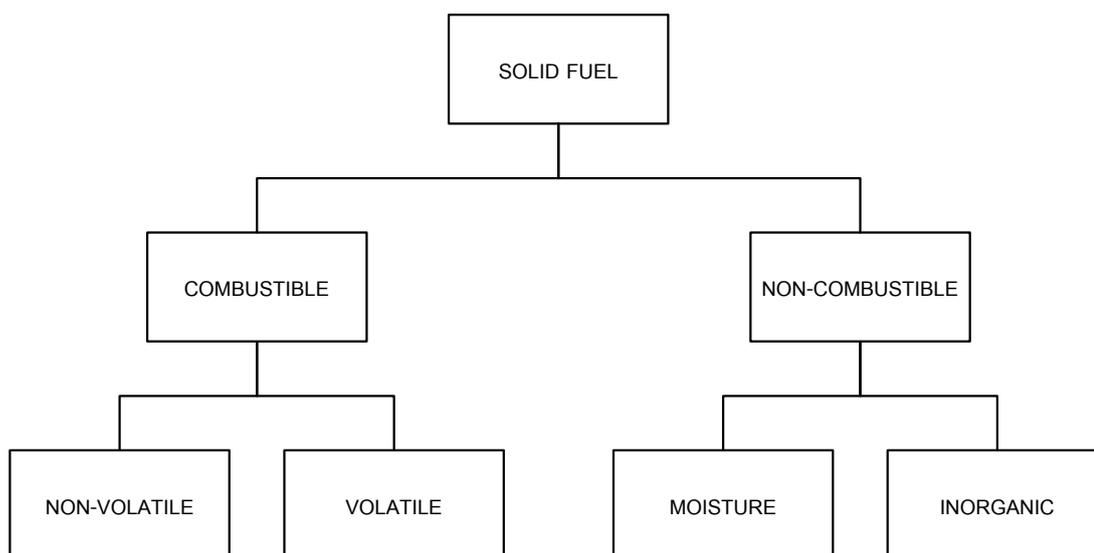
## 2.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง [7]

ปริมาณออกซิเจนที่ไม่เพียงพอ คือ สาเหตุหนึ่งของการสันดาปไม่สมบูรณ์ เกิดการจัดรูปของ คาร์บอนมอนอกไซด์ คังสมการ



แต่ปริมาณออกซิเจนที่มีมากเกินไปความต้องการก็เป็นสาเหตุให้การสันดาปไม่สมบูรณ์เช่นกัน สัดส่วนของเชื้อเพลิงและอากาศ อาจจะต้องอยู่ในช่วงที่พอเหมาะ จึงจะเกิดการสันดาป ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการสันดาปจำนวนทั้งหมดของเชื้อเพลิงและอากาศ คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-Fuel Ratio; AF) หมายถึง อัตราส่วนมวลของอากาศต่อมวลของเชื้อเพลิง สำหรับกระบวนการสันดาป

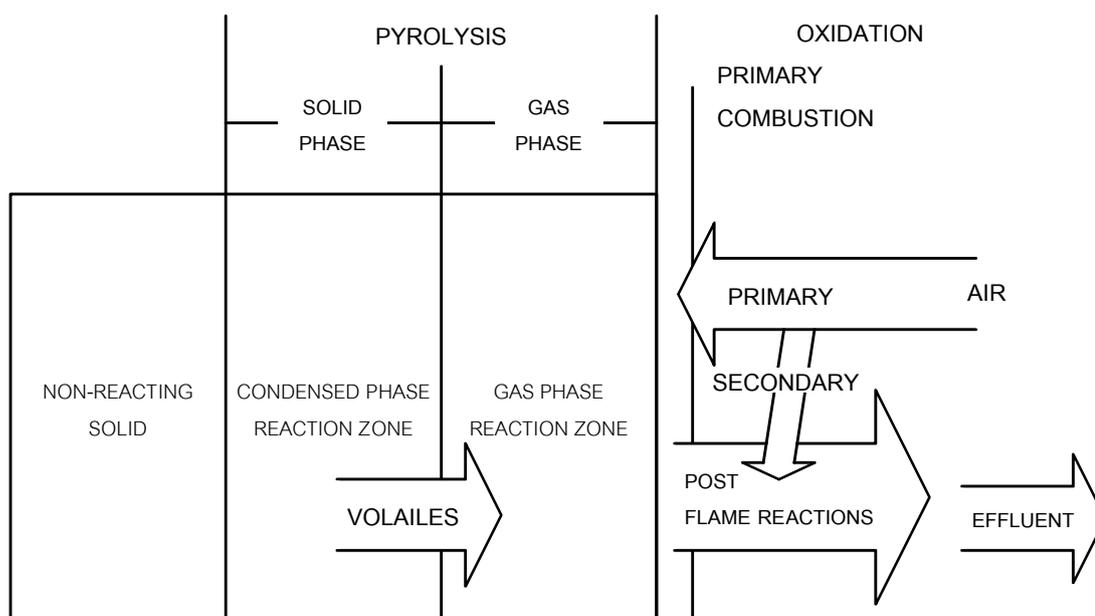
ดังนั้น เมื่อเชื้อเพลิงเผาไหม้สมบูรณ์ กับอากาศเชิงทฤษฎี จะไม่มีออกซิเจนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาในก๊าซผลิตภัณฑ์ เรียกว่า สตอยคิโอเมตริก หรือ การสันดาปเชิงทฤษฎี (Theoretical Combustion) ของเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้อยู่ทั่ว ๆ ไป มีหลายชนิดเช่น ถ่านหิน ฟิน ไม้เลื่อย แกลบ เป็นต้น ขบวนการไหม้เชื้อเพลิงแข็ง จะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวและก๊าซ เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง มักเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่าง ๆ ภายในเชื้อเพลิงแข็งยังไม่แน่นอน นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงประกอบด้วยสารต่าง ๆ ซึ่งมีทั้งที่เผาไหม้ได้ แสดงดังรูป 2.1 สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้เรียกว่า สารเฉื่อย (Inert) สารเฉื่อยนี้เปรียบเทียบกับก๊าซไนโตรเจนในอากาศที่ไม่ช่วยให้เกิดการสันดาป แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ก็อาจเกิดปฏิกิริยาได้ในบางกระบวนการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ๆ สารเฉื่อยที่ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ความชื้นและสารอนินทรีย์ที่ประกอบเป็นขี้เถ้า สารอนินทรีย์เหล่านี้ส่วนมาจะเป็นสารจำพวกซิลิเกต(Silicates) ซัลไฟด์(Sulfides) และเกลือของฮาโลเจน (Halogen) เป็นต้น เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง สารเหล่านี้จะกลายเป็นขี้เถ้า บางส่วนจะตกอยู่ในห้องเผาไหม้ บางส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวออกไปกับก๊าซไอเสียหรือเรียกว่า เถ้าปลิว (Fly Ash)

เชื้อเพลิงแข็งส่วนที่เผาไหม้ได้สามารถแยกเป็นส่วนที่ระเหยได้ (Volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (Non volatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ประกอบด้วย คาร์บอน สารประกอบของคาร์บอน  $C_xH_y$  ( C ในแกน x ต่อ C ในแกน y ) โดยที่ x มากกว่าค่า y มากๆ หรือเป็นสารที่น้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง ส่วนสารระเหยที่ได้ในที่นี่จะหมายถึงสารประกอบที่ระเหยในช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ ซึ่งประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ หลักการในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นดังรูป 2.2 โดยจะเกิดกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในช่วงของคอนเดนส์เฟส (Condensed phase) และก๊าซ (Gas phase) ในขบวนการไพโรไลซิส สารระเหยที่ได้ในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาจากผิวของอนุภาคของเชื้อเพลิงแข็ง และผสมกับอากาศรอบๆ เกิดการเผาไหม้ขึ้นซึ่งเรียกว่า การเผาไหม้ช่วงแรก ( Primary Combustion ) หลังจากการเผาไหม้มีส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เมื่อมาพบกับอากาศส่วนที่สอง

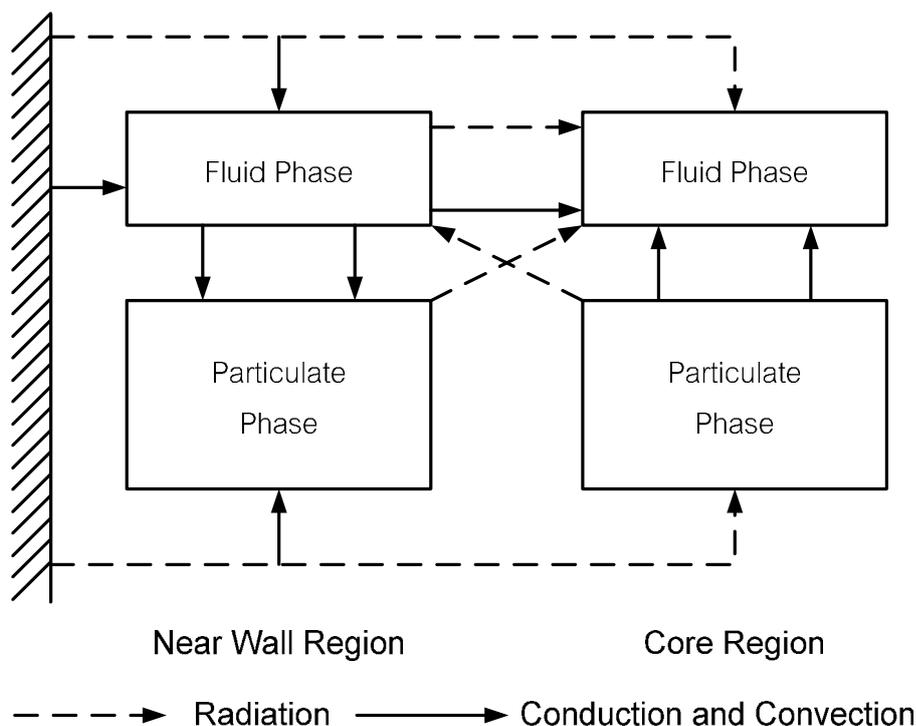


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ในส่วนของสารที่ไม่ระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง เช่น คาร์บอน เมื่อเกิดขบวนการเผาไหม้ ออกซิเจน จะเข้าไปสัมผัสกับผิวคาร์บอน ดังนี้



อัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอน เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคาร์บอนมากที่สุด คือ คาร์บอนที่ได้รับการถ่ายเทความร้อน ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการถ่ายเทความร้อน

โดยการแผ่รังสี จัดเป็นกลไกที่สำคัญที่สุดถ้า  $T_w$ ,  $T_s$  คืออุณหภูมิรอบผิวและที่ผิวตามลำดับ ได้ฟลักซ์การแผ่รังสี  $q_{ra}$  คือ

$$q_{ra} = \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_s^4) \quad (2.14)$$

ซึ่ง  $\sigma$  เป็นค่าคงที่ Stefan – Bolt Mann มีค่าเท่ากับ  $5.76 \times 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{K}^4$  และ  $\varepsilon$  คือค่าการแผ่รังสีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ จะมีบทบาทเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็ก เมื่อ  $k$  เป็นค่าการนำความร้อน ดังนั้นฟลักซ์ความร้อน  $q_c$  หาได้จากสมการ

$$q_c = -k(dT / dr) \quad (2.15)$$

ในกรณีที่มีการป้อนเชื้อเพลิงต้นค่าความเร็วสูงทำให้ค่าเนโนลนัมเบอร์ (Re) มีค่าสูงด้วย จะเกิดการถ่ายเทฟลักซ์ความร้อน  $q_v$  โดยการพาคือ

$$q_v = h(T_\infty - T_s) \quad (2.16)$$

โดยที่  $h$  สัมประสิทธิ์การพาความร้อนขณะที่  $T_\infty$  คืออุณหภูมิแวดล้อมจากสมการที่ 2.14, 2.15 และ 2.16 สามารถจัดรูปของสมดุลของพลังงานได้

$$\sigma\varepsilon(T_w^4 - T_s^4) - k[dT/dr] + h(T_\infty - T_s) = 0 \quad (2.17)$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงแข็งนี้จะได้รับการถ่ายเทความร้อน โดยการผ่านรังสีมากที่สุด

ในส่วนของสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เช่น ความชื้น ซึ่งระเหยออกไปในช่วงที่มีการเผาไหม้และออกไปกับก๊าซไอเสีย ความชื้นเหล่านี้จะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้และสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้จำพวก สารอนินทรีย์ต่างๆ จะเกิดขึ้นขี้เถ้า ถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงมากๆ ขี้เถ้าเหล่านี้จะกลายเป็นสแลก (Slag) เช่น ซิลิเกต จะละลายเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่า 1000 °C เป็นต้น

#### 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของแกลบ [8]

เนื่องด้วยแกลบข้าวนำไปเป็นเชื้อเพลิงมาก การวิเคราะห์องค์ประกอบของแกลบข้าวและคุณสมบัติทางกายภาพจึงเป็นประโยชน์ รูปร่างของแกลบข้าว และโครงสร้างของชิ้นส่วนแกลบข้าวในเตาเผา มีความสำคัญมากกว่าปริมาณความชื้น องค์ประกอบของขี้เถ้าและพลังงานที่ให้ ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบที่ธาตุต่างๆ ของแกลบข้าวและให้ความหนาแน่นจริงของธาตุต่างๆ เหล่านี้ หลังจากการเผาไหม้แล้ว แกลบเผาจะเป็นซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ (14.66%) เนื่องด้วยคาร์บอนและออกซิเจนเป็นส่วนประกอบหลัก ถูกเผาไหม้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ แกลบข้าวจะมีความหนาแน่นจริงที่สูงกว่าน้ำแต่แกลบข้าวลอยน้ำได้เพราะฟองอากาศที่ถูกกักอยู่ที่ผิวของแกลบข้าว ถ้าฟองอากาศหายไปแกลบก็จะจมน้ำ พื้นที่ผิวปรากฏของแกลบข้าวเป็นพื้นที่ผิวของแกลบข้าวที่ไม่พรุน ซึ่งวัดได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและเครื่อง image analyzer ได้เท่ากับ 3885 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ความสำคัญต่อความว่องไว (reactivity) ของเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 302 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> สำหรับแกลบเผาที่อัดเป็นก้อน (pellet) แกลบข้าวจากเมล็ดข้าว มีน้ำหนักระหว่าง 2.9 ถึง 3.6 มิลลิกรัม น้ำหนักเฉลี่ย 3.1 มิลลิกรัม การเผาไหม้ของแกลบข้าว มักจะเกิดขี้ตะกรันและก้อนเล็ก (Slagging and caking) เนื่องจากเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบต่าง ๆ ขณะเกิดการเผาไหม้ชุด หลอมเหลวของแร่ธาตุออกไซด์บางชนิดได้ องค์ประกอบของแกลบข้าวที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่สุดคือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และสารประกอบคาร์บอนบางชนิดจะถูกเผาไหม้และระเหยกลายเป็นไอออกมาก่อน กระบวนการเผาไหม้อุณหภูมิต่ำที่มีออกซิเจนจำกัด ก่อให้เกิดคาร์บอนอิสระ ซึ่งจะไปรวมตัวกับไฮโดรเจนอิสระทำให้เกิดน้ำมันยาง (tar oil) และน้ำ ถูกเรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิส ทำให้แกลบข้าวติดกันเป็นก้อนเล็กซึ่งไปกีดขวางการเคลื่อนไหวยของเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของแกลบข้าวต่อน้ำหนัก 100 กก. [8]

องค์ประกอบ	นน.(กก.)	นน. โมเลกุล	จำนวนโมล
คาร์บอน	39.26	12	3.271
ไฮโดรเจน	4.66	2	2.495
ออกซิเจน	32.70	32	1.022
ไนโตรเจน	1.99	28	0.071
กำมะถัน	0.10	32	0.003
ความชื้น	3.56	18.	0.198
ชี้เถ้า	17.40		

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของแกลบข้าว (Ultimate analysis) และความหนาแน่นจริงของแต่ละธาตุองค์ประกอบ [8]

ธาตุ	สัดส่วนของมวลแห้ง (mass fraction-dry basis)	ความหนาแน่นจริง (กรัม/ลบ.ซม.)
C	14.44	1.80-2.26
O	37.32	-
Si	14.66	2.0-2.5
H	4.94	-
K	0.59	0.86
N	0.57	-
S	0.30	2.0-2.9
P	0.07	1.82-2.69
Ca	0.06	1.55
Na	0.035	0.97
Fe	0.006	7.86
Mg	0.003	1.74
Zn	0.006	7.14

## 2.5 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) [9]

ในการเผาไหม้จริงปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมบาง (Lean Mixture) ตรงกันข้ามหากปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมหนา (Rich Mixture) เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง จึงกำหนดให้ อยู่ในรูปของอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง  $(A/F)_{\text{stoc}} = (m_{\text{air}}/m_{\text{fuel}})_{\text{stoc}}$  อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio,  $\Phi$ ) จะหมายถึง

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{Stioc}}}{(A/F)_{\text{Actual}}} = \frac{(F/A)_{\text{Actual}}}{(F/A)_{\text{Stioc}}} \quad (2.18)$$

Fuel – rich mixtures  $\Phi > 1$  มีเชื้อเพลิงมาก อากาศน้อย

Stoichiometric mixtures  $\Phi = 1$  ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

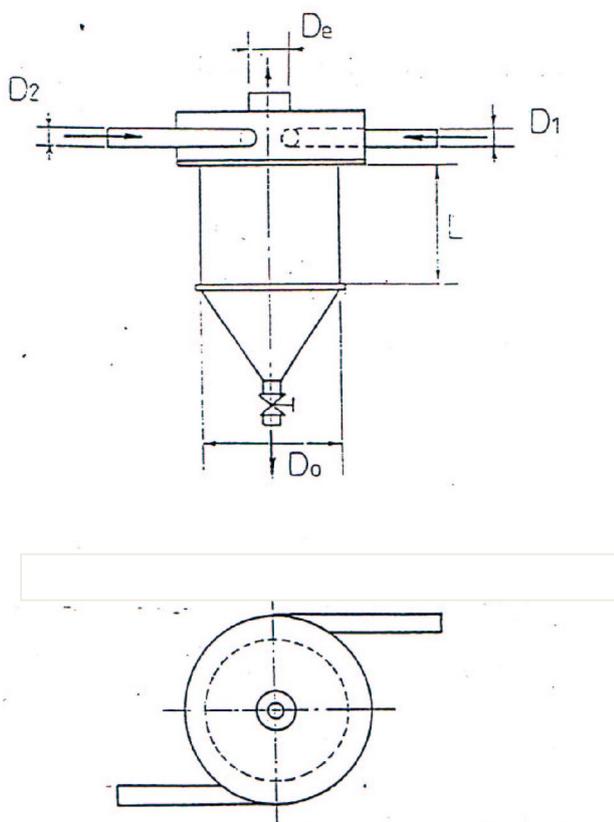
Fuel – lean mixtures  $\Phi < 1$  มีเชื้อเพลิงน้อย อากาศมาก

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับคุณลักษณะของเตาเผาประเภทต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน หลายประเภทด้วยกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีนักวิจัยทำการวิจัยทั้งในและต่างประเทศมากมาย ดังนี้

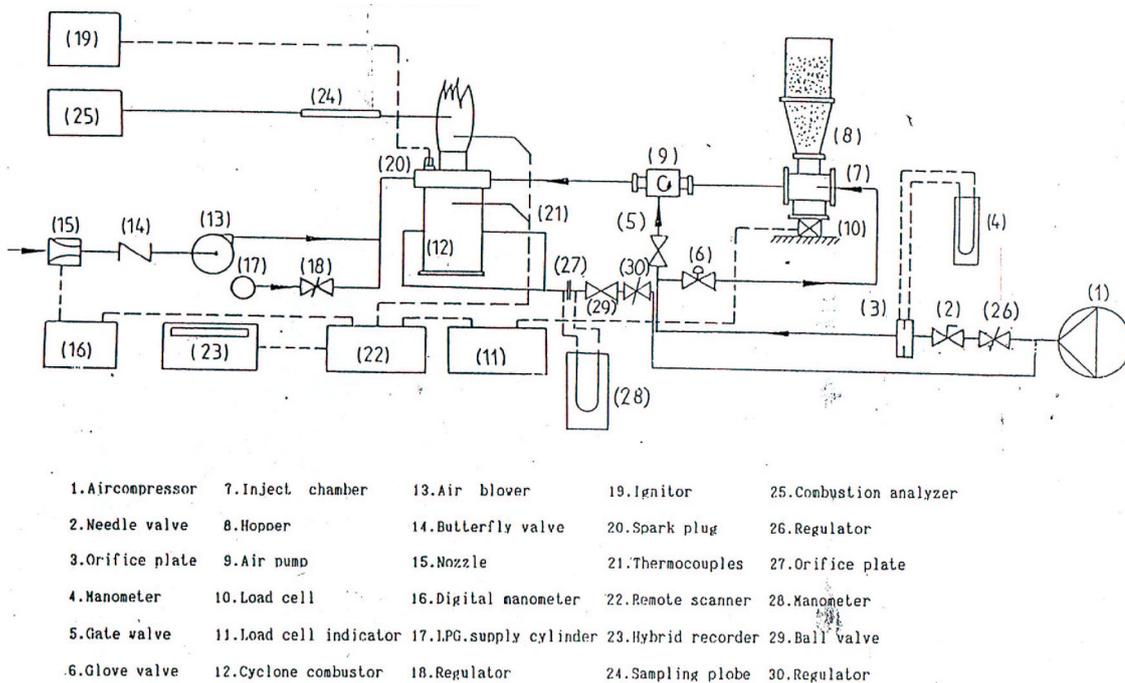
### 2.6.1 งานวิจัยภายในประเทศ

งานวิจัยของ ประจักษ์ จิตริพิทย์ [4] ได้สร้างห้องเผาไหม้แบบไซโคลน แบบมีช่องป้อนเชื้อเพลิงหนึ่งช่องทางและอากาศอีกหนึ่งช่องทางขึ้น 2 ชุด และใช้ซีลีเยอเป็นเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.4 ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชุดแรก เป็นห้องเผาไหม้จำลอง ซึ่งสร้างจากพลาสติกใส เพื่อทำการศึกษาลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ โดยมีขนาด  $L/D = 2.06$  ( $L = 338$  mm,  $D = 164$  mm) ส่วนห้องเผาไหม้ชุดที่สองเป็นห้องเผาไหม้ที่สร้างมาจากเหล็กกล้า เพื่อใช้ในการทดลองการเผาไหม้จริงมีขนาด  $L/D = 2.0$  ( $L = 310$  mm,  $D = 155$  mm) จากผลการทดลอง พบว่าการป้อนอากาศเพื่อนำเชื้อเพลิงเข้าในแนวสัมผัสทางส่วนบนของห้องเผาไหม้ อนุภาคจะแพร่กระจายไม่สม่ำเสมอ คือ อนุภาคจะเคลื่อนที่รวมกลุ่ม หมุนวนเป็นเกลียวลงสู่กันไซโคลน การเผาไหม้ซีลีเยอที่ค่า  $\Phi < 1.5$  การเผาไหม้จะเกิดขึ้นแต่ช่วงกลางถึงปากทางออกของห้องเผาไหม้ มีเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดเหลือตกค้างมาก ส่วนการเผาไหม้ที่ค่า  $\Phi$  มากกว่า 1.5-2.0 เกิดการเผาไหม้เป็นบริเวณกว้างไม่ปรากฏ เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดเหลือตกค้าง ถ้าจะปลิวออกไปพร้อมกับก๊าซไอเสีย ส่วนการเผาไหม้ที่ค่า  $\Phi > 2.0$  จะเกิดการเผาไหม้ ตั้งแต่กันไซโคลนขึ้นไปจนถึงปากทางออก



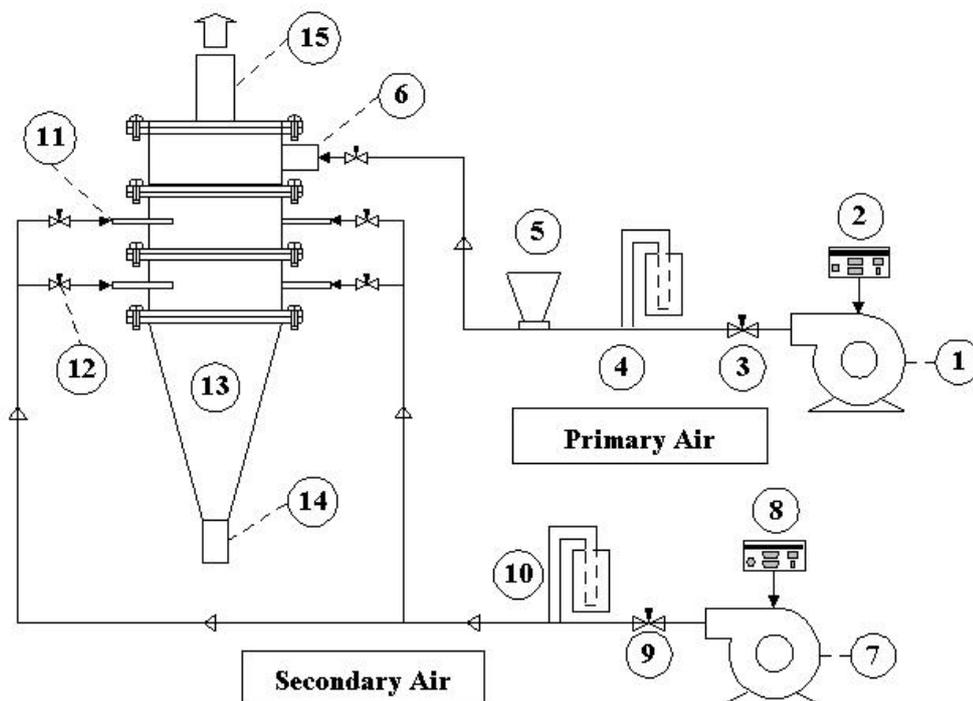
รูปที่ 2.4 ชุดอุปกรณ์ห้องเผาไหม้แบบอากาศช่องทางเดียว

งานวิจัยของ สุพจน์ น้านาโชค [5] ได้ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง ดังรูปที่ 2.5 การทดลองใช้อัตราการป้อนอนุภาค ตั้งแต่ 205.4 ถึง 333.3 กรัมต่อนาที อัตราการป้อนอากาศตั้งแต่ 12.185 กิโลกรัมต่อนาที และมีการแปรค่าปริมาณอากาศส่วนที่สองเป็น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ และเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสมมูลทั้งหมด 3 ค่า คือ 1.0, 1.2 และ 1.5 จากการทดลองพบว่า ปริมาณอากาศส่วนที่สอง 15 เปอร์เซ็นต์ของอากาศทั้งหมด และที่  $\Phi=1.5$  จะเกิดการเผาไหม้เป็นบริเวณกว้างทั่วทั้งห้องเผาไหม้ มีเปลวไฟออกมาช่องทางออกเล็กน้อย ก๊าซจากการเผาไหม้ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 885-2121 ppm นับว่าต่ำที่สุด และก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วง 7.1- 14.2 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าเกิดการเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์กว่าค่า  $\Phi$  อื่นๆ เพราะมีปริมาณอากาศอย่างเพียงพอต่อการเผาไหม้



รูปที่ 2.5 ชุดอุปกรณ์และเครื่องมือวัดการทดลองลักษณะการเผาไหม้เตาเผาไซโคลน

งานวิจัยของ วิศิษฐ์ ลีลาผาดิกุล [6] ได้นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิต่อการดักฝุ่นในถังไซโคลนหลายชั้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถังไซโคลนมีขนาดเท่ากับ 0.28 m(D) ความสูงของถังไซโคลนเท่ากับ 1.2 m กำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังไซโคลนสามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 ขนาด คือ 0.75D และ 1.0D ตามต้องการ ซึ่งมีการติดตั้งตำแหน่งท่อฉีดอากาศไว้ในแนวสัมผัสรอบๆผนังไซโคลน เพื่อทำให้เกิดการไหลหมุนวนของอากาศภายใน โดยแต่ละการทดลอง กำหนดอัตราส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทางเข้า ( $\lambda$ ) เท่ากับ 0.0, 0.25 และ 0.35 ซึ่งในการทดลองจะใช้ฝุ่นทั้งสิ้น 6 ชนิดด้วยกัน คือ แกลบ, แกลบเผา, กากมะพร้าว, กากมะพร้าวเผา, ทรายละเอียด และ ทราชะเอียด โดยจากการทดลองพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถังไซโคลนส่วนบน เท่ากับ 1.0D และ  $\lambda$  เท่ากับ 0.35 จะให้ประสิทธิภาพการดักอนุภาคฝุ่นของไซโคลนหลายชั้นสูงสุด เท่ากับ 96 % ดังรูปที่ 2.6

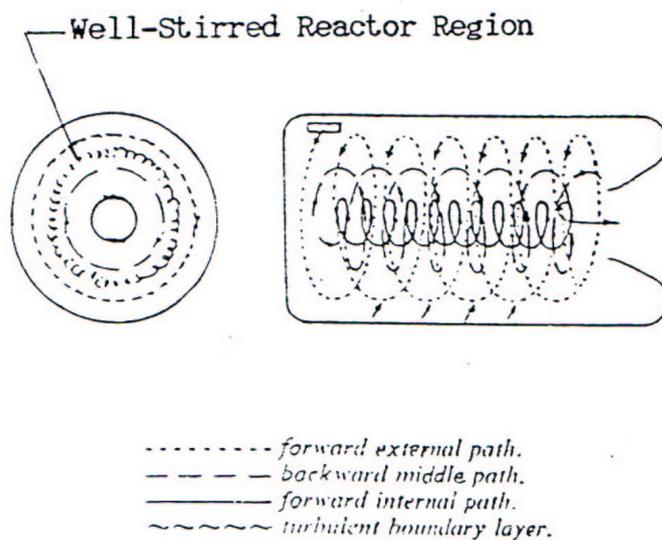


1. Primary Blower 2. Power Supply 3. Needle Valve 4. Manometer 5. Hopper 6. Inlet air  
7. Secondary Blower 8. Power Supply 9. Needle Valve 10. Manometer 11. Secondary Air Nozzle  
12. Needle Valve 13. Cyclone 14. Stack 15. Dust Drop Tube

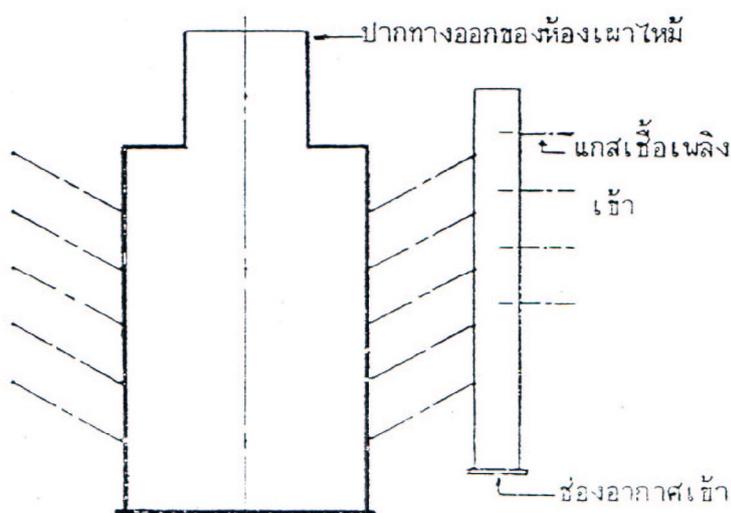
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของอุปกรณ์การทดลองไซโคลน

### 2.6.2 งานวิจัยภายนอกประเทศ

งานวิจัยของ Agrest [1] ได้ดัดแปลงจากเตาแบบตะกรับลำดับขั้นของหม้อไอน้ำที่มีขนาด 15 ตันต่อชั่วโมง ที่ใช้เศษฟ้ายเป็นเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพทางความร้อน 82 เปอร์เซ็นต์ ผลิตไอน้ำ 4.4 ถึง 4.5 กิโลกรัมต่อเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัมที่ความดัน 17.2 บาร์ อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส มาใช้ห้องเผาไหม้แบบวนเป็นเกลียว หรือแบบไซโคลน มีอัตราส่วนความยาว L ต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน D เท่ากับ 1.7 ดังรูปที่ 2.7 จากผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนไม่เปลี่ยนแปลง แต่ผลิตไอน้ำได้ 4.5-4.7 กิโลกรัม ต่อเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม ที่ความดันและอุณหภูมิดังกล่าว มีช่วงเวลากการเผาไหม้ประมาณ 15 เท่าของความเร็วในแนวแกน ผลของการเผาไหม้จัดว่ามีความสมบูรณ์สูง คือ ไม่พบก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 18-19 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.7 แสดงห้องเผาไหม้แบบวนเป็นเกลียวหรือไซโคลน

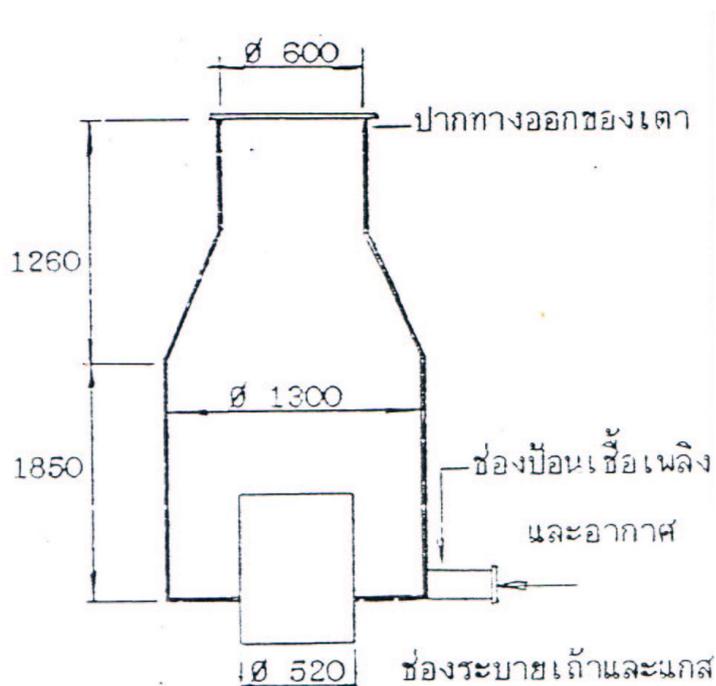


รูปที่ 2.8 แสดงห้องเผาไหม้แบบช่องป้อนอากาศหลายช่องทาง

งานวิจัยของ Sahati-Mehr [2] ได้สร้างอุปกรณ์ทดลองแบบไซโคลน 2 ชุด มีลักษณะทั่วไปดังรูปที่ 2.8 ป้อนอากาศเข้าในแนวสัมผัสหลายช่องทางตามความยาวของอุปกรณ์ และอุปกรณ์ที่มีขนาด  $L/D = 2.5$  ( $D=152.4$  mm) และอุปกรณ์จำลองห้องเผาไหม้มี  $L/D = 1.7$  ( $D=140$  mm) โดยมีวัตถุประสงค์ทางด้านพลศาสตร์การไหลจากน้ำ และ Polystyrene อุณหภูมิการเผาไหม้และองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย โดยใช้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำ จากการศึกษา พบว่า ภายในอุปกรณ์มีความปั่นป่วนและระดับการหมุนวนสูงตลอดปริมาตร ความเร็วของก๊าซขณะเผาไหม้ที่บริเวณ

ศูนย์กลางของการไหลวนภายในห้องเผาไหม้คือ 14-19 m/s และที่ปากทางออกประมาณ 25 m/s โดยอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปริมาตรห้องเผาไหม้ที่  $\Phi = 1.64-2.2$  มีค่าประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส

งานวิจัยของ Bin และ Bin Ali [3] ได้สร้างเตาแบบไซโคลนติดตั้งในแนวดิ่ง ที่ป้อนอากาศเข้าในแนวสัมผัสและใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.9 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทางด้านพลศาสตร์ของก๊าซที่มีผลกระทบท่อการเผาไหม้ จากการศึกษา พบว่า เปลวไฟมีความเสถียรสูง ในบริเวณที่การไหลของก๊าซสวนทางกันระหว่างวงแหวนของการไหลหมุนวนที่ใกล้กับผนังและการไหลหมุนวนย้อนกลับออกสู่ปากทางออก ซึ่งเป็นย่านที่มีความปั่นป่วนสูง โดยการเปลี่ยนแปลงของความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าในแนวสัมผัส จะทำให้ย่านที่มีความปั่นป่วนสูงเปลี่ยนแปลงตาม และเมื่อเพิ่มอากาศมากขึ้น จนถึงจุดที่ก่อนเปลวไฟจะดับสมรรถนะของห้องเผาไหม้ลดลง แสดงว่ามีช่วงเวลาการเผาไหม้ไม่เพียงพอ



รูปที่ 2.9 แสดงเตาเผาแบบไซโคลนติดตั้งในแนวดิ่ง