สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดเพื่อการอบแห้ง

A STUDY OF FLUIDIZED BED RICE HUSK COMBUSTION FOR DRYING

T055005

นายพิตินนท์ บัณฑุตระกูล
นายรุจธร บุตรจันทร์
นายวิบูรณ์ ราชวงศ์
นายวุฒิชัย บัวฮมบุรา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่ 55005
เลขทะเบียน
วัน,เดือน,ปี 4 มิ.ย. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดเพื่อการอบแห้ง

A STUDY OF FLUIDIZED BED RICE HUSK COMBUSTION FOR DRYING

ผู้จัดทำ

1. นาย พิตินนท์	บัณฑุตระกูล	รหัสประจำตัว	44015397
2. นาย รุจธร	บุตรจันทร์	รหัสประจำตัว	44015402
3. นาย วิบูรณ์	ราชวงศ์	รหัสประจำตัว	44015406
4. นาย วุฒิชัย	บัวฮมบุรา	รหัสประจำตัว	44015408

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดเพื่อการอบแห้ง

นาย พิตินนท์ บัณฑุตระกูล 44015397
นาย รุจธร บุตรจันทร์ 44015402
นาย วิบูรณ์ ราชวงศ์ 44015406
นาย วุฒิชัย บัวฮมบุรา 44015408

รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้างเตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อนำความร้อนจากการเผาไหม้ไปใช้อบผลผลิตทางการเกษตร อัตราป้อนแกลบ 0.1, 0.12 และ 0.16 kg/min และปรับอากาศเชิงปริมาตรที่ใช้ในการเผาไหม้คือ 14 และ 16 Lps ในการศึกษาผลจากการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อความเสถียรของเปลวไฟ การกระจายอุณหภูมิ ขนาดของขี้เถ้าเบา รวมถึงปัญหาการจับตัวเป็นก้อนของขี้เถ้า ได้ใช้อัตราส่วนการไหลของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (γ) จำนวน3ค่า คือ 40%, 50% และ 60% ในการทดลองได้วัดอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆภายในเตาเผา สังเกตลักษณะและขนาดของขี้เถ้าเบาจากปล่องทิ้งไอเสีย การทดลองได้แสดงถึงอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้มีค่าประมาณ850°C ควันจากการเผาไหม้มีเพียงเล็กน้อย เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดนี้ได้แสดงประสิทธิภาพที่ดีและง่ายต่อการทำงานในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ ไม่เกิดปัญหาการจับกันเป็นก้อนของขี้เถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A study of Fluidized bed rice husk combustion for drying

Pitinon Buntutrakool
Rujatron Budchan
Wiboon Rachawong
Wuttichai Buahombura

Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvonge Advisor

ABSTRACT

This project was to design and apply a fluidized bed rice husk incinerator for drying agriculture products. Measurements were made by setting a mass flow rate of rice husk to be 0.1, 0.12 and 0.16 kg/min and by varying the volumetric flow rates of the air to be 14 and 16 Lps. To study the effect of feeding secondary air on flame stability, temperature distribution and the sizes of fly ash and slagging in combustor three values of the ratio of mass flow rates of the secondary air to the total air, (γ), were used and set to be 40%, 50%, 60% each time. The temperature distributions for selected locations inside the combustor and the sizes of fly ash particles from the exhaust stack were measured and observed respectively. The experiment shows the maximum temperature of about 850 $^{\circ}$C in the chamber with less smoke of flue gas. The combustor shows an good performance, and ease of operation in firing the rice husk fuel, no result of slagging of fly ash particles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำสิ่งที่เป็นประโยชน์เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ พี่ปริญญา โท ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ลุงมณฑา เทียมเมือง ที่ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่างๆตลอดมา

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้วิจัย

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดในชีวิตก็คือ บิดา มารดา ของคณะผู้วิจัย ที่ให้การเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้กำลังใจ ทำให้คณะผู้วิจัยก้าวมาถึงวันนี้ ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นาย พิตินนท์ บัณฑุตระกูล
นาย รุจธร บุตรจันทน์
นาย วิบูรณ์ ราชวงศ์
นาย วุฒิชัย บัวฮมบุรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VIII
สารบัญรูป IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์ XII
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย 2
1.4 ขอบเขตของโครงงาน 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 บทนำ 4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.2.1 ธัชชัย ทั่วฉวิล และ สันติ วัชรอาภาไพบูลย์ 4
2.2.2 เรือโทประจักร์ จิตรีพิทย์ 5
2.2.3 นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ 6
2.2.4 Tim T. Fu and Sen Nieh 8
2.2.5 ศุภชัย เลื่อนลอย 9
2.2.6 วิศิษฐ์ ลีลาผาติกุล 9
2.2.7 เสรีย์ ตู้ประกาย 10
2.2.8 ศศิวิมล สูงสว่าง 11
บทที่ 3 ทฤษฎี 11
3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล 13
3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล 13
3.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล 14
3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้ 14
3.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ 15
3.2.1.1 การปั่นป่วนหรือการผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ 15
3.2.1.2 อุณหภูมิที่สูงพอต่อขบวนการเผาไหม้ 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1.3 อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับปริมาณอากาศ....16
3.2.1.4 เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง....16
3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง....16
3.3.1 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง....18
3.3.2 แบบจำลอง Unreacted core....18
3.4 อากาศชื้น....20
3.6.1 อากาศแห้งและอากาศชื้น....21
3.6.2 ความดันย่อยของอากาศและความดันไอ....21
3.6.3 อัตราส่วนความชื้น....21
3.6.4 ความชื้นสัมพัทธ์....21
3.6.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก....22
3.5 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)....22
3.6 อุณหภูมิอะเดียแบติก (Adiabatic Flame Temperature)....23
3.7 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชั่น....23
3.7.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชั่น....24
3.7.2 ลักษณะฟลูอิดไดเบด....24
3.7.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชั่น....26
3.7.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดเซชั่น....27
บทที่ 4 การออกแบบและการคำนวณ....32
4.1 การออกแบบเตาเผาแบบเทคนิคอากาศหมุนวน....32
4.2 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี....33
4.3 การคำนวณหาขนาดของเตาเผาโดยใช้ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เบด....36
บทที่ 5 การดำเนินงานวิจัยและการทดลอง....43
5.1 อุปกรณ์ในการทดลอง....43
5.1.1 เตาเผาแกลบแบบหมุนวน....43
5.1.2 ชุดป้อนอากาศให้กับระบบ....44
5.1.3 ท่อแยกอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ....45
5.1.4 ระบบป้อนเชื้อเพลิง....45
5.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา....47
5.1.6 ชุดอุ่นเตาเผา....48
5.1.7 ระบบดักจับฝุ่นขี้เถ้า....49
5.1.8 ระบบวัดอัตราการไหลของอากาศ....49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ตำแหน่งและการติดตั้งของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 50
5.3 การอุ่นเตา 51
5.4 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง 52
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์ 53
6.1 บทนำ 53
6.2 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบ 53
6.2.1 กรณีอัตราการไหลรวมคงที่ๆ 14 Lps 53
6.2.1.1 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 40% 53
6.2.1.2 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 50% 54
6.2.1.3 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 60% 54
6.2.2 กรณีอัตราการไหล 16 Lps 58
6.2.2.1 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 40% 58
6.2.2.2 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 50% 59
6.2.2.3 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 60% 59
6.3 อิทธิพลจากอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (γ) 63
6.3.1 กรณีอัตราการไหลรวมคงที่ๆ 14 Lps 63
6.3.1.1 อิทธิพลจาก γ = 40%, 50%, 60% ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10 kg/min 63
6.3.1.2 อิทธิพลจาก γ = 40%, 50%, 60% ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.12 kg/min 64
6.3.1.3 อิทธิพลจาก γ = 40%, 50%, 60% ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.16 kg/min 65
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ 66
7.1 สรุปผลการทดลอง 66
7.2 ข้อเสนอแนะ 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม 68
ภาคผนวก 69
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ 70
ภาคผนวก ข. แบบเตาเผาวอร์เทค 74
ภาคผนวก ค. ตารางบันทึกผลการทดลอง 79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ.....33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 เตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน 4
รูปที่ 2.2 แสดงแผนภูมิอุปกรณ์การทดลอง 5
รูปที่ 2.3 แสดงอุปกรณ์การทดลองเตาแบบวอร์เทคของ นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ 7
รูปที่ 2.4 แสดงแผนภูมิอุปกรณ์การทดลอง 8
รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมการทดลองของเตาเผาวอร์เทคหลายขั้น(MVC) 10
รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนที่นำมาประกอบเป็นตัวเตา 11
รูปที่ 2.7 แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 12
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง 17
รูปที่ 3.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง 17
รูปที่ 3.3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง 18
รูปที่ 3.4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้ 19
รูปที่ 3.5 ลักษณะชิ้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้ 19
รูปที่ 3.6 แสดงระดับของเบดในหอทดลอง 24
รูปที่ 3.7 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด 26
รูปที่ 3.8 แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆในชุดการทดลอง 28
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด 30
รูปที่ 4.1 แสดงถึงลักษณะและรูปร่างของเตาเผาแกลบ 32
รูปที่ 5.1 เตาเผาแกลบแบบหมุนวน 43
รูปที่ 5.2 ชุดป้อนอากาศให้กับระบบ 44
รูปที่ 5.3 ท่อแยกอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ 45
รูปที่ 5.4 ระบบป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 45
รูปที่ 5.5 Inverter 46
รูปที่ 5.6 Motor 46
รูปที่ 5.7 Screw Feed 46
รูปที่ 5.8 เทอร์โมคับเปิลชนิด K 47
รูปที่ 5.9 Digital Indicator 47
รูปที่ 5.10 หัวเผา 48
รูปที่ 5.11 ถังเชื้อเพลิงก๊าซ LPG 48
รูปที่ 5.12 Cyclone 49
รูปที่ 5.13 แผ่นออริฟิส 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.14 มาโนมิเตอร์ 50
รูปที่ 5.15 แสดงตำแหน่งและการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 51
รูปที่ 6.1 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 40% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวรัศมีของเตา....55
รูปที่ 6.2 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 40% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวความสูงของเตา....55
รูปที่ 6.3 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 50% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวรัศมีของเตา....56
รูปที่ 6.4 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 50% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวความสูงของเตา....56
รูปที่ 6.5 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 60% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวรัศมีของเตา....57
รูปที่ 6.6 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 60% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวความสูงของเตา....57
รูปที่ 6.7 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 40% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวรัศมีของเตา....60
รูปที่ 6.8 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 40% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวความสูงของเตา....60
รูปที่ 6.9 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 50% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวรัศมีของเตา....61
รูปที่ 6.10 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 50% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวความสูงของเตา....61
รูปที่ 6.11 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 60% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวรัศมีของเตา....62
รูปที่ 6.12 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ, γ = 60% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ตามแนวความสูงของเตา....62
รูปที่ 6.13 กรณีใช้อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10 kg/min แสดงการกระจายตัว
ของอุณหภูมิตามแนวรัศมี....63
รูปที่ 6.14 กรณีใช้อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.12 kg/min แสดงการกระจายตัว
ของอุณหภูมิตามแนวรัศมี....64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.15 กรณีใช้อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.16 kg/min แสดงการกระจายตัว
ของอุณหภูมิตามแนวรัศมี 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_p	พื้นที่หน้าตัดท่ออากาศปฐมภูมิ , (m^3)
A_s	พื้นที่หน้าตัดท่ออากาศทุติยภูมิ , (m^3)
A/F	อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง
$(A/F)_{actual}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางปฏิบัติ
$(A/F)_{stoic}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี
C_d	discharge coefficient
D_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศปฐมภูมิ , (m)
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศทุติยภูมิ , (m)
DW	น้ำหนักของแกลบแห้ง , (kg)
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของออริฟิสของท่ออากาศปฐมภูมิ , (m)
d_s	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของออริฟิสของท่ออากาศทุติยภูมิ , (m)
g	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก , (m/s^2)
MC_{wet}	ปริมาณความชื้นตามมาตราฐานเปียก , (%)
MW	มวลโมเลกุล , (kmol)
m_a	มวลของอากาศแห้ง , (kg)
m_g	ปริมาณไอน้ำในอากาศสูงสุดที่อุณหภูมิใด ๆ , (kg)
m_v	มวลของไอน้ำ , (kg)
$\dot{m}_{air}$	อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
$\dot{m}_{fuel}$	อัตราการป้อนแกลบ , (kg/min)
n	จำนวนโมล
P	ความดันของอากาศชื้น , (Pa)
P_a	ความดันย่อยของอากาศแห้ง , (Pa)
P_g	ความดันของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิใด ๆ , (Pa)
P_v	ความดันไอ , (Pa)
Q_{ac}	อัตราการไหลจริงเชิงปริมาตร , (m^3/s)
R	รัศมีภายในของเตาเผาวอร์เทค , (m)
R_a	ค่าคงที่ของอากาศ , (kJ/kg·K)
R_v	ค่าคงที่ของไอน้ำ , (kJ/kg·K)
r	พิกัดในแนวรัศมีภายในเตาเผาวอร์เทค , (m)
T	อุณหภูมิ , ($^{\circ}C$)
T_{db}	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง , ($^{\circ}C$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

Re_p	$\frac{d_p U_o \rho_g}{\mu}$ ค่าเรย์โนนัมเบอร์ของอนุภาค
RTD	residenc time distribution
TDH	ค่าความสูงของการหลุดลอย (transprot disengaging height), m
U	ความเร็ว (m/sec)
U_{mf}	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์
U_t	terminal Velocity of a falling particle, (m/s)
U_o	superficial fluid velocity
r	พิกัดในแนวรัศมีภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน , (m)
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาคของของแข็ง
ρ_g	ความแนาแน่นของก๊าซ
λ	อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด
ϕ_S	ค่าความกลม (sphericity) ของอนุภาค
ε	Vaid Fraction, ไม่มีหน่วย
ε_f	สัดส่วนช่องว่างของเบดขณะเกิดการฟลูอิดไดซ์
ε_{mf}	สัดส่วนช่องว่างของเบดที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากในปัจุบันนี้เกษตรกรส่วนใหญ่จะประสบปัญหาทางด้านการเก็บรักษาพืชผลทางการเกษตรให้ได้ระยะเวลาที่พอเหมาะกับความต้องการของตลาด สาเหตุส่วนใหญ่ของพืชผลทางการเกษตรที่ไม่สามารถเก็บรักษาได้นั้นมีผลอันเนื่องมาจากความชื้นในผลผลิต ดังนั้นถ้าเราสามารถลดความชื้นที่เกิดขึ้นได้ก็จะทำให้สามารถเพิ่มระยะเวลาของการเก็บรักษาไว้ วิธีที่ใช้ในการไล่ความชื้นก็คือ การอบโดยการใช้พลังงานความร้อนซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมได้อีกทางหนึ่ง โดยที่เราจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของต้นทุนเชื้อเพลิงที่จะใช้ในการผลิตพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการอบแห้ง เชื้อเพลิงที่น่าสนใจและสามารถหาได้โดยทั่วไปสำหรับประเทศเกษตรกรรมคือ "เชื้อเพลิงชีวะมวล" เช่น แกลบ ขี้เลื่อย ฟาง เป็นต้น

1.1 ความเป็นมา

พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่ตามแหล่งต่างๆ มีอัตราลดลงอย่างมาก และจะเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาการใช้พลังงานในอนาคต ดังนั้นความน่าสนใจต่อแหล่งพลังงานหมุนเวียนซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดจึงเพิ่มขึ้น ในจำพวกแหล่งพลังงานที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้น เชื้อเพลิงชีวมวลคือหนึ่งในจำพวกแหล่งพลังงานเหล่านั้นเนื่องจากมีอยู่ทั่วไปในโลก แกลบคืออีกหนึ่งชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวลที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ แกลบคือเปลือกนอกของเมล็ดข้าว คิดเป็น20%โดยน้ำหนักของการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกอันจะก่อให้เกิดเป็นขยะ ประมาณได้ว่าในแต่ละปีมีข้าวเปลือกจากทั่วโลกมากกว่า80ล้านตัน เฉพาะที่ประเทศไทยมีโรงสีข้าวประมาณ 40, 000 โรง และมีแกลบที่ได้จากการสี 4.4-4.6 ล้านตันต่อปี ซึ่งคิดเป็นค่าความร้อนเทียบเท่ากับปริมาณน้ำมันดิบ 1.46-1.53 ล้านตัน

ปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่มากจนเกินที่จะส่งออกสู่ท้องตลาดของเกษตรกรในปัจุบันนี้ส่งผลให้ราคาพืชผลทางการเกษตรตกต่ำ เนื่องด้วยระยะเวลาการเก็บรักษาที่สามารถเก็บรักษาได้ในระยะเวลาอันสั้น ส่งผลให้พืชผลทางการเกษตรได้รับความเสียหาย อีกทั้งการเก็บเกี่ยวในแต่ละฤดูโดยเกษตรกรมีความต้องเก็บเกี่ยวผลผลิตในคราวละมากๆ โดยไม่คำนึงถึงความต้องการของตลาดอาทิเช่น ถั่วลิสง ถั่วเหลือง หรือเมล็ดข้าวโพดจนทำให้ลืมคำนึงถึงวิธีการเก็บดูรักษา การลดความชื้นโดยใช้ความร้อนให้กับพืชผลทางการเกษตรก็เป็นอีกวิธีหนึ่งของการเก็บดูแลรักษา เพื่อยืดอายุการเก็บดูแลรักษาให้มีระยะเวลานานพอที่เกษตรกรจะสามารถทยอยผลผลิตเข้าสู่ท้องตลาดได้อีกทั้งยังไม่ทำให้เสียราคาในการขาย

การนำความร้อนที่ได้ไปลดความชื้นในพืชผลในด้านเกษตรโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชั่นนับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการยืดเวลาในการเก็บรักษา อีกทั้งเชื้อเพลิงแกลบยังมีต้นทุนที่ถูกและสามารถหาได้ง่ายสำหรับเกษตรกรที่จะนำไปใช้ประโยชน์ โดยการออกแบบจะคำนึงถึงขนาดที่เหมาะสมในการใช้งานและคำนึงถึงปริมาณความร้อนที่เตาสามารถผลิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากเตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้กันในปัจจุบันนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อที่จะให้มีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงและลักษณะการเผาสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆกัน การนำเอาเทคนิคอากาศหมุนวนมาช่วยก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของเชื้อเพลิงแกลบเพื่อการคลุกเคล้าที่ดีระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงและยังช่วยเพิ่มในส่วนของระยะเวลาในการเผาไหม้ สำหรับโครงงานนี้จะนำเอาเทคนิคของอากาศหมุนวนมาประยุกต์ใช้กับเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

1.2.1 เพื่อทำการออกแบบและสร้างเตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิคอากาศหมุนวน

1.2.2 เพื่อทำการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิคอากาศหมุนวน

1.2.3 เพื่อทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนวนหลายขั้นได้แก่ อัตราป้อนเชื้อเพลิง,ปริมาณอากาศส่วนเกิน,ปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดโดยนำเทคนิคอากาศหมุนวนมาใช้เป็นแนวคิดในการออกแบบ ซึ่งอาศัยเทคนิคการหมุนวนของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้เพื่อก่อให้เกิดความปั่นป่วน ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้ดีขึ้นและเพื่อช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้และทำให้เปลวไฟภายในเตามีความเสถียรยิ่งขึ้น

1.4 ขอบเขตของโครงงาน

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้

1.4.2 ออกแบบและสร้างเตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิคอากาศหมุนวน

1.4.3 ทำการทดสอบการเผาไหม้เตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิคอากาศหมุนวน

1.4.4 ทำการปรับค่าอัตราการไหลรวมของอากาศที่ 14 Lps และ 16 Lps ตามลำดับ

1.4.5 ทำการปรับค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.1, 0.12 และ 0.16 kg/min ตามลำดับ

1.4.6 ทำการศึกษาผลที่ได้จากการปรับอากาศทุติยภูมิอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air, γ) จำนวน 3 ค่าคือ 40%, 50% และ 60%

1.4.7 ทำการวัดอุณหภูมิเพื่อศึกษาพฤติกรรมและการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถเป็นต้นแบบในการออกแบบและสร้างเตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิคอากาศหมุนวนที่มีขนาดเล็กกว่าในอดีตที่ผ่านมา ให้มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานจริง

1.5.2 สามารถนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิคอากาศหมุนวนไปประยุกต์ไปใช้ในงานด้านเกษตรกรรรม เช่น การนำไปอบไล่ความชื้นพืชผลทางการเกษตร หรือนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมได้ เป็นต้น

1.5.3 สามารถนำวัสดุที่เหลือใช้ในทางการเกษตร มาใช้เป็นพลังงานทดแทนและนำมาหมุนเวียนใช้งานเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์

1.5.4 ช่วยลดปริมาณแกลบที่เหลือใช้ในทางการเกษตรซ้ำยังเป็นการช่วยเร่งย่อยสลายแกลบที่เหลือใช้

1.5.5 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาเตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิคอากาศหมุนวนให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

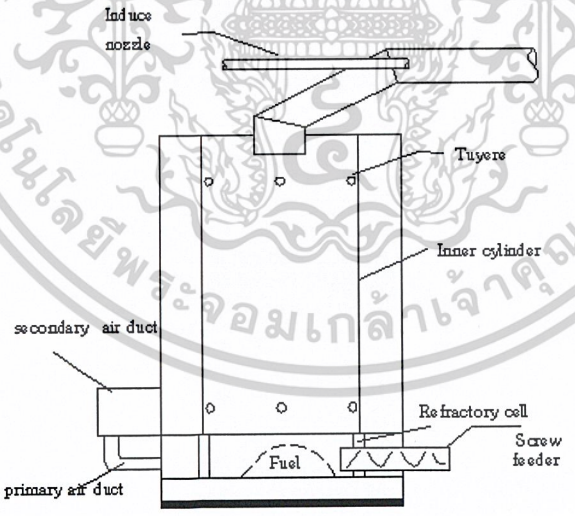
บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดในงานวิจัยทางด้านการเผาไหม้เพื่อนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ โดยใช้เชื้อเพลิงชีวะมวลหรือเชื้อเพลิงแข็ง เนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนอีกทางเลือกหนึ่งเนื่องจากราคาถูกและเป็นพลังงานที่สะอาดแทบไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในท้องถิ่นทั่วไป อาทิเช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวะมวล เป็นต้น ซึ่งในส่วนของการศึกษาและพัฒนานี้เพื่อหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ให้เหมาะสมต่อการใช้งาน และพิจารณาความเหมาะสมทางด้านต้นทุนการผลิตเพื่อเป็นประโยชน์ในงานด้านการเกษตรหรืองานทางด้านอุตสาหกรรมต่อไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ธัชชัย ทั่วถวิล และ สันติ วัชรอาภาไพบูลย์ [1] ทำการศึกษาทดลองเตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน ได้ทำการพัฒนาระบบการเผาไหม้เดิมให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยห้องเผาไหม้มีลักษณะดังรูปที่ 2.1



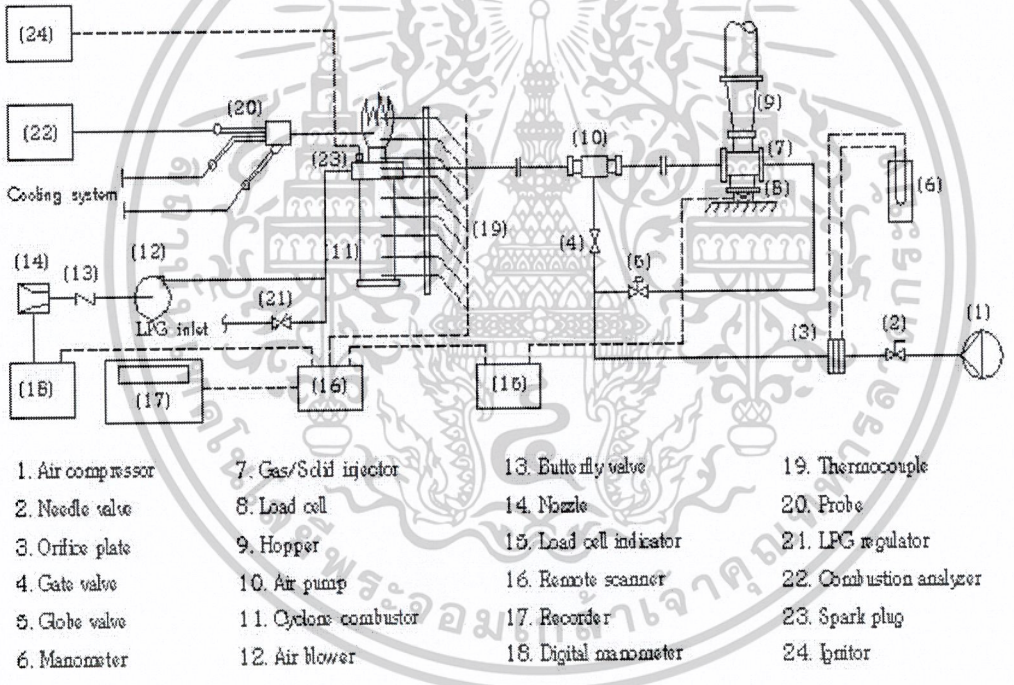
รูปที่ 2.1 เตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน[1]

จากการทดลองทำการเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio) ที่มีผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อน และทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านพัดลมดูดต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนที่อัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิงคงที่ การทดลองให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 0.225 กิโลกรัมต่อนาที และกำหนดค่าอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงมีค่า 5:1, 6:1, 7:1, 8:1 และ 9:1 ท่ออากาศปฐมภูมิและท่ออากาศทุติยภูมิเปิดประมาณ 30 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ท่อตามลำดับ ช่องพัดลมดูดอากาศเปิดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนของอากาศต่ออัตราส่วนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 6:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซร้อนสูงสุดเท่ากับ 595 องศาเซลเซียส และปริมาณความร้อนที่ได้รับอยู่ในปริมาณสูง และเมื่อทำการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงช่องเปิดของพัดลมดูดที่ 0, 20, 60 ,และ100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่า 6:1 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดของก๊าซร้อนเท่ากับ 639 องศาเซลเซียส โดยที่ไม่ใช้พัดลมดูดอากาศ

2.2.2 เรือโทประจักร์ จิตรีพิทย์ [2] ทำการศึกษาวิจัยการเผาขี้เลื่อนในเตาเผาไซโคลน ได้ทำการศึกษารูปแบบการไหลของอนุภาคเชื้อเพลิงใช้ห้องเผาไหม้ที่ผลิตจากพลาสติกใสแอลคาไรด์ (Alcaride) ลักษณะการเผาไหม้ของขี้เลื้อย ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสมมูล, Φ (Equivalence Ratio) ที่ค่า



รูปที่2.2 แสดงแผนภูมิอุปกรณ์การทดลอง[2]

ต่างๆและทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น ในการทดลองใช้ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 155 มิลิเมตร ขนาดของปากทางออกของห้องเผาไหม้เท่ากับ 68.5 มิลิเมตร ความสูงของห้องเผาไหม้เท่ากับ 310 มิลลิเมตร

การสังเกตลักษณะการไหลของห้องเอาไหม้จำลองพบว่า อนุภาคของเชื้อเพลิงได้รับอิทธิพลจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนวน และเกิดการเคลื่อนที่วนเป็นเกลียวสู่ก้นไซโคลนแล้วไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

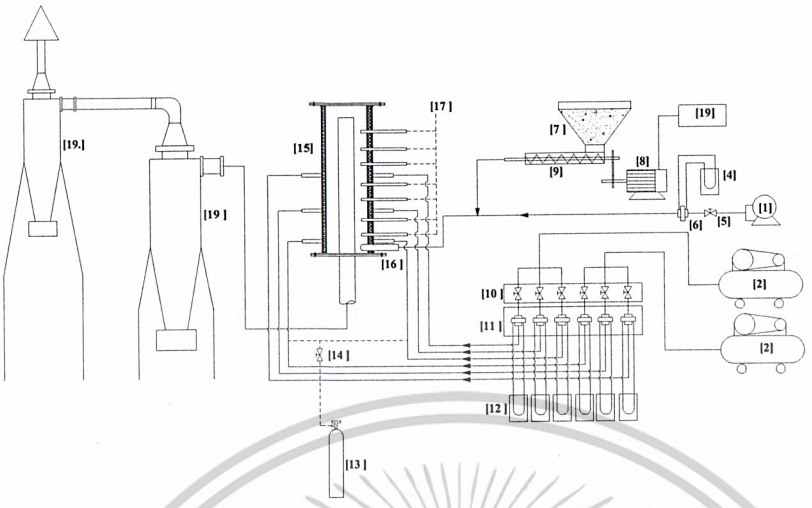
ย้อนกลับจากก้นไซโคลนตามแนวแกนออกสู่ปากทางออก การป้อนเฉพาะอากาศปฐมภูมิลักษณะการไหลวนเป็นเกลียวเดียว กรณีที่ป้อนทั้งอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมินั้นอนุภาคการเคลื่อนที่จะแยกตัวออกเป็น 2 กลุ่ม ถ้าการป้อนอากาศให้มีอัตราการไหลมากขึ้นจะทำให้ระยะห่างของเกลียวยาวขึ้น การทดลองหาลักษณะการแพร่กระจายอุณหภูมิของเปลวไฟ ที่ค่า $\Phi < 1.5$ เป็นการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินอยู่ในช่วงต่ำ จะเกิดการเผาไหม้บริเวณช่วงกลางจนถึงเหนือทางออกของห้องเผาไหม้ มีเชื้อเพลิงที่ไม่เกิดการเผาไหม้ตกค้างอยู่มาก ก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สูงมาก ประมาณ 3000 ppm ปริมาณออกซิเจน (O_2) ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ เปลวไฟไม่เสถียรเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ช่วง Φ มากกว่า 1.5 ถึง 2.0 การเผาไหม้เกิดเป็นบริเวณกว้างทั่วทั้งเตา เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หมดไม่มีตกค้างอยู่ เปลวไฟมีความเสถียรสูง องค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ในช่วง 900 ถึง 1000 ppm กรณีที่ค่า $\Phi > 2.0$ ปริมาณอากาศที่ใช้มากเกินพอมากๆ การเผาไหม้เกิดขึ้นตั้งแต่บริเวณก้นของเตาเผาขึ้นมายกเว้นบริเวณรอบๆผนังห้องเผาไหม้ ลักษณะของขี้เถ้าจะมีเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ติดออกมาจำนวนมาก อุณหภูมิของเปลวไฟอยู่ในช่วง 1000 ถึง 1100 องศาเซลเซียส ลักษณะของเปลวไฟไม่เสถียร

2.2.3 นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ [3] ทำการศึกษาเบื้องต้นของการออกแบบ สร้าง และทดสอบหาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาแบบวอร์เทค โดยทำการวัดและสังเกตการกระจายอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ภายในเตา, ขี้เถ้า และควันที่ออกมากับแก๊สไอเสีย ในการวัดจะกำหนดอัตราการไหลเชิงมวลของแกลบละเอียดเท่ากับ 0.2 kg/min โดยตลอดและทำการปรับค่า Equivalence ratio (Φ) เท่ากับ 0.7, 0.8, 1.0 และ 1.2 ในการเผาแต่ละครั้งจะกำหนดอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.2.3.1 ขั้นตอนการออกแบบและข้อสังเกตจากการทดลองพบว่า สามารถติดเตาเผาวอร์เทคได้ง่ายและสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงโดยไม่ใช้เชื้อเพลิงอื่นช่วยในการเผาไหม้นอกเสียจากการขั้นตอนการอุ่นเตา โดยการอุ่นเตาจะใช้แก๊สเชื้อเพลิงเหลวเพื่อช่วยให้การเผาไหม้ให้เกิดขึ้นได้เองและต่อเนื่อง (Spontaneous Combustion) และเกิดการเผาไหม้แกลบได้อย่างหมดจดทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย เนื่องจากท่อทิ้งเถ้าลอยอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของเตาวอร์เทค ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงแกลบที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถหลุดออกมาจากท่อทิ้งถ้าลอยได้จนกว่าจะถูกเผาไหม้จนหมดทำให้ได้เถ้าที่มีขนาดเล็กจึงจะสามารถหลุดออกมาได้

2.2.3.2 ศึกษาถึงอัตราส่วนสมมูล (Equivalance Ratio, Φ) ที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ จากการคำนวณพบว่าอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงแกลบทางทฤษฎีเท่ากับ 4.850 : 1 โดยน้ำหนัก (ซึ่งงานวิจัยนี้กำหนดให้อัตราการไหลเชื้อเพลิงแกลบให้คงที่เท่ากับ 0.2 kg/min) โดยจะทำการทดลองที่ Φ = 0.7, 0.8, 1.0 และ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



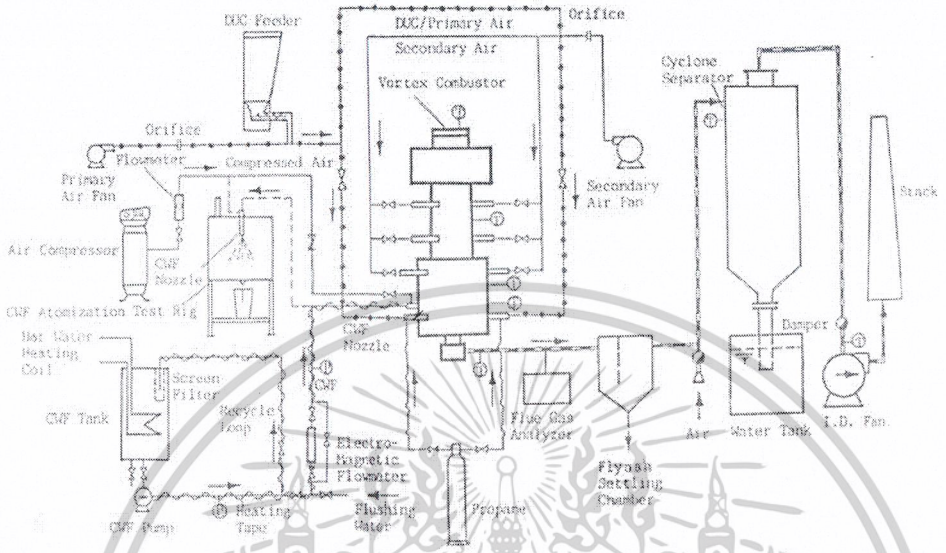
1. Blower	2. Air compressor1	3. Air compressor2	4. Manometer	5. Needle valve	6. Orifice plate
7. Hopper	8. Motor	9. Screw feeder	10. Needle valve	11. Orifice plate	12. Manometer
13. L.P.G. supply	14. Burner	15. Vortex combustor	16.Primary air nozzle	17. Indicator	18. Inverter
19. Cyclone					

รูปที่ 2.3 แสดงอุปกรณ์การทดลองเตาแบบวอร์เทคของ นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์[3]

จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองเท่ากับปริมาณอากาศทางทฤษฎี สามารถทำให้การกระจายอุณหภูมิภายในเตาวอร์เทคสูงกว่ากรณี $\Phi = 0.7, 0.8$ และ 1.2 และในการศึกษาถึงอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออัตรการไหลของอากาศทั้งหมด (λ) ที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ โดยทำการทดลองที่ $\lambda = 0, 0.2$ และ 0.4 โดยการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่ 2 จะมีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนที่ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ การจ่ายอากาศส่วนที่ 2 จะถูกจ่ายอากาศในแนวสัมผัสกับผนังด้านในของเตาเผาวอร์เทคซึ่งจะช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้แบบหมุนวนภายในเตาเผาวอร์เทค ดังนั้นเมื่อ λ มากขึ้นจะเป็นการเพิ่มการเผาไหม้แบบหมุนวนมากขึ้นตาม ซึ่งจะส่งผลดีต่อการเผาไหม้ 2 ประการหลักๆ คือ ประการแรกจะช่วยทำให้เกิดการผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่งถึงระหว่างเชื้อเพลิงแกลบกับอากาศมากขึ้น ประการที่ 2 เป็นการเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ภายในเตาเผาวอร์เทคให้นานมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้มากขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า $\Phi = 1.0$ และ $\lambda = 0.4$ ทำให้ได้อุณหภูมิสูงสุดจากการเผาไหม้เท่ากับ 1,135 ^{o}C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของการทดลอง ควันที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย มีการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ขี้เถ้าที่ออกมามีสีดำปนเทา และจากการวิเคราะห์แก๊สไอเสียพบว่า O_2 เฉลี่ยเท่ากับ 4.41 %, CO_2 เฉลี่ยเท่ากับ 15.34 %, มีปริมาณ CO เฉลี่ยต่ำซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 130.25 ppm., มีปริมาณ NO_x เฉลี่ยเท่ากับ 764.00 ppm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 Tim T. Fu and Sen Nieh [4] ทำการศึกษาทดลองเตาเผาวอร์เทค รายละเอียดของอุปกรณ์และลักษณะของเตาเผาดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภูมิอุปกรณ์การทดลอง[4]

ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ซึ่งถ่านหินที่นำมาทดสอบมี 2 ชนิด คือ DUC (Dry Ultrafine Coal) เป็นเชื้อเพลิงถ่านหินที่นำมาบดให้เป็นผงเหมือนกับแป้งมีขนาดเท่ากับ 11.5 μm และ CWF (Coal Water Fuel) เป็นเชื้อเพลิงถ่านหินที่มีน้ำปนอยู่มีลักษณะคล้ายกับโคลน การทดสอบทำการวัดอุณหภูมิภายในและวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น

จากการทดลองพบว่า การเผาไหม้มีอัตราความร้อนเท่ากับ 0.15 MB/H (0.15×10^{6} Btu/hr) และอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้บริเวณส่วนล่างของห้องเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 2000 $^{\circ}F$ อุณหภูมิจะลดลงเมื่อความสูงของห้องเผาไหม้สูงขึ้น บริเวณส่วนบนสุดของห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิเท่ากับ 1100 $^{\circ}F$ และบริเวณทางออกของท่อไอเสียอุณหภูมิเท่ากับ 1650 $^{\circ}F$ จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ประกอบด้วย O_2, CO_2, CO, NO_x, SO_x และคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ ปริมาณของ O_2 จะลดลงตามความสูงของห้องเผาไหม้ เนื่องจาก O_2 ถูกนำไปใช้เพื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ปริมาณก๊าซ CO บริเวณส่วนล่างของห้องเผาไหม้เท่ากับ 550 ppm และบริเวณท่อทางออกของก๊าซไอเสียมีปริมาณ CO เท่ากับ 250 ppm อิทธิพลของอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิง DUC พบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ในกรณีที่ไม่มีอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์ และกรณีที่ใช้อากาศทุติยภูมิประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นท่ากับ 98.5 เปอร์เซ็นต์ เพราะเนื่องจากอากาศทุติยภูมิทำให้เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันได้ดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้น และปริมาณ NO_x ต่ำกว่า 50 ppm ปริมาณคาร์บอนในขี้เถ้าลดลงถึง 4 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

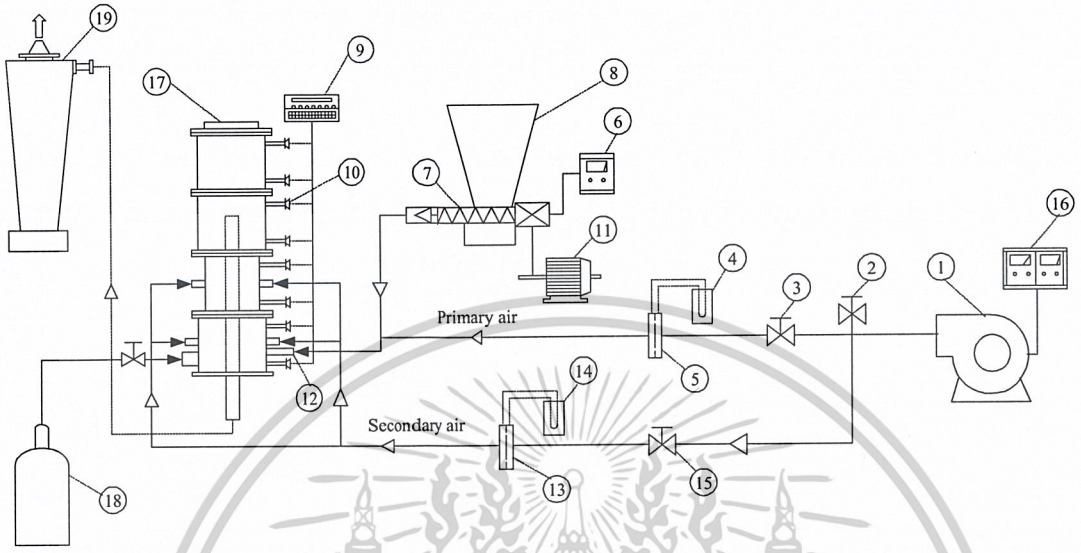
2.2.5 ศุภชัย เลื่อนลอย [5] ได้ทำการศึกษาของคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นภายในเตาเผาแกลบแบบวอร์เทค ระดับความชื้นของแกลบจำนวน 3 ค่า ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 9.2%, 12% และ 15% โดยน้ำหนัก การทดลองทำการกำหนดค่าอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.3 kg/min โดยตลอด อัตราการไหลโดยมวลของอากาศจะปรับให้มีค่าอัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 สำหรับแต่ละอัตราการไหล ที่แต่ละอัตราส่วนสมมูลจะกำหนดสัดส่วนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (อากาศปฐมภูมิ+อากาศทุติยภูมิ), (λ) เท่ากับ 0.2, 0.3 และ 0.4 เพื่อตรวจสอบอิทธิพลจากค่า λ ในการทดลองนี้เราจะทำการทดลองกับเชื้อเพลิงแกลบละเอียดซึ่งมีขนาดเท่ากับ 0.84-1.00 มม.

ซึ่งการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบวอร์เทค ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.9-1.0 ให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและมีค่าสูง สำหรับค่าปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบที่ 9.2 % จะให้การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีค่าสูงสุดประมาณ 1000°C และหากความชื้นเชื้อเพลิงแกลบสูงเกินกว่า 15% จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่ต่อเนื่องเพราะจะทำให้เกิดการดับซึ่งเป็นรผลมาจากอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ต่ำกว่าจุดติดไฟได้เองของเชื้อเพลิงแกลบ ส่วนผลของอากาศทุติยภูมิที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ λ เท่ากับ 0.3 จะให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและมีค่าสูงที่สุด แต่ผลของอากาศทุติยภูมินี้จะไม่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เมื่ออัตราส่วนสมมูล < 1.0 แต่จะมีผลในการช่วยลดขนาดของขี้เถ้าลอยที่ออกจากห้องเผาไหม้ ดังนั้นในการนำเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเราจะต้องทำการลดปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในแกลบให้มีค่าที่ต่ำ เพื่อลดปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปในการไล่ความชื้นและจะทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาเพิ่มขึ้น

2.2.6 วิศิษฐ์ ลีลาผาติกุล [6] ศึกษาขั้นวอร์เทคของเตาเผาแกลบ ที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ภายในเตาซึ่งเตาเผาไหม้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 มิลลิเมตร (D) โดยมีแกนกลางภายในเป็นท่อทิ้งไอเสีย และมีการติดตั้งตำแหน่งท่อฉีดอากาศไว้ในแนวสัมผัสรอบ ๆ ผนังเตาเผาไหม้ เพื่อทำให้เกิดการไหลหมุนวนของอากาศภายใน ขนาดของเตาเผาไหม้ส่วนบนและส่วนล่าง ถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดจาก 1.0D เป็น 0.75D และ 0.5D ตามที่ได้ออกแบบไว้ การเปลี่ยนขนาดเตาเผาส่วนบนและส่วนล่างนี้ ก่อให้เกิดการหมุนวนหลายขั้นภายในเตาเผาไหม้ รายละเอียดของอุปกรณ์ในการทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 2.1 โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในเตา เมื่อทำการปรับค่าอัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 โดยแต่ละการทดลองจะกำหนดอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0.0, 0.15, และ 0.25 ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบคงที่เท่ากับ 0.3 kg/min. จากการทดลองเตาเผาส่วนบนและส่วนล่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5D และ 1.0D ตามลำดับ ที่ค่า Φ เท่ากับ 0.8 และที่ค่า λ เท่ากับ 0.0 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาเท่ากับ 1,192 องศาเซลเซียส ที่บริเวณวงแหวนของห้องเผาไหม้ โดยดวันที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อย และ จากการวิเคราะห์ก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอเสียของเตาเผาวอร์เทค พบว่าประกอบด้วย ก๊าซออกซิเจน เท่ากับ 1.5%, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 18.3% และ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ เท่ากับ 205 ppm.

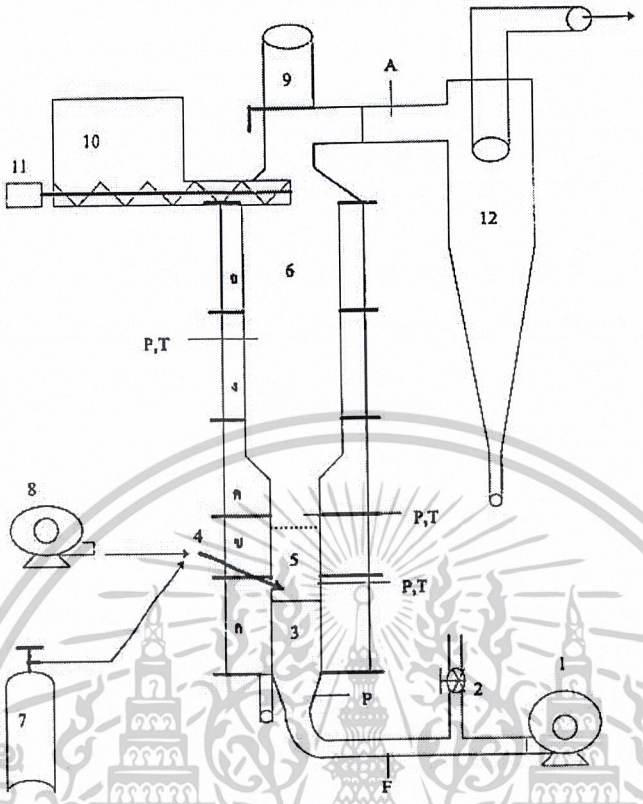


(1) Blower (2) Ball valve (3) Globe valve (4) U-tube manometer (5) Orifice meter
(6) Inverter (7) Screw feeder (8) Hopper (9) Temperature indicator (10) Thermocouple
(11) Motor (12) Primary air (13) Orifice meter (14) U-tube manometer (15) Globe valve
(16) Inverter (17) Combustor (18) LPG (19) Cyclone

รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมการทดลองของเตาเผาวอร์เทคหลายขั้น(MVC)[6]

2.2.7 เสรีย์ ตู้ประกาย [7] ศึกษาและออกแบบเตาเผากากตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้สมบัติกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียห้วยขวาง เป็นข้อมูลพื้นฐานส่วนรายละเอียดของอุปกรณ์ทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 2.2 โดยลักษณะเตาเผาเป็นรูปทรงกระบอก หล่อด้วยคอนกรีตทนไฟ บริเวณส่วนเผาไหม้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.2 เมตร ส่วนขยายด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.4 เมตร ใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงป้อนหัวเผา พบว่าสภาพที่เหมาะสมในการดำเนินการอยู่ที่ อัตราการป้อนก๊าซ LPG 4.35 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ปริมาณอากาศสำหรับฟลูอิดไดซ์ 32 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อากาศผสม LPG ที่หัวเผา 7.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ศึกษาอัตราการป้อนการตะกอนที่ 10, 15, 20, 25, 30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 95.62 % ที่อัตราการป้อน 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพการทำลายกากตะกอนสูงสุดเท่ากับ 95.89 % ที่อัตราการป้อนกากตะกอน 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. Fluidized-air blower	5. Sand bed	9. Butterfly valve	P-จุดวัดความดัน
2. By part	6. Freebord	10. Screw feeder	T-จุดวัดอุณหภูมิ
3. Distributor	7. LPG tank	11. Motor	A-จุดวัดก๊าซเผาไหม้
4. Preheat burner	8. Air compressor	12. Cyclone	F-จุดวัดอัตราการไหลอากาศ

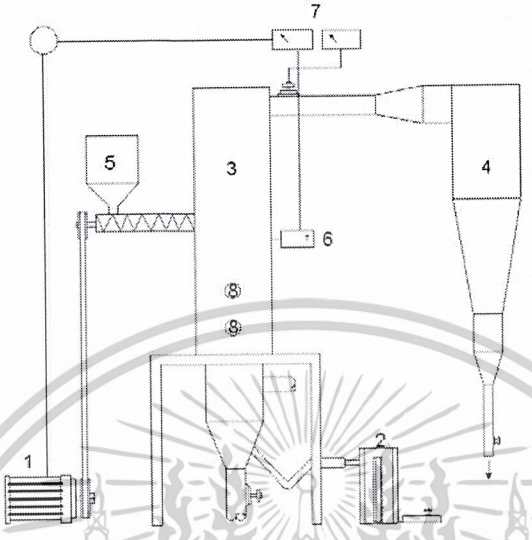
รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนที่นำมาประกอบเป็นตัวเตา[7]

2.2.8 ศศิวิมล สูงสว่าง [8] ได้ทำการวิจัยการเผาไหม้ของแกลบโดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้แกลบที่ทำให้ได้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มทุน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อเทคโนโลยีในการเปลี่ยนพลังงานเคมีที่มีอยู่แกลบที่เหลือใช้ให้เป็นพลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

โดยในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด และศึกษาการทำงานรวมถึงกลไกการทำงานของเครื่องมือวิจัยของเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 1 จากการศึกษาทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรดังนี้ คือ อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิของการเผาไหม้ เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไดซ์เบด ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศจาก 20.62 - 45.67 m/s และอุณหภูมิของการเผาไหม้จาก 500 - 800 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผาไหม้แกลบในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดคือ ความเร็วของอากาศเท่ากับ 32.77 m/s และอุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าประมาณ 700 องศาเซล



1. มอเตอร์ 2. เครื่องวัดความเร็วของอากาศ 3. ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์ 4. ไซโคลน
5. เครื่องป้อนวัตถุดิบ 6. เครื่องวัดอุณหภูมิ 7. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
8. ช่องสำหรับดูการเผาไหม้ภายในคอลัมน์

รูปที่ 2.7 แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง[8]

เซียส ซึ่งประสิทธิภาพของการเผาไหม้ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 96.91 โดยที่กำหนดอัตราการป้อนแกลบไว้ที่ 3.05 kg/hr และขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาไหม้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีใช้อยู่พบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าสูงกว่าประมาณร้อยละ 47 - 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎี

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าเชื้อเพลิงก๊าซและของเหลวมาก เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะต้องอาศัยพื้นที่ผิวใหม่ของอนุภาคเชื้อเพลิงในการให้ออกซิเจนไปจับตัวกับคาร์บอนส่วนที่เหลือในเชื้อเพลิงเพื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องทำการศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งและตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและทำนายพฤติกรรมและลักษณะการเผาไหม้

3.1 เชื้อเพลิงชีวะมวล

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการทับถมตัวของซากพืชซากสัตว์ ภายใต้ผิวโลกหรือที่เรียกว่าเชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์ (Fossil fuel) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิงอีกประเภทหนึ่งคือ เชื้อเพลิงชีวะมวล (Biomass) ซึ่งเป็นวัตถุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น ไม้ ขี้เลื่อย และแกลบข้าว เป็นต้น เชื้อเพลิงประเภทชีวมวลนี้ส่วนใหญ่จะได้จากสิ่งที่เหลือทิ้งจากการเกษตร ซึ่งสามารถหาได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการทำเกษตรกรรม

3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวะมวล

เชื้อเพลิงชีวะมวลสามารถแยกประเภทได้เป็น 4 ประเภท คือ

3.1.1.1 เชื้อเพลิงชีวะมวลที่ได้จากไม้ (Forest biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็นไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) และไม้เนื้อแข็ง (Hard wood) ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกนิน (Lignin) อยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ในไม้เนื้อแข็ง ตัวอย่างของเชื้อเพลิงประเภทนี้ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ และขี้เลื่อย

3.1.1.2 เชื้อเพลิงชีวะมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือใช้จากการเกษตร เช่น แกลบข้าว, ฟางข้าว ซึ่งสารพวกนี้จะมีปริมาณลิกนินต่ำโดยประมาณ 0 – 20 เปอร์เซ็นต์

3.1.1.3 เชื้อเพลิงชีวะมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial biomass) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล คือ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับปะรดที่ได้จากโรงงานผลิตสับปะรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณความชื้นสูงมาก

3.1.1.4 เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวะมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไปจะเป็นเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิงชีว-มวลและการที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวะมวลมีค่าแตกต่างกันด้วยดังนี้

ชานอ้อย	มีค่าความร้อน	1,900	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
ขยะ	มีค่าความร้อน	2,000	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
แกลบ	มีค่าความร้อน	3,300	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
ขี้เลื่อย	มีค่าความร้อน	4,000	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

เชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบที่ได้จากส่วนประกอบของเมล็ดข้าว ซึ่งสามารถอธิบายที่มาของแกลบได้ดังนี้ เมล็ดข้าวเป็นผลชนิด คาริออฟซีส (Caryopsis) ส่วนที่เป็นเมล็ดที่ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Pale)ประกบกัน แบบตะขอฟัน (Interlocking fold) ทั้งสองข้างตลอดแนวความยาว ภายในเปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวนี้มีช่องว่างระหว่างเม็ด และเปลือกที่ปลายทั้ง 2 ด้าน ผิวของเปลือกทั้งสองส่วนจะมีหนามแข็งเล็กๆติดอยู่โดยรอบทั่วไป

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีทำให้ทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลของขี้เลื่อยและแกลบโดยประมาณดังนี้

ธาตุคาร์บอน	40 – 42	เปอร์เซ็นต์
ออกซิเจน	36 – 37	เปอร์เซ็นต์
ไฮโดรเจน	5	เปอร์เซ็นต์
ไนโตรเจน	1	เปอร์เซ็นต์
ขี้เถ้า	14 – 17	เปอร์เซ็นต์

3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (Combustible Element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ สารเผาไหม้ได้ในที่นี่มีธาตุหลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ในทางตรงกันข้ามกลับเพิ่มปัญหาในด้านการกัดกร่อนชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ รวมทั้งทำให้เกิดปัญหามลพิษในอากาศ

สำหรับการเผาไหม้ของคาร์บอนกับออกซิเจนนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO + 110{,}380\ kJ/kg-molC\ (9{,}191\ kJ/kg) \quad (3.1)$$

$$CO + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2 + 283{,}180\ kJ/kg-molCO\ (10{,}113.6\ kJ/kg) \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถเขียนสมการการเผาไหม้รวมได้เป็น

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2 + 393{,}560\ kJ/kg - molC\ (32{,}769\ kJ/kg) \quad (3.3)$$

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O + 286{,}470\ kJ/kg - molH_2\ (142{,}098\ kJ/kg) \quad (3.4)$$

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2 + 296{,}774\ kJ/kg - molS\ (9{,}257\ kJ/kg) \quad (3.5)$$

ซึ่งจะพบว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยปลดปล่อยความร้อนออกมาด้วย หลังจากเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบใหม่ดังนั้นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 4 ประการซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้

ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ที่สำคัญมี 4 ประการ คือ Turbulent (การปั่นป่วนหรือการผสมคลุกเคล้า), Temperature (อุณหภูมิ), Theoretical Air (ปริมาณอากาศที่ต้องการ) และ Time (เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้)

3.2.1.1 การปั่นป่วนหรือการผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

การผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซในการผสมจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเป็นเชื้อเพลิงแข็งหรือของเหลวการผสมจะยุ่งยากขึ้น ในกรณีที่เชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นของเหลวจะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็ก โดยใช้หัวพ่นแล้วจึงทำการเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้รวมตัวกับอากาศได้ง่ายขึ้น

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ จากนั้นออกซิเจนจะเข้าผสมกับก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า จุดประสงค์ของการทำให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นก็เพื่อที่จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดบริเวณของพื้นผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นใหม่

3.2.1.2 อุณหภูมิที่สูงพอต่อขบวนการเผาไหม้

ขบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตรารวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดช้าในตอนแรก ๆ และเกิดต่อไปเรื่อย ๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้มากขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้มากขึ้นด้วย ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Combustion) จะประกอบด้วย

1.อุณหภูมิสูงพอสำหรับขบวนการเผาไหม้

2.สารเชื้อเพลิง

3.อากาศที่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนการเผาไหม้นั้นไม่ได้เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นได้เอง โดยส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงพอเพียง การลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ โดยปกติแล้วการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว แต่การที่จะให้อุณหภูมิจะสูงได้มากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งจะสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในกรณีอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นสารที่ไม่ต้องการได้ เช่น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน หรือ เกิดเถ้าหลอมรวมตัวเป็นขี้โลหะ (slag) ก็จะเกาะติดอยู่บนผนังเหล็ก ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

3.2.1.3 อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับปริมาณอากาศ

อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับปริมาณอากาศที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ เพื่อให้ได้ผลอย่างสมบูรณ์นั้น จะต้องมีสัดส่วนที่พอดีกันระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับปริมาณออกซิเจน ตามสมการเผาไหม้ ปริมาณของอากาศตามทฤษฎี (Theoretical air) คือปริมาณน้อยที่สุดของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ จนคาร์บอน, ไฮโดรเจน และกำมะถันเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ และ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามลำดับ ในทางปฏิบัติจริงของอากาศที่ต้องการตามทฤษฎีไม่พอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ การสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ คือ การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และคาร์บอนในก๊าซไอเสีย

3.2.1.4 เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง

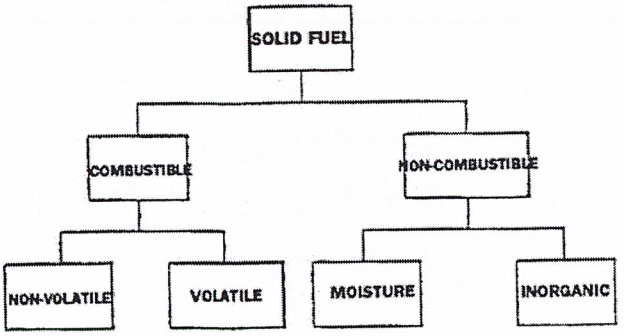
เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง คือเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาควรนานพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้มากที่สุด แต่การเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ยากเพราะต้องใช้เวลานาน และเสียค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้เตาเผาที่มีความสูงมากๆในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ดังนั้นจึงนำเทคนิคการหมุนวนความเร็วสูงของเตาเผาวอร์เทคมาเพื่อช่วยให้เกิดการไหลหมุนวน (Recirculation Flow) ของเชื้อเพลิงกับอากาศ ขณะเกิดการเผาไหม้ภายใน ทำให้เวลาในการเผาไหม้นานขึ้นหรือหน่วงเวลาให้การเผาไหม้เกิดขึ้นนานที่สุด เพื่อให้การเผาไหม้ใกล้เคียงการเผาไหม้สมบูรณ์ที่สุด

3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

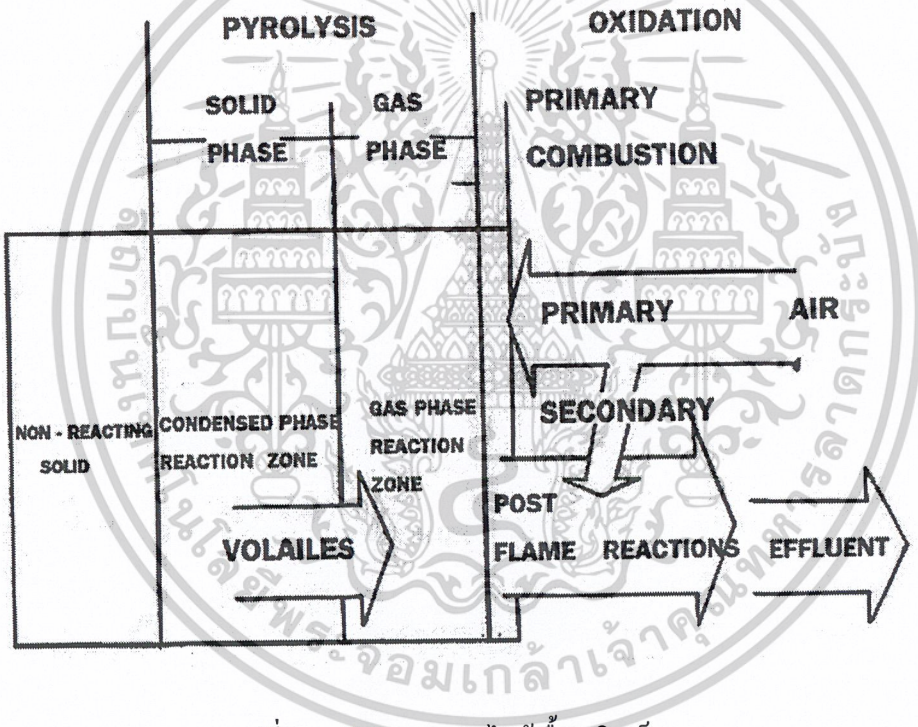
เชื้อเพลิงแข็งที่เราใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น ถ่านหิน ฟืน ขี้เลื่อย แกลบ ฟางข้าว ซังข้าวโพด เป็นต้น ขบวนการการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง จะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลว และแก๊ส เพราะว่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง มักจะเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆ ภายในไม่แน่นอน นอกจากนี้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เพราะเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีทั้งเผาไหม้ได้ และไม่สามารถเผาไหม้ได้ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 3.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เรียกว่า สารเฉื่อย (Inert)สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับก๊าซไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งจะไม่ช่วยในการเผาไหม้ แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ก็อาจจะเกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะในขบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ สารเฉื่อยที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ ความชื้น และสารประกอบเคมีที่ประกอบขึ้นเป็นขี้เถ้า สารอนินทรีย์เหล่านี้โดยมากจะเป็นพวกซิลิเกต (Silicates) ซัลไฟด์ (Sulfides) และเกลือฮาโลเจน (Halogen salt) เป็นต้น เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง สารเหล่านี้จะกลายเป็นขี้เถ้า บางส่วนจะตกในห้องที่เผาไหม้ ส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวไปกับไอเสียที่เรียกว่า เถ้าลอย (Fly Ash) เชื้อเพลิงแข็งที่สามารถแยกได้เป็นส่วนที่ระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
55005

ได้ (Volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (Non-Volatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ ประกอบด้วยคาร์บอน สารประกอบคาร์บอน C_xH_y โดยที่ค่า x มีค่ามากกว่า y มากๆ หรือเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง ส่วนสารที่ระเหยได้ในที่นี้ หมายถึง สารประกอบที่ระเหยใช้ในช่วงของการเผาไหม้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ หลักในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นดังรูปที่ 3.2

3.3.1 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 2 แบบ คือ

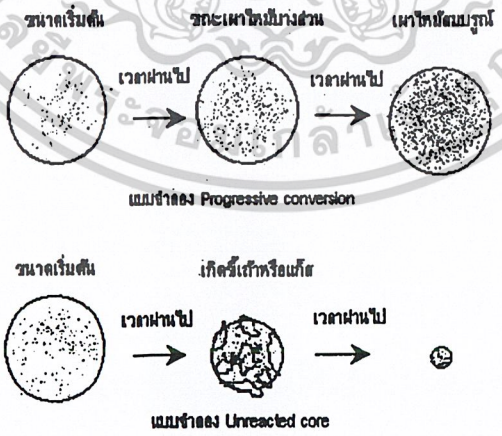
1. แบบจำลอง Progressive conversion ใช้อธิบายเมื่อในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ขนาดของเชื้อเพลิงไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อทำการเผาไหม้แล้ว ไม่เกิดขี้เถ้าผลิตภัณฑ์ที่ได้คงรูปเดิม เช่น การเผาแร่กำมะถัน

2. แบบจำลอง Unreacted core ใช้อธิบายเมื่อทำการเผาไหม้แล้ว ขนาดของเชื้อเพลิงเปลี่ยนไป เช่น ไม้ แกลบ ถ่านหิน เป็นต้น

โดยจะมุ่งเน้นศึกษาที่แบบจำลอง Unreacted core ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการเผาไหม้ของแกลบ

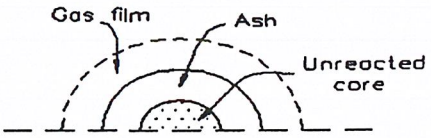
3.3.2 แบบจำลอง Unreacted core

ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นครั้งแรกที่ผิวนอกสุดของเชื้อเพลิง หลังจากนั้นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะค่อยๆ กินลึกเข้าไปภายใน ทิ้งบริเวณที่ได้ทำปฏิกิริยาไปแล้วในสภาพขี้เถ้า ดังนั้นที่เวลาใดๆ ส่วนลึกเข้าไปภายในชิ้นเชื้อเพลิง หรือที่เรียกว่า แก่น จะค่อยๆ มีขนาดลดลงในระหว่างการทำปฏิกิริยา

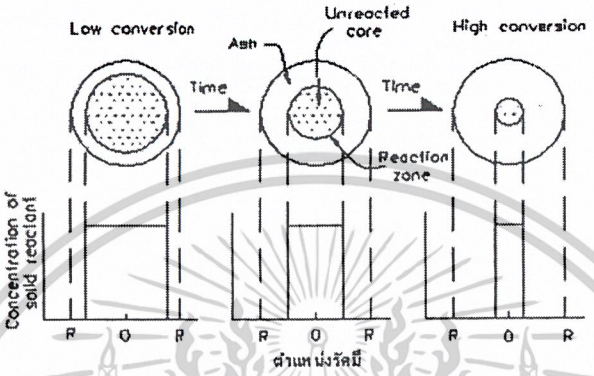


รูปที่ 3.3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้



รูปที่ 3.5 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้

ปฏิกิริยาของแบบจำลองนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนคือ

1. อากาศแพร่กระจายผ่านชั้นฟิล์มเข้าสู่ชั้นขี้เถ้า
2. อากาศผ่านชั้นขี้เถ้าเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิงในส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา
3. เกิดปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับผิวของเชื้อเพลิง
4. ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ซึมผ่านชั้นขี้เถ้ากลับสู่ชั้นฟิล์มของแก๊ส
5. ผลิตภัณฑ์แก๊สซึมผ่านชั้นฟิล์มกลับคืนสู่ภายนอกบรรยากาศรอบๆ โดยความต้านทานในแต่ละขั้นตอนอาจจะแตกต่างกันมากขั้นตอนที่มีความต้านทานสูงสุดจะเป็นตัวควบคุมอัตราความเร็วของการเผาไหม้

สิ่งที่มีผลต่ออัตราความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

1. อุณหภูมิ โดยทั่วไปขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
2. เวลาของการแพร่กระจายของอากาศผ่านชั้นฟิล์ม หรือชั้นขี้เถ้า
3. ขนาดของเชื้อเพลิง
4. ความต้านทานของชั้นขี้เถ้ากับชั้นฟิล์ม โดยปกติความต้านทานของชั้นขี้เถ้าจะสูงกว่าชั้นฟิล์มมาก ดังนั้นค่าความต้านทานของชั้นฟิล์มจึงอาจจะตัดทิ้งได้
5. ความต้านทานรวม ซึ่งรวมทั้งความต้านทานของแก๊สฟิล์มชั้นขี้เถ้า และปฏิกิริยาการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อากาศชื้น

อากาศชื้นเป็นก๊าซอุดมคติที่ประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำความดันต่ำ โดยทั่วไปอากาศชื้นมีภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิหนึ่งๆซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของไอน้ำ จึงทำให้เมื่ออากาศชื้นเปลี่ยนสถานะอาจมีการระเหยหรือการควบแน่นของไอน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยผลก็คือจะทำให้เกิดของผสมสองสถานะ

ในการวิเคราะห์ก๊าซผสมอุดมคติที่เป็นอากาศชื้นจะกำหนดข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ขณะเกิดการควบแน่นของไอน้ำความดันต่ำในอากาศชื้น น้ำควบแน่นนั้นจะไม่ละลายก๊าซองค์ประกอบของอากาศ

2. ในอากาศชื้นเฉพาะสถานะก๊าซเท่านั้นจะสมมติให้เป็นก๊าซผสมอุดมคติ (ในสถานะก๊าซประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำความดันต่ำ)

3. ถ้าหากปรากฏอากาศชื้น (สถานะไอ) ร่วมกับสถานะน้ำควบแน่น ภายใต้ความดันและอุณหภูมิหนึ่ง ๆ สมดุลเฟสระหว่างเฟสไอน้ำกับเฟสน้ำควบแน่นนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับอากาศแห้งที่ประกอบร่วม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ภายใต้สมดุลเฟสระหว่างอากาศชื้นกับน้ำควบแน่นที่ความดันและอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศชื้นนั้นจะเท่ากับความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมิขณะนั้น

3.4.1 อากาศแห้งและอากาศชื้น

อากาศในบรรยากาศนั้นปกติประกอบด้วยอากาศแห้ง (dry air) และไอน้ำความดันต่ำในอากาศหรือบรรยากาศนั้นเรียกว่า อากาศชื้น (atmospheric air) อากาศแห้งมีองค์ประกอบเป็นไนโตรเจน 78.10% , ออกซิเจน 20.95%, อาร์กอน 0.92% โดยโมล และที่เหลือเป็นก๊าซอื่น ๆ การวิเคราะห์อากาศชื้นนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ของผสมที่ซึ่งประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำนั่นเอง องค์ประกอบของอากาศชื้นที่เป็นอากาศแห้งจะมีปริมาณคงที่ ส่วนองค์ประกอบที่เป็นไอน้ำในอากาศชื้นนั้นจะเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับการระเหยตัวของน้ำจากมหาสมุทร แม่น้ำ ลำคลอง ทะเลสาบ รวมถึงจากร่างกายของมนุษย์เข้าสู่บรรยากาศหรือการควบแน่นของไอน้ำออกจากอากาศชื้นนั้น

3.4.2 ความดันย่อยของอากาศและความดันไอ

อากาศชื้นสามารถสมมติให้เป็นก๊าซผสมอุดมคติได้ ดังนั้นความดันของอากาศชื้น (P) ย่อมเท่ากับ ผลบวกของความดันย่อยของอากาศแห้ง (P_a) และความดันไอ (P_v) ซึ่งเขียนเป็นสมการดังนี้

$$P = P_a + P_v \tag{3.6}$$

ความดันย่อยของอากาศแห้ง (P_a) หมายถึงความดันในส่วนที่กระทำโดยโมเลกุลของอากาศแห้งในอากาศชื้นนั้น

ความดันไอ (P_v) หมายถึงความดันในส่วนที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้น ในกรณีที่อากาศชื้นอยู่ในภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ความดันไอก็คือความดันไออิ่มตัวหรือความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมินั้น

ภายใต้ภาวะอิ่มตัวของอากาศชื้นที่อุณหภูมิใด ๆ พบว่า

$$P_v = P_{sat@\ T} \text{ (ภายใต้ภาวะอิ่มตัว)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 อัตราส่วนความชื้น

ปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นสามารถกำหนดได้ในหลาย ๆ ลักษณะตามนิยามของอัตราส่วนความชื้น (humidity ratio, ω) หรือความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, ϕ) ดังนี้

อัตราส่วนความชื้น (ω) หมายถึงมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง มีหน่วยเป็น kg/kg-dry air หรืออาจเรียกว่า ความชื้นสัมบูรณ์หรือความชื้นจำเพาะ

พิจารณาอากาศชื้น ที่ P, T ซึ่งยึดครองปริมาตร V อัตราส่วนความชื้นที่สภาวะนี้พิจารณาจากกฎของดาลตันภายใต้ปริมาตร V และอุณหภูมิ T เดียวกับอากาศชื้น (ซึ่งพิจารณาเป็นก๊าซผสมอุดมคติ) นั้น พบว่าอากาศแห้งมีความดันย่อยเท่ากับ P_a ปริมาตรเท่ากับ V และอุณหภูมิเท่ากับ T และไอน้ำมีความดันย่อยเท่ากับ P_v ปริมาตรเท่ากับ V และอุณหภูมิเท่ากับ T ดังนั้น

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v R_a}{P_a R_v} \tag{3.7}$$

ในที่นี้ R_a = 0.2870 kJ/kg·K และ R_v = 0.46152 kJ/kg·K แทนค่าในสมการ (3.7) จะได้

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P_a} = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \tag{3.8}$$

โดยที่ P คือ ความดันของอากาศชื้นหรือความดันทั้งหมด

ในที่นี้สำหรับอากาศแห้งนั้นจะไม่มีไอน้ำเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นอัตราส่วนความชื้น $\omega = 0$ หากเพิ่มไอน้ำ (ความชื้น) ให้กับอากาศแห้งนั้น พบว่าอัตราส่วนความชื้นจะเพิ่มขึ้น และถ้าเพิ่มไอน้ำต่อไปจนกระทั่งถึงจุดหนึ่งซึ่งอากาศชื้นนั้นจะไม่สามารถรับไอน้ำได้อีกต่อไป แสดงว่าอากาศได้รับไอน้ำในปริมาณสูงสุดและอิ่มตัว อากาศชื้นที่สภาวะนี้เรียกว่า อากาศอิ่มตัว (saturated air) ซึ่งที่สภาวะอิ่มตัวนี้ความดันไอก็คือความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมิขณะนั้นของอากาศชื้น

3.4.4 ความชื้นสัมพัทธ์

การบ่งบอกปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นโดยคำนึงถึงผลต่อความรู้สึกสบายของมนุษย์ในบรรยากาศ ทั้งนี้ จะเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ กับปริมาณไอน้ำสูงสุดที่อากาศสามารถรับไว้ได้ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน อัตราส่วนที่ได้นี้เรียกว่าความชื้นสัมพัทธ์ (ϕ)

ความชื้นสัมพัทธ์ (ϕ) หมายถึงอัตราส่วนของปริมาณไอน้ำในอากาศ (m_v) ต่อปริมาณไอน้ำสูงสุดในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน (m_g)

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} \tag{3.9}$$

โดยที่ $P_g = P_{sat\,@\,T}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากสมการ (3.8) และ (3.9) จะได้

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622+\omega)P_g} \tag{3.10}$$

และ

$$\omega = \frac{0.622\phi\, P_g}{P-\phi\, P_g} \tag{3.11}$$

จากสมการ (3.9) นั้นพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ก็คือ อัตราส่วนของความดันไอของไอน้ำในอากาศ (เศษส่วนโดยโมลของไอน้ำในอากาศ) ต่อความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน (เศษส่วนโดยโมลของไอน้ำในอากาศอิ่มตัว) ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าตั้งแต่ 0 – 100% หรือเขียนเป็นสมการในรูปของ

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} = \frac{v_g}{v_v} = \frac{\rho_v}{\rho_g} \tag{3.12}$$

3.4.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature , T_{db}) หมายถึงอุณหภูมิของอากาศชื้นซึ่งชี้บอกบนเทอร์โมมิเตอร์แบบธรรมดา อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature , T_{wb}) หมายถึงอุณหภูมิของอากาศชื้นซึ่งชี้บอกบนเทอร์โมมิเตอร์โดยมีผ้ากอซเปียกหุ้มอยู่ที่กระเปาะ ขณะวัดอุณหภูมิต้องทำให้อากาศไหลผ่านด้วยความเร็วไม่ต่ำกว่า 3 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้ต้องการให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอยู่ในแบบของการพาความร้อนมากกว่าการแผ่รังสีความร้อน กระบวนการที่เกิดขึ้นขณะวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกนี้เรียกว่า กระบวนการทำให้อากาศอิ่มตัวแบบอะเดียแบติก

3.5 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)

ในการเผาไหม้จริงปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมบาง (Lean Mixture) ตรงกันข้ามหากปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมหนา (Rich Mixture) เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง $(A/F)_{stoic} = (m_{air}/m_{fuel})_{stoic}$ และอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, Φ) จะหมายถึง

$$\Phi = \frac{(A/F)_{Stioc}}{(A/F)_{Actual}} = \frac{(F/A)_{Actual}}{(F/A)_{Stioc}} \tag{3.13}$$

Fuel – rice mixtures	Φ	>	1	ปริมาณอากาศที่น้อยกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Stoichiometric mixtures	Φ	=	1	ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Fuel – lean mixtures	Φ	<	1	ปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเขียนในรูปปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air)

$$EA = (1 + \Phi) \times 100\% \tag{3.14}$$

3.6 อุณหภูมิอะเดียแบติก (Adiabatic Flame Temperature)

ในกรณีไม่มีงานเกี่ยวข้องและไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์หรือพลังงานศักย์ พลังงานเคมีที่ปล่อยออกมาในระหว่างการเผาไหม้นั้นอาจสูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อม ในรูปของพลังงานความร้อนหรืออาจถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ถ้าการสูญเสียความร้อนมีค่าน้อยอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก็จะสูง ค่าจำกัดของมันคือเมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (Q=0) และ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก็จะมีค่าสูงที่สุด ซึ่งเราเรียกอุณหภูมินี้ว่าอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติก (Adiabatic flame temperature)

อุณหภูมิดังกล่าวนี้หาได้จากการให้ Q และ W มีค่าเท่ากับศูนย์ในกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะได้ว่า

$$H_P = H_R \tag{3.15}$$

หรือ

$$\sum N_P(\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_P = \sum N_R(\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_R \tag{3.16}$$

เมื่อรู้สภาวะของสารตั้งต้นเราก็สามารถหา H_R ได้โดยง่าย แต่การหา H_P นั้นไม่เป็นเรื่องที่ง่ายนัก เพราะเรายังไม่รู้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการคำนวณเปลวอะเดียแบติก (Adiabatic flame temperature) จะต้องใช้วิธีสมมติค่าจนกว่าจะได้ $H_P = H_R$ (เรียกว่า "iterative procedure") ถ้าเป็นการเผาไหม้ด้วยอากาศซึ่งประกอบด้วย N_2 ส่วนใหญ่ ค่าอุณหภูมิแรกที่เราควรจะเดา คือการสมมติว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็น N_2

อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้นั้นถูกจำกัดโดยความทนทานของวัตถุ ดังนั้นอุณหภูมิเปลวไฟ อะเดียแบติกจึงมีความสำคัญมากในการออกแบบห้องเผาไหม้ เครื่องยนต์กังหันก๊าซ และหัวฉีด อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้ที่จริงแล้วจะน้อยกว่าอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติกมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาไหม้อาจไม่สมบูรณ์ มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งก๊าซบางชนิดอาจแยกตัวออก (Dissociate) อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้อาจควบคุมได้โดยการปรับแต่งปริมาณของอากาศส่วนที่เกิน (Excess air) ซึ่งเปรียบเสมือนการระบายความร้อน

3.7 ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เซชั่น

ฟลูอิดไดซ์เซชั่นเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้อยู่ในสภาพคล้ายของไหลด้วยการพยุงโดยก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านเบดของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง โดยมีการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในขณะที่มีการสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1 ประเภทของฟลูอิดไดซ์เซชั่น

กระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชั่นแบ่งตามลักษณะการเกิดได้สองแบบ คือ

3.7.1.1 ฟลูอิดไดเซชั่นสองสถานะ (Two - phases fluidization) หมายความว่าในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยสองสถานะคือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดเซชั่นจึงแบ่งออกอีก 2 ประเภท คือ

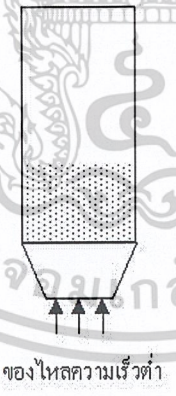
1.ก๊าซฟลูอิดไดซ์เซชั่น(Gas fluidization)

2.ฟลูอิดไดซ์เซชั่นของของเหลว(Liquid fluidization)

3.7.1.2 ฟลูอิดไดซ์เซชั่นสามสถานะ (Three– phases fluidization)หมายความว่าภายในหอทดลองจะประกอบด้วยของสามสถานะในเวลาเดียวกันคือ ของแข็ง, ของเหลวและก๊าซ สำหรับฟลูอิดไดซ์เซชั่นสามสถานะเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิดไดเซชั่นสองสถานะ

3.7.2 ลักษณะฟลูอิดไดซ์เบด

เบด(Bed)หมายถึงอาณาเขตในหอทดลองที่มีอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าอนุภาคของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในห้องทดลองจะระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหลจนถึงระดับสูงสุดคือผิวหน้าของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในหอทดลอง ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงระดับของเบดในหอทดลอง

ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชั่นเกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบบางประการ เช่น ความเร็วของของไหล ชนิดของเม็ดวัสดุที่ประกอบกันเป็นเบด ลักษณะของแผ่นกระจายของไหล เมื่อความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ความดันลดในเบดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูปที่ 3.7 ลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลสรุปได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2.1 เมื่อป้อนของไหลด้วยความเร็วต่ำๆ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งไปโดยไม่ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ เบดลักษณะนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed)

3.7.2.2 เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบดขยาย (Expanded bed)

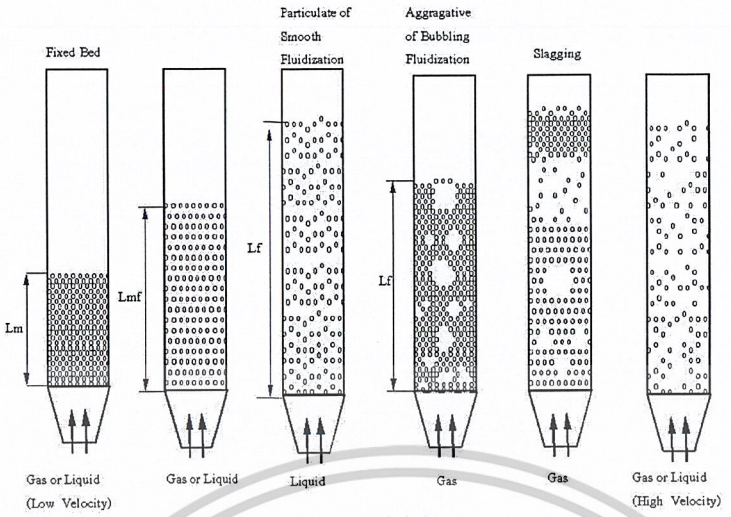
3.7.2.3 เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจนถึงจุดๆหนึ่ง ซึ่งแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคของแข็งและแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งในแนวดิ่งหายไป อนุภาคของแข็งที่ประกอบกันเป็นเบดจะลอยตัวเป็นอิสระ แรงกระทำเนื่องจากความดันลดในเบดระหน้าตัดใดๆ ของเบดจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคของแข็งระหว่างหน้าตัดนั้นๆ เบดในสภาพเช่นนี้เป็นเบดที่เริ่มฟลูอิดไดซ์ เรียกเบดในลักษณะนี้ว่า อินซิเพียนฟลูอิดไดซ์เบด (Incipiently fluidized bed) หรือเบดที่มีสภาพฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด (Minimum fluidization)

3.7.2.4 เมื่อของไหลมีความเร็วมากกว่าความเร็วที่กล่าวในหัวข้อ 3.8.2.3 อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนตัวห่างออกจากกันมากขึ้นตามความเร็วของของไหล จะเริ่มเกิดฟองก๊าซ(Bubbles) เกิดขึ้น อนุภาคของแข็งเริ่มไหลหมุนเวียนดีขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดการผสมผสานและการไหลเวียนของของแข็งจะรุนแรงยิ่งขึ้น เบดในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า บับบลิงฟลูอิดไดซ์เบด (Bulling fluidized bed) ส่วนของเบดที่ไม่รวมฟองเรียกว่า อิมัลชันเฟส (Emulsion phase)

3.7.2.5 ฟลูอิดไดซ์เบดที่สามารถบ่งบอกระดับเบดได้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense phase fluidized bed)และเมื่อความเร็วของของไหลมากกว่าความเร็วขณะหลุดลอย(Terminal velocity) อนุภาคของของแข็งจะหลุดลอยไปกับกระแสการไหลของของไหล สถานะเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบเจือจาง(Lean phase fluidized bed)หรือการขนถ่ายด้วยของไหล(Pneumatic or Hydraulic transport)

3.7.2.6 ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองของอนุภาคของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบดแบบนี้ว่าเบดสม่ำเสมอ (Smoothly fluidized bed) ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซลักษณะของเบดจะแตกต่างจากของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชั่นแล้วก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวแล้วเกิดเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซจะแทรกตัวเองขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในเบดจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

3.7.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชั่น

เป็นการเปรียบเทียบการได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดกับเทคนิคอื่นๆ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ข้อดีของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

1. เนื่องจากอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งซึ่งอุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด

2. การทำงานด้วยฟลูอิดไดซ์เบดจะเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและแรงดันตกคร่อมเบดน้อยกว่าแบบบรรจุมาก

3. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง อนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน ส่วนอนุภาคที่มีน้ำหนักมากกว่าจะอยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของอนุภาคของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก

4. จากคุณสมบัติที่คล้ายของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้คือ ปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเติมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย

5. พื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล จะมีมากกว่าเมื่อเทียบกับเบดนิ่งที่มีอนุภาคของแข็งเท่ากัน จึงมีประโยชน์ในการใช้งานที่มีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร

6. ที่อนุภาคของไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบด อนุภาคของแข็งนี้สามารถจะเป็นตัวนำความร้อนจากแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า

ข้อเสียของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

1. เนื่องจากการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งอนุภาคของของแข็งมีช่วงเวลาอยู่ในเบดสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องจึงทำให้ผลลัพธ์เลวลง หรืออนุภาคของแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามข้อกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสั่นสะเทือนของหอทดลองหรือเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากอนุภาคของแข็งมากระทบกับผนังหอทดลอง

3. เวลาที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูงๆหรือเบดหลายๆชั้นซึ่งเปลืองเงินลงทุนมาก

4. มักเกิดฟองก๊าซในเบด ทำให้การสัมผัสกันไม่ดีเป็นการสูญเปล่า ถ้ายิ่งเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจะต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง

5. ใช้กับอนุภาคของแข็งที่เปียกหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

6. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้ามีความเร็วของของไหลมากเกินไปเม็ดของแข็งก็จะออกมาจากเบดไปพร้อมกับของไหล

7. ในปฏิกิริยาที่ทำให้ตัวเร่งมีขนาดลดลง จะต้องปรับความเร็วของก๊าซเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปลิวทำให้ได้ผลิตผลน้อยลง

3.7.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดซ์เซชั่น

ขณะที่ของของไหลไหลผ่านขึ้นมาด้านใกล้ผนัง ความเร็วของไหลจะต่ำมากหรือเกือบไม่มีการไหลเลยเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน เมื่อในหอทดลองที่บรรจุอนุภาคของของแข็งมีอิทธิพลของฝาผนังเกิดขึ้น ขอบเขตการไหลชนิดเรียบจะสูงมากขึ้น พื้นที่ในการไหลของของไหลในหอทดลองจะลดน้อยลงหรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำงานที่แท้จริงของของไหลเล็กกว่าเดิมมาก ประสิทธิภาพการทำงานจะน้อยลงด้วย

ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชั่นคือ

1. ความเร็วของของไหล
2. ตัวกระจายของไหล
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอทดลอง
4. อนุภาคของแข็ง
5. ความหนาแน่นของของไหล
6. ความหนืด
7.ความสูงของเบด

ความสูงของเบดเมื่อเริ่มฟลูอิดไดเซชั่นสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{L_0}{L_{mf}} = \frac{1-\varepsilon_{mf}}{1-\varepsilon_0} \qquad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่อนุภาคของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระแสดงว่า อนุภาคของแข็งกำลังอยู่ในสมดุลของแรง ซึ่งได้แก่แรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง แรงพยุงของของไหล (Bouyance force) และแรงต้านการไหล (Drag force) อาจเขียนในสมการสมดุลแรงต่างๆได้ดังนี้

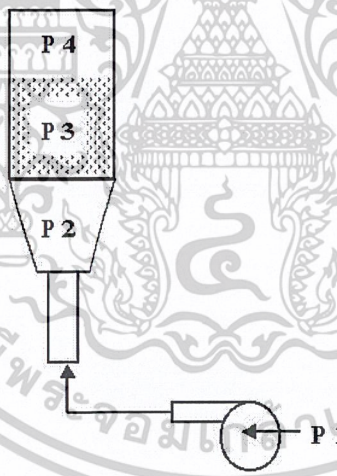
(แรงพยุงของของไหล) + (แรงต้านทานการไหล) = (น้ำหนักของอนุภาคของแข็งในเบด) (3.18)

(ความดันลดในเบด)(พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์) = (ปริมาตรของเบด)(แฟรคชันของของแข็ง)(น้ำหนักจำเพาะของของแข็ง) (3.19)

$$\Delta P_b A_t = W = \left(A_t L_{mf}\right)\left(1-\varepsilon_{mf}\right)\left(\rho_s - \rho_g\right)\frac{g}{g_c} \tag{3.20}$$

จัดเทอมใหม่สำหรับสภาพฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = \left(1-\varepsilon_{mf}\right)\left(\rho_s - \rho_g\right)\frac{g}{g_c} \tag{3.21}$$



รูปที่ 3.8 แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆในชุดการทดลอง

จากสมการความดันตกคร่อมที่ผ่านเบดนิ่งจะได้ว่า กลไกของความดันตกคร่อมในเบดที่ใช้อนุภาคของแข็งขนาดสม่ำเสมอแล้ว พบว่าความดันตกคร่อมนี้เป็นสัดส่วนกับแฟคเตอร์ 2 แฟคเตอร์ คือ

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150\left(1-\varepsilon_{mf}\right)\mu U}{\varepsilon_{mf}^3\left(\phi_s d_p\right)^2} + \frac{1.75\left(1-\varepsilon_{mf}\right)\rho_g U^2}{\varepsilon_{mf}^3\left(\phi_s d_p\right)} \tag{3.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอมแรกทางด้านขวาของสมการ 3.7 แทนการสูญเสียความดันเนื่องจากผลของความเสียดทาน เทอมที่สองเป็นผลของการสูญเสียพลังงานจลน์ที่ $Re_p < 20$ โดยที่แรงเสียดทานจะมีค่ามากกว่า ดังนั้นสมการที่ 3.7 สามารถตัดเทอมที่สองได้เป็น

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})\mu U}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)^2} \tag{3.23}$$

ที่ $Re_p > 1000$ ผลของการสูญเสียพลังงานจลน์จะมีค่ามากกว่าผลของแรงเสียดทาน สมการที่ 3.7 จัดใหม่ได้เป็นดังนี้

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{1.75(1-\varepsilon_{mf})\rho_g U^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \tag{3.24}$$

ซึ่งสมการของ Ergun นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ 3.7 ได้ เมื่อเบดอยู่ที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชั่น ดังนั้นจะแทนสมการที่ 3.7 ลงในสมการที่ 3.6 ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชั่นได้ดังสมการที่ 3.10

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s}\left[\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu}\right]^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})(U_{mf} d_p \rho_g)}{\mu \varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \tag{3.25}$$

ในเบดที่ใช่อนุภาคของแข็งขนาดเล็กจะทำให้สามารถใช้ความเร็วของของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชั่นได้แล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชั่นเมื่อ $Re_p < 20$ สามารถคำนวณได้จาก

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{150 \mu (1-\varepsilon_{mf})} \tag{3.26}$$

สำหรับอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ต้องใช้ความเร็วของไหลสูงมากๆจึงทำให้อนุภาคของแข็งลอยเป็นอิสระได้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดของของไหลที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชั่นเมื่อ $Re_p > 1000$ คำนวณได้จากสมการ

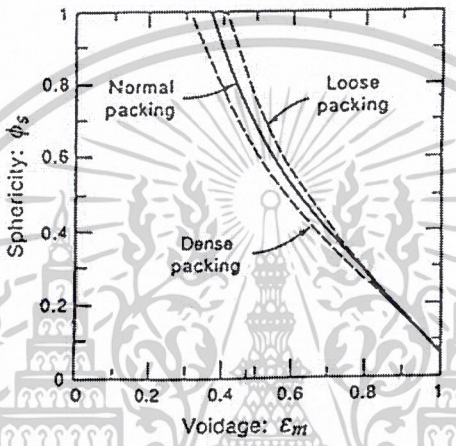
$$U_{mf} = \sqrt{\frac{\phi_s d_p (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g}} \tag{3.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความกลมของอนุภาค (ϕ_s) ใช่บ่งบอกถึงรูปร่างว่าอนุภาคเบี่ยงเบนจากทรงกลมมากน้อยเพียงใด นิยามว่า

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวของอนุภาค}} \qquad \text{เมื่อปริมาตรเท่ากัน} \qquad (3.28)$$

จากรูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด จะเห็นได้ว่าเมื่อความกลมของอนุภาคลดลง ค่าความพรุนจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด

ถ้ายังไม่ทราบค่าของ ε_{mf} และ ϕ_s Wen และ Yu (1996) แนะนำให้ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} = 14 \qquad (3.29)$$

$$\frac{\left(1-\varepsilon_{mf}\right)}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} = 11 \qquad (3.30)$$

แทนค่าสมการที่ 3.30 ลงในสมการที่ 3.25 แล้วค่า U_{mf} จะได้

$$U_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g}\sqrt{\left\{(33.7)^2 + \frac{0.0408 d_p^3 \rho_g \left(\rho_s - \rho_g\right) g}{\mu^2}\right\}} - 33.7 \qquad (3.31)$$

สมการที่ 3.31 นี้ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 34 % ในช่วง $0.001 < Re_p < 4000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วเริ่มหลุดลอยหรือความเร็วตกอิสระของอนุภาคของแข็งเป็นความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านฟลูอิดไดซ์เบดถูกจำกัดด้วยความเร็วต่ำสุด ความเร็วเริ่มหลุดลอยแสดงได้ดังสมการ

$$U_T = \left[\frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.32}$$

โดยที่ C_d เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งหาได้จากการทดลอง และจากการทดลองพบว่าค่า C_d ขึ้นอยู่กับค่า Re_p ดังสมการ

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 0.4 \tag{3.33}$$

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < Re_p < 500 \tag{3.34}$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < Re_p < 200000 \text{ หรือ } 1000 < Re_p \tag{3.35}$$

แทนค่าจากสมการ 3.18, 3.19 และ 3.20 ลงในสมการที่ 3.17 แล้วหาค่า U_t จะได้

$$U_t = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 0.4 \tag{3.36}$$

$$U_t = d_p\left[\frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225\rho_g \mu}\right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < Re_p < 500 \tag{3.37}$$

$$U_t = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g}\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < Re_p < 200000 \text{ หรือ } 1000 < Re_p \tag{3.38}$$

เพื่อหลีกเลี่ยงมิให้อนุภาคของแข็งหลุดลอยออกจากเบด ความเร็วของของไหลที่ใช้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบดจะต้องมีค่าอยู่ระหว่างความเร็ว U_{mf} และความเร็ว U_t ในการคำนวณหาความเร็ว U_{mf} เนื่องจากอนุภาคของแข็งมีการกระจายขนาด ดังนั้น ขนาดของอนุภาคของแข็งที่ใช้จะเป็นขนาดโดยเฉลี่ย ส่วนการคำนวณความเร็ว U_t จะใช้ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เล็กที่สุดปะปนอยู่ในเบด

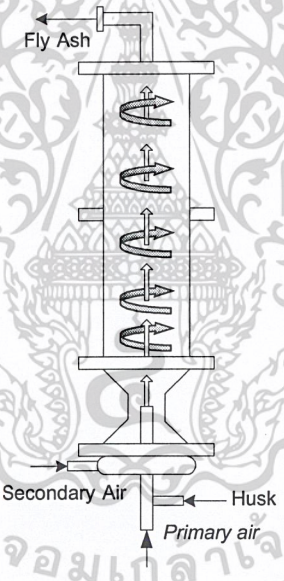
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและการคำนวณ

เตาเผาแกลบที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลองนี้ได้นำเทคนิคของอากาศหมุนวนมาช่วยในการเผาไหม้ เพื่อเพิ่มระยะเวลาของการเผาไหม้หรือหน่วงเวลาให้เกิดการเผาไหม้ที่นานที่สุดเนื่องจากการออกแบบผู้ออกแบบได้คำนึงถึงขนาดที่เหมาะสมของความสูงไม่ให้มีความสูงที่มากจนเกินไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคอากาศหมุนวนมาช่วยในการออกแบบ ในในบทนี้จะกล่าวถึงหัวข้อสำคัญ 2 หัวข้อ คือ การออกแบบและการคำนวณ โดยการคำนวณจะยึดหลักทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของสสารและทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เบด

4.1 การออกแบบเตาเผาแบบเทคนิคอากาศหมุนวน



รูปที่ 4.1 แสดงถึงลักษณะและรูปร่างของเตาเผาแกลบ

โดยส่วนประกอบของเตาที่ออกแบบขึ้นจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนสำคัญดังนี้

1. ชุดสร้างอากาศหมุนวน มีลักษณะเป็นท่อยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์ 37 มิลลิเมตร ขดเป็นวงกลมขนาด 150 มิลลิเมตรทำด้วยอลูมิเนียมอยู่ในชุดเดียวกันและมีหน้าแปลนเพื่อประกอบเข้ากับหอ้งเผาไหม้ เป็นส่วนที่ใช้ป้อนอากาศทุติยภูมิเพื่อทำให้เกิดอากาศหมุนวนในแนวสัมผัสกับแนวรัศมีของเตา โดยตรงกลางของชุดสร้างอากาศหมุนวนจะมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 มิลลิเมตร โดยจะมีท่อสอดอยู่ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ป้อนอากาศปฐมภูมิและพาเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่เตาเผา โดยจะติดตั้งไว้ที่ส่วนล่างสุดของเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ห้องเผาไหม้ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก 2 ท่อนประกบกันด้วยหน้าแปลน ภายในเป็นท่อแสตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตรและหล่อคอนกรีตหนา 100 มิลลิเมตร เนื่องจากแสตนเลสสามารถทนความร้อนได้สูง เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนเพื่อทำให้สภาพคล้ายกับสภาพอะเดียบาติก ซึ่งไม่มีความร้อนศูนย์เสียออกสู่สภาพแวดล้อมและครอบทับด้วยท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร เมื่อประกอบกันแล้วจะมีความสูง 1,500 มิลลิเมตร โดยจะทำการเจาะรูที่ด้านข้างของห้องเผาไหม้ขนาด 8 มิลลิเมตร เพื่อที่จะติดตั้งเทอร์โมคับเปิลขนาด 8 มิลลิเมตรจำนวน 4 จุดตามแนวความสูงเพื่อทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา

3. ฝาครอบเตาและท่อทิ้งเถ้าลอย มีลักษณะเป็นเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 มิลลิเมตรหน้ามีความหนา 75 มิลลิเมตร ภายในหล่อด้วยคอนกรีตทนไฟเพื่อรักษาอุณหภูมิภายเตาไม่ให้มีความร้อนออกสู่สภาพแวดล้อมและมีหน้าแปลนเหล็กเพื่อประกอบกับส่วนที่เป็นห้องเผาไหม้ ในส่วนของท่อทิ้งเถ้าลอยจะทำการเชื่อมติดกับกับส่วนที่เป็นฝาครอบเตา ความร้อนที่ร้อนและขี้เถ้าจะลอยออกไปยังถังดักฝุ่นต่อไป

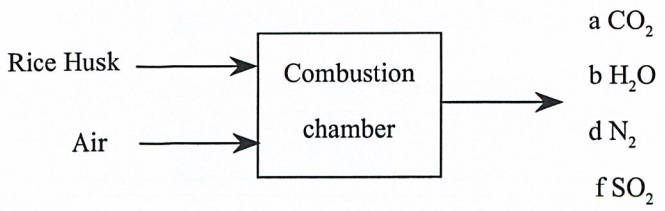
4.2 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี

ในการคำนวนหาปริมาณอากาศที่ต้องการทางทฤษฎีนั้นจำเป็นจะต้องรู้ถึงองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงแกลบ แล้วจึงนำไปทำการสมดุลสมการการเผาไหม้ทางปฏิกิริยาเคมีเพื่อนำไปหาอัตราส่วนของเชื้อเพลิงและอากาศที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ทางทฤษฎี

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์	น้ำหนักโมเลกุล	จำนวนโมล
คาร์บอน	38.0	12	3.1667
ไฮโดรเจน	5.7	1	5.7
ไนโตรเจน	0.69	14	0.049
ออกซิเจน	41.6	16	2.6
ซัลเฟอร์	0.06	32	0.001875
ขี้เถ้า	19.8	-	-

การสมดุลปฏิกิริยาเคมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้

$$3.1667C + 5.7H + 0.049N + 2.6O + 0.001875S + a_{th}(O_2 + 3.76N_2) \longrightarrow aCO_2 + bH_2O + dN_2 + fSO_2$$

ทำการสมดุลสมการจะได้

C :	3.1667	= a	⟶	a	= 3.1667
H :	5.7	= 2b	⟶	b	= 2.85
S :	0.001875	= f	⟶	f	= 0.001875
O :	$2.6 + 2a_{th}$	= 2a + b + 2f	⟶	a_{th}	= 3.2936
N :	$0.049 + a_{th}(2 \times 3.76)$	= 2d	⟶	d	= 12.406

ทำการแทนค่าลงในสมการจะได้สมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบ

$$3.1667C + 5.7H + 0.049N + 2.6O + 0.001875S + 3.2936(O_2 + 3.76N_2) \longrightarrow 3.1667CO_2 + 2.85H_2O + 12.406N_2 + 0.001875SO_2$$

จำนวนโมลของอากาศแห้งมีค่าเท่ากับ

$$4.76a_{th} = 4.76 \times 3.2936 = 15.678 \text{ kmol}$$

เนื่องจากการสมดุลสมการใช้กับอากาศแห้ง แต่ในการทดลองไม่สามารถทำให้เป็นอากาศแห้งได้ เพราะฉะนั้นจะต้องทำการคิดปริมาณความชื้นในอากาศเข้าไปในสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วย โดยกำหนดสภาวะของอากาศดังนี้

อากาศมีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature) เท่ากับ 33 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity , RH) เท่ากับ 53 %

เพราะฉะนั้นทำการหาค่าความดันย่อยในอากาศที่สภาวะนี้ได้เท่ากับ

เปิดค่าจากตาราง จะได้

$$P_{sat,H_2O@33°C} = 5.0752 \; kPa$$

$$\therefore Pv_{air} = \Phi_{air} P_{sat,H_2O} = 0.53 \times 5.0752 = 2.690 \; kPa$$

จำนวนโมลของละอองน้ำในอากาศจากสมการ

$$\left(\frac{Nv_{H_2O,air}}{Nv_{total}}\right) = \left(\frac{Pv_{air}}{Pv_{total}}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Nv_{H_2O,air} = \left(\frac{Pv_{air}}{Pv_{total}}\right) Nv_{total}$$

$$= \left(\frac{2.690\ kPa}{101.325\ kPa}\right) \times (15.678 + Nv_{H_2O,air})\ kmol$$

$$\therefore Nv_{H_2O,air} = 0.4276\ kmol$$

เพราะฉะนั้นทำการสมดุลสมการการเผาไหม้สำหรับอากาศชื้นใหม่จะได้ดังนี้

$$3.1667C + 5.7H + 0.049N + 2.6O + 0.001875S + 0.4276H_2O + a_{th}(O_2 + 3.76N_2) \longrightarrow aCO_2 + bH_2O + dN_2 + fSO_2$$

ทำการสมดุลสมการจะได้

C :	3.1667	=	a	⟶	a	= 3.1667
H :	$5.7 + (0.4276 \times 2)$	=	2b	⟶	b	= 3.2776
S :	0.001875	=	f	⟶	f	= 0.001875
O :	$2.6 + 0.4276 + (a_{th} \times 2)$	=	$2a + b + 2f$	⟶	a_{th}	= 3.2936
N :	$0.049 + (a_{th} \times 3.76 \times 2)$	=	2d	⟶	d	= 12.408

นำค่าตัวแปรที่ทำการคำนวณได้แทนค่ากลับในสมการจะได้สมการเผาไหม้ของอากาศชื้นกับเชื้อเพลิงแกลบที่อัตราการเผาไหม้พอ คือ

$$3.1667C + 5.7H + 0.049N + 2.6O + 0.001875S + 0.4276H_2O + 3.2936(O_2 + 3.76N_2) \longrightarrow 3.1667CO_2 + 3.2776H_2O + 12.408N_2 + 0.001875SO_2$$

จากนั้นทำการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จากสมการ

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{ratio} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

มวลของอากาศเท่ากับ

$$m_{air} = n_{air} \times MW_{air} = (n_{dry\,air} \times MW_{dry\,air}) + (n_{H_2O} \times MW_{H_2O})$$

$$= (3.2936 \times 4.76\ kmol)(28.97 \frac{kg}{kmol}) + (0.4276\ kmol \times 18 \frac{kg}{kmol})$$

$$= 461.875\ kg$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ

$$m_{fuel} = n_{fuel} \times MW_{fuel} = (n_C \times MW_C) + (n_H \times MW_H) + (n_N \times MW_N) + (n_O \times MW_O) + (n_S \times MW_S)$$
$$= (3.1667 \times 12) + (5.7 \times 1) + (0.049 \times 14) + (2.6 \times 16) + (0.001875 \times 32)\ kg$$
$$= 86.046\ kg$$

ดังนั้น

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{ratio} = \frac{461.875\ kg}{86.046\ kg}$$
$$= 5.368$$

จากสมการอัตราส่วนสมมูล

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)_{act}} = \frac{(F/A)_{Actual}}{(F/A)_{Stioc}}$$

Fuel rich mixture	$\Phi > 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Stoichiometric	$\Phi = 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Fuel lean mixture	$\Phi < 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

4.3 การคำนวณหาขนาดของเตาเผาโดยใช้ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เบด

จากการทดลองปริมาตรของ n – heane ก่อนผสม = 55 ml.

ปริมาตรและช่องว่าง = 20.5 ml.

ปริมาตรหลังผสม = 58 ml.

สัดส่วนของช่องว่างของเบด $\varepsilon_m = \frac{55 + 20.5 + 58}{20.5}$

จากกราฟของ kunii และ Levenspiel เส้น nomal packing ที่ $\varepsilon_m = 0.85$ จะได้ $\phi_s = 0.2$

ความหนาแน่นของแกลบ $\rho_{Rice\ husk} = 0.8473$ g/cm^3

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของแกลบ $d_R = 0.214$ cm

แรงโน้มถ่วงโลก g = 980.665 g/cm.s

คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 35 °C

$\rho_{air@35^oC} = 1.2 \times 10^{-3}$ g/cm^3

$\mu_{air@35^oC} = 1.884 \times 10^{-4}$ g/cm.s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \tag{4.1}$$

$$K_2 = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \tag{4.2}$$

เนื่องจากไม่ทราบค่า K_1 ดังนั้น จากตารางที่ 4 Wen&Yu(1966)

$$\frac{1}{K_1} = 0.408$$

ดังนั้นจะได้

$$K_1 = 24.5098$$

แทนค่าลงในสมการที่ (4.1) จะได้

$$\varepsilon_{mf}^3 = \frac{1.75}{24.5098 \times 0.2}$$

$$= 0.357$$

$$\varepsilon_{mf} = 0.7$$

นำค่า $\varepsilon_{mf} = 0.7$ แทนลงในสมการ (4.2) จะได้

$$K_2 = \frac{150 \times (1-0.71)}{(0.71)^3 \times (0.2)^2}$$

$$A_R = \frac{d_R^3 \rho_a (\rho_R - \rho_a) g}{\mu_a^2} \tag{4.3}$$

$$A_R = \frac{(0.214)^3 (0.0012)(0.8473 - 0.0012)(980.665)}{(0.00018)^2} = 301{,}175 \text{ cm}^2$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด

$$K_1 \frac{(d_R U_{mf} \rho_a)^2}{\mu_a^2} + K_2 \frac{d_R U_{mf} \rho_a}{\mu_a} = A_R \tag{4.4}$$

แทนค่า K_1, K_2 ที่ได้ลงในสมการ (4.4) จะได้

$$49.887 U_{mf}^2 + 4{,}334.8765 U_{mf} = 301{,}175.7$$

ดังนั้นจะได้

$$U_{mf} = 45.574 \text{ cm/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ 950 °C

$$\rho_{a@950^oC} = 0.2892 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_{a@950^oC} = 4.7456 \times 10^{-4} \text{ g/cm.s}$$

แทนค่าลงในสมการ (4.3) จะได้

$$A_R = 10{,}453.6 \text{ cm}^2$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4

$$0.4168U_{mf}^2 + 396.254U_{mf} = 10{,}453.626$$

$$U_{mf} = 25.687 \text{ cm/s}$$

การคำนวณหาความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดซ์ U_t

ค่าความกลม, $\phi_s = 0.24$

ขนาดเฉลี่ยของแกลบ, $d_R = 0.214$ cm.

ความหนาแน่น, $\rho_R = 0.8473$ g/cm.^{3}

ตรวจสอบค่าเรย์โนลนัมเบอร์

$$R_e = \frac{\rho_a U_{mf} d_R}{\mu_a} \tag{4.5}$$

$$U_t = \frac{g(\rho_R - \rho_a)^2 d_R^2}{18\mu_a} \quad , R_e \le 0.4 \tag{4.6}$$

$$U_t = d_R \left| \frac{4(\rho_R - \rho_a)^2 g^2}{255\rho_a \mu_a} \right| \quad , 0.4 \le R_e \le 500 \tag{4.7}$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการ (4.5) จะได้ค่าเรย์โนลนัมเบอร์

$$R_e = 66.4$$

ดั้งนั้นเลือกใช้สมการที่ (4.7) จะได้

$$U_t = 821.9586 \text{ cm/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าและทางออกเตาเผา

อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า, Q_1 (ที่สมมุติอุณหภูมิที่ทางเข้า 35°C)

อัตราการป้อน ปริมาณแกลบ, $m_R = 6$ kg/hr

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง, $(A/F)_{stoich} = 16.104$

$$Q_1 = \frac{m_R (A/F)_{stoich}}{\rho_a} \tag{4.8}$$

นำค่าต่างๆแทนในสมการ (4.8) จะได้

$$Q_1 = 80.52 \quad m^3/hr$$

อัตราการไหลของอากาศที่ทางออก, Q_2 (สมมุติอุณหภูมิที่ทางออก 950°C)

จากกฎของก๊าซ ที่ปริมาตรคงที่

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \tag{4.9}$$

นำค่าที่ได้แทนในสมการ (4.9) จะได้

$$Q_2 = 319.727 \quad m^3/hr$$

การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมของเตาเผา

$$A = \frac{Q}{U_f} \tag{4.10}$$

ให้ปริมาณอากาศที่เหมาะสมมีค่า

$$U_f = 4.5 U_{mf} \tag{4.11}$$

ที่อุณหภูมิ 35°C

จากสมการ(4.11)จะได้

$$U_f = 2.05083 \quad m/s$$

จากสมการ(4.10)จะได้

$$A_1 = 0.010906 \quad m.^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$D_1 = 0.1178 \quad \text{m.}$$
$$= 11.78 \quad \text{cm.}$$

ที่อุณหภูมิ 950°C

จากสมการ(4.11)จะได้

$$U_f = 1.155915 \quad \text{m/s}$$

จากสมการ(4.10)จะได้

$$A_2 = 0.074 \ \text{m}^2$$

ดังนั้น

$$D_2 = 0.30697 \quad \text{m.}$$
$$= 30.697 \quad \text{cm.}$$

พื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม $D_a = \dfrac{(D_1 + D_2)}{2}$

$$= 0.212385 \quad \text{m.}$$
$$= 21.24 \quad \text{cm.}$$

การคำนวณความสูงของเตา

กำหนดให้ ความสูงของเบดนิ่ง, $L_m = 0.2$ m.

สัดส่วนช่องว่างของเบดนิ่ง, $\varepsilon_m = 0.85$

$\varepsilon_{mf} = 0.6676$

จากสมการ

$$\frac{L_{mf}}{L} = \frac{1-\varepsilon_m}{1-\varepsilon_{mf}} \qquad (4.12)$$

$$L_{mf} = 0.206897 \quad \text{m.}$$

(ที่อุณหภูมิ 35°C)

$\rho_a = 1.2 \times 10^{-3}$ g/cm^3 = 0.0756 lb/ft^3

$\rho_R = 0.8473$ g/cm^3 = 53.38 lb/ft^3

$U_{mf} = 45.5265$ cm/s = 1.49363 ft/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d_R = 0.214 cm = 0.007 ft

ความสัมพันธ์ระหว่าง L_{mf} กับ L_f จาก Kunii และ Levenspile

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = \frac{10.978(U_f - U_{mf})^{0.738} d_R^{1.006} \rho_R^{0.376}}{U_{mf}^{0.137} \rho_a^{0.126}} \qquad (4.13)$$

$$= 1.3112$$

จะได้

$$L_{f1} = 1.3112 \times 0.206897$$

$$= 0.271283 \quad \text{m.}$$

(ที่อุณหภูมิ 950°C)

ρ_a = 0.2892×10^{-3} g/cm^3 = 0.0182196 lb/ft^3

U_{mf} = 26.7656 cm/s = 0.8781258 ft/s

ρ_R = 0.8473 g/cm^3 = 53.38 lb/ft^3

จากสมการ (4.12) จะได้

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = 1.27056$$

$$L_{f2} = 1.27056 \times 0.206897$$

$$= 0.262875 \quad \text{m}$$

ดังนั้นความความสูงเหนือความสูงหลุดลอยเฉลี่ยเฉลี่ย

$$L_e = \frac{(L_{f1} + L_{f2})}{2}$$

$$= 0.267079 \quad \text{m.}$$

ความสูงของการหลุดลอย

$$L_f = L_m + L_e$$

$$= 0.4 + 0.267.79$$

$$= 0.667079$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณความสูงหลุดลอยส่งผ่าน , TDH

$$TDH > 4.5\ L_a$$
$$> 4.5(0.267079)$$
$$> 1.20186$$

ความสูงทั้งหมดของเตาเผา (Total Combustion Height , TCH)

$$TCH > TDH + L_a$$
$$> 1.20186 + 0.267079$$
$$> 1.467 \quad m.$$

ในการออกแบบจึงให้ความสูงทั้งหมดของเตา 1.5 m และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m

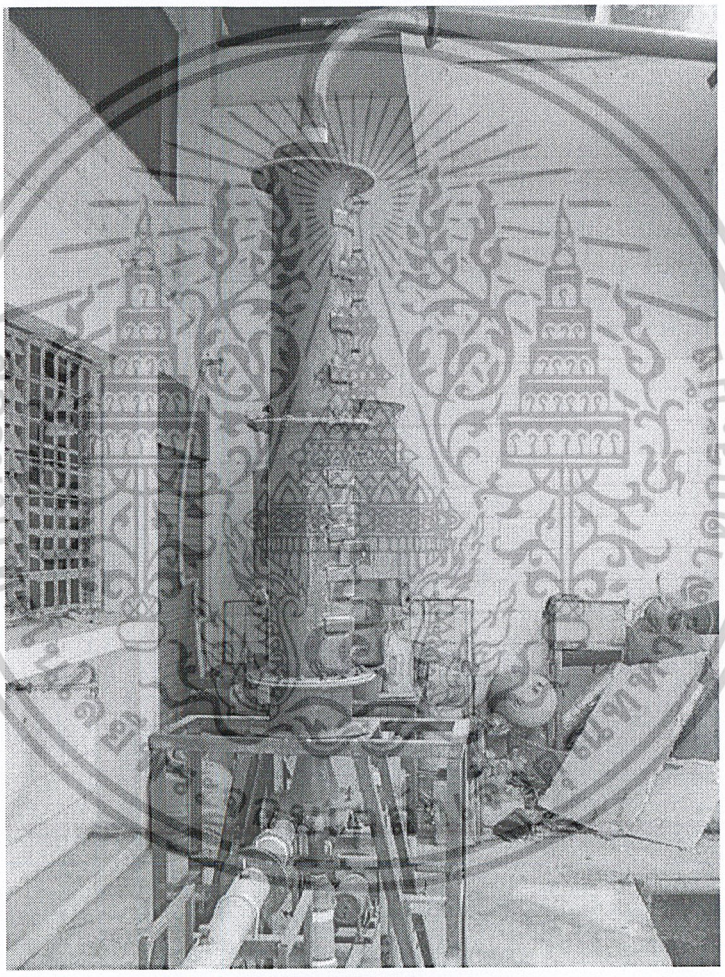
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การดำเนินงานวิจัยและการทดลอง

5.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

อุปการณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาเผาแกลบแบ่งเป็นส่วนต่างๆได้ดังนี้

5.1.1 เตาเผาแกลบแบบหมุนวน



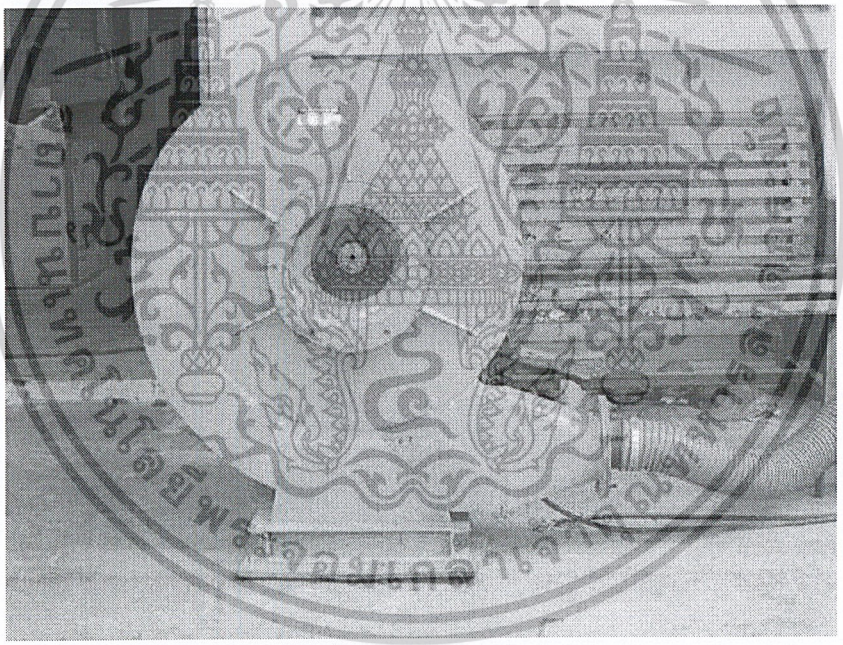
รูปที่ 5.1 เตาเผาแกลบแบบหมุนวน

เตาเผาแกลบแบบหมุนวนที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอกโดยแสดงไว้ในรูป 5.1 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน โดยมี ชุดสร้างอากาศหมุนวน มีลักษณะเป็นท่อยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์ 37 มิลลิเมตร ขดเป็นวงกลมขนาด 150 มิลลิเมตร ทำด้วยอลูมิเนียม โดยจะติดตั้งอยู่ทางด้านล่างของเตา โดยมีห้องเผาไหม้ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก 2 ท่อนประกบกันด้วยหน้าแปลน ภายในเป็นท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตรและหล่อคอนกรีตหนา 100 มิลลิเมตร เนื่องจากแสตนเลสสามารถทนความร้อนได้สูง เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนเพื่อไม่ให้มีความร้อนศูนย์เสียออกสู่สภาพแวดล้อมและครอบทับด้วยท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร เมื่อประกอบกันแล้วจะมีความสูง 1,500 มิลลิเมตร โดยจะทำการเจาะรูที่ด้านข้างของห้องเผาไหม้ขนาด 8 มิลลิเมตร เพื่อที่จะติดตั้งเทอร์โมคับเปิลขนาด 8 มิลลิเมตรจำนวน 4 จุดตามแนวความสูงเพื่อทำการ วัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาและส่วนบนสุดจะเป็นฝาครอบเตาและท่อทิ้งเถ้าลอย มีลักษณะเป็นเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 มิลลิเมตร หน้ามีความหนา 75 มิลลิเมตร ภายในหล่อด้วยคอนกรีตทนไฟเพื่อรักษาอุณหภูมิภายเตาไม่ให้มีความร้อนออกสู่สภาพแวดล้อมและมีหน้าแปลนเหล็กเพื่อประกอบกับส่วนที่เป็นห้องเผาไหม้ ในส่วนของท่อทิ้งเถ้าลอยจะทำการเชื่อมติดกับกับส่วนที่เป็นฝาครอบเตา ความร้อนที่ร้อนและขี้เถ้าจะลอยออกไปยังถังดักฝุ่นต่อไป

5.1.2 ชุดป้อนอากาศให้กับระบบ

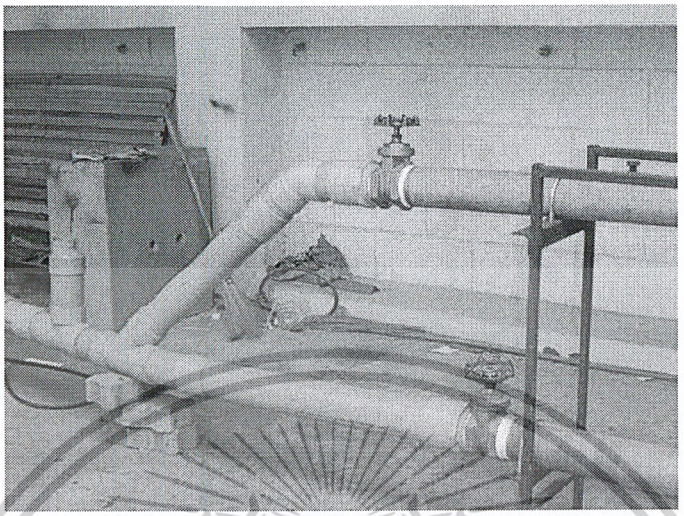


รูปที่ 5.2 ชุดป้อนอากาศให้กับระบบ

Blower ใช้มอเตอร์ขนาด 7 Hp เป็นแบบ Centrifugal สามารถป้อนอากาศให้มีอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 100 m^3/min ความดันสูงสุดเท่ากับ 200 mm.Aq และความเร็วรอบเท่ากับ 4,050 min^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

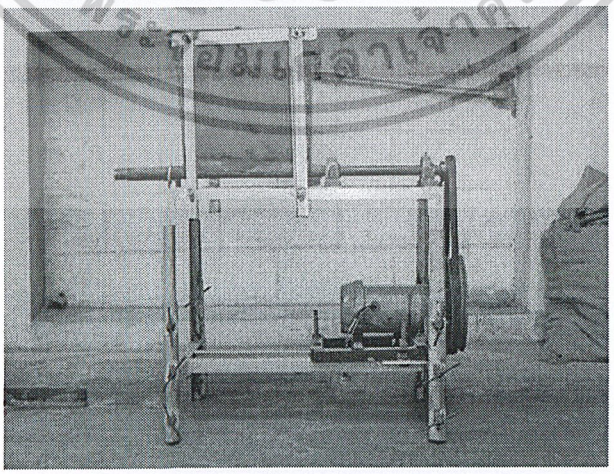
5.1.3 ท่อแยกอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ



รูปที่ 5.3 ท่อแยกอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ

โดยจะประกอบด้วยท่อแยกอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิที่ต่อผ่านชุดป้อนอากาศให้กับระบบดูรูป 5.3 โดยจะใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้วและมี แผ่นออริฟิสถูกประกบอยู่ด้วยหน้าแปลน เป็นตัวขวางการไหลของอากาศ เพื่ออ่านค่าที่มานอมิเตอร์ซึ่งจะติดตั้งก่อนถึงวาล์วแบบประตูน้ำ (Gate Vavle) ขนาด 3 นิ้วจำนวน 2 ตัวเพื่อเป็นตัวปรับและอ่านค่าที่มานอมิเตอร์ เนื่องจากอัตราการไหลอากาศที่มากเกินไปจะถูกปล่อยทิ้งออกโดยท่อแยกอากาศ ที่ต่อผ่านชุดป้อนอากาศ

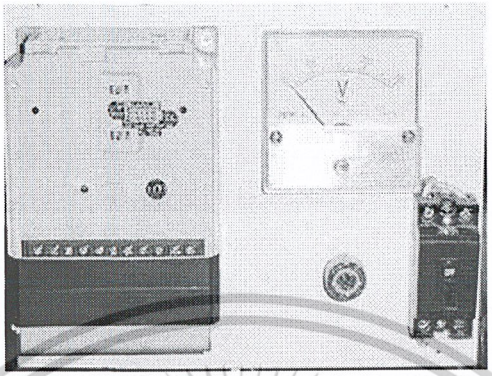
5.1.4 ระบบป้อนเชื้อเพลิง



รูปที่ 5.4 ระบบป้อนเชื้อเพลิงแกลบ

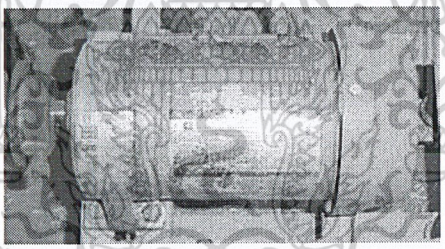
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hopper คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบรรจุเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 5.4 มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมสามารถบรรจุแกลบได้สูงสุดเท่ากับ 0.05 m^3



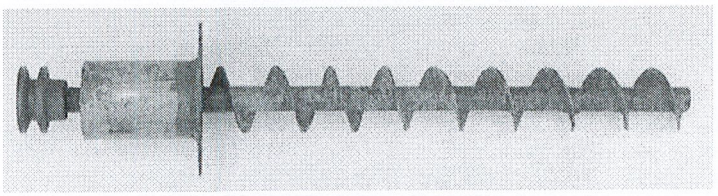
รูปที่ 5.5 Inverter

Inverter คือ อุปกรณ์ที่นำมาใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง มีกำลังขับ 0.22 KW 1.5A Model FR-A024-0.2 KP โดย Inverter สามารถปรับความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 1,650 RPM ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.6 Motor

Motor เป็นต้นกำลังในการขับ Screw Feed ดังแสดงในรูปที่ 5.6 โดยมอเตอร์ที่ใช้มีขนาดกำลังขับเท่ากับ 1/4 Hp

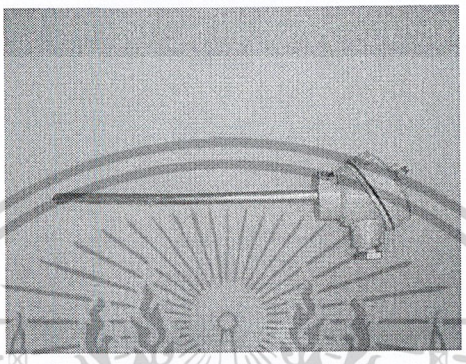


รูปที่ 5.7 Screw Feed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

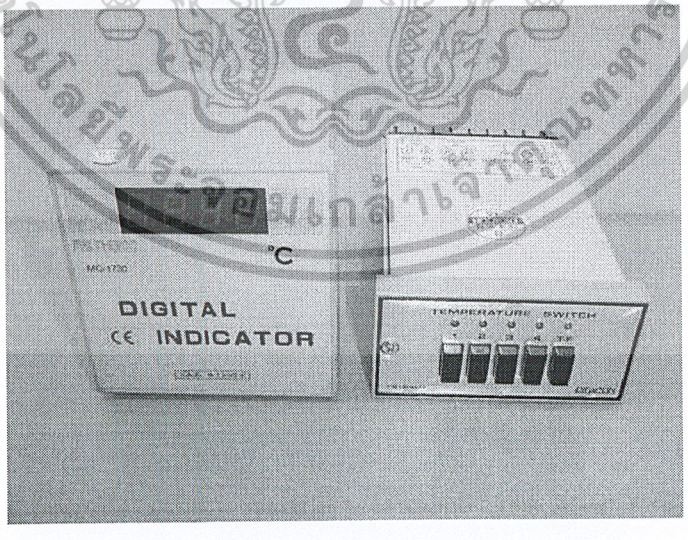
Screw Feed เป็นอุปกรณ์ลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ท่ออากาศปฐมภูมิ Screw Feed สร้างขึ้นจากเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.7

5.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา



รูปที่ 5.8 เทอร์โมคับเปิลชนิด K

เทอร์โมคับเปิลชนิด K แสดงในรูปที่ 5.8 มีหน้าที่วัดอุณหภูมิภายในเตาเผา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดยจะทำการติดตั้งจำนวน 4 จุดตามแนวความสูงสามารถทนอุณหภูมิได้ประมาณ 900 - 1000 องศาเซลเซียส

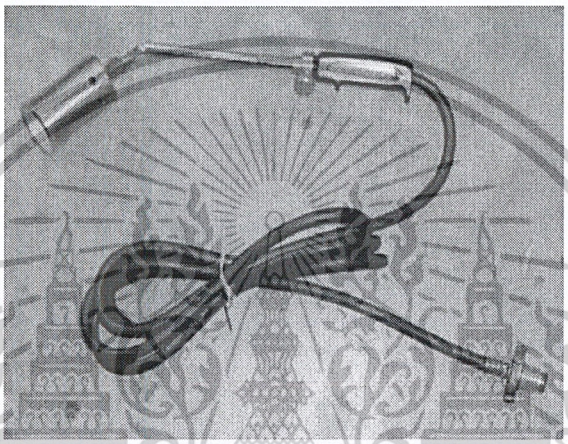


รูปที่ 5.9 Digital Indicator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.6 ชุดอุ่นเตาเผา

ชุดอุ่นเตาเผาเป็นระบบที่มีความสำคัญอีกระบบหนึ่งคือ ก่อนทำการทดลองเผาไหม้จะต้องทำการอุ่นเตาให้มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงจนกระทั่งเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ด้วยตัวเอง ระบบอุ่นเตาประกอบด้วย หัวเผา และ ถังเชื้อเพลิงก๊าซ LPG ซึ่งหัวเผามีขนาดเผาเท่ากับ 5.08 เซนติเมตร และสามารถปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง LPG ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และ 5.11 ประกอบด้วย ถังแก๊ส LPG ขนาด 15 kg และหัวเผา ขนาด 2 นิ้ว



รูปที่ 5.10 หัวเผา

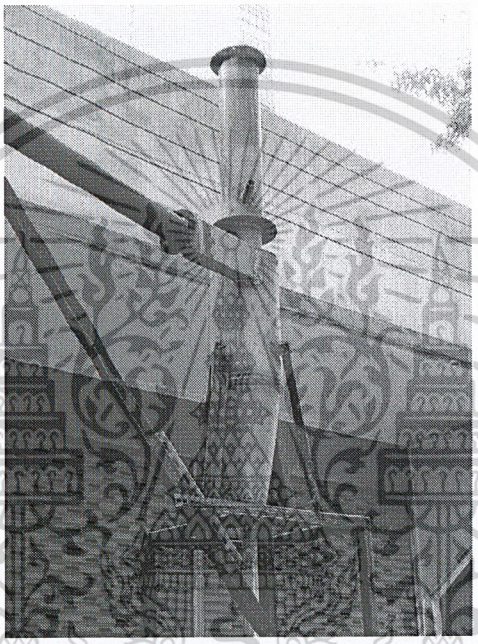


รูปที่ 5.11 ถังเชื้อเพลิงก๊าซ LPG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.7 ระบบดักจับฝุ่นขี้เถ้า

เป็นระบบดักจับฝุ่นขี้เถ้าที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้ โดยใช้หลักการของ Cyclone ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ประกอบด้วยท่อทางเข้าทรงกระบอก ส่วน Cyclone เป็นกรวย และก๊าซไอเสียจะถูกปล่อยออกทางด้านบนของไซโคลน และขี้เถ้าจะถูกดักและปล่อยออกลงสู่ถังเก็บขี้เถ้า เพื่อช่วยลดปริมาณมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง



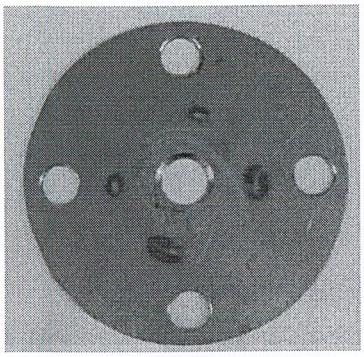
รูปที่ 5.12 Cyclone

5.1.8 ระบบวัดอัตราการไหลของอากาศ

การวัดอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ และอากาศทุติยภูมิใช้ ออริฟิส (Orifice) และค่าความดันตกคร่อมที่ผ่านออริฟิสสามารถอ่านค่าโดยใช้มาโนมิเตอร์ (Manometer) เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าอัตราการไหล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

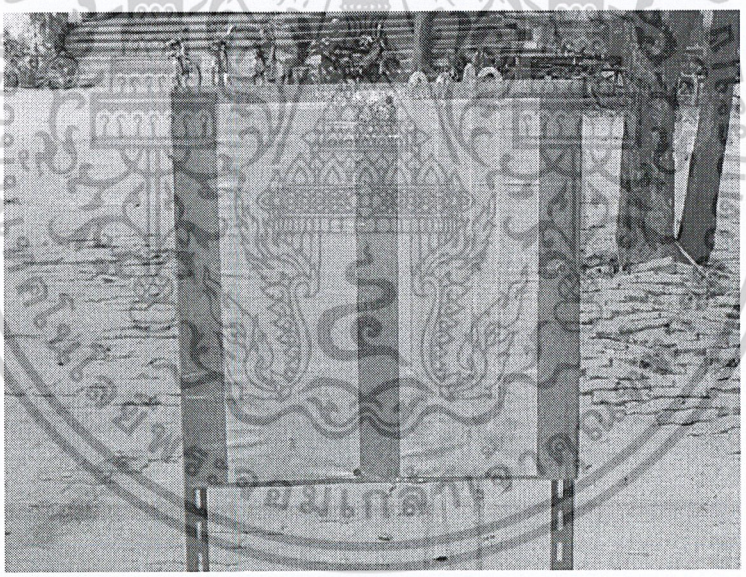
แผ่นออริฟิส (Orifice plate) แบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ออริฟิส 1 ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ และออริฟิส 2 ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 การสร้างออริฟิสมิเตอร์ใช้มาตรฐาน (ANSI/API 2530)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แผ่นออริฟิส

มาโนมิเตอร์ (Manometer) ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกใช้วัดผลต่างของความดันอากาศปฐมภูมิ และชุดที่สอง ใช้วัดผลต่างของความดันอากาศทุติยภูมิ ซึ่งใช้น้ำเป็นของเหลวภายในทั้งสองชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.14



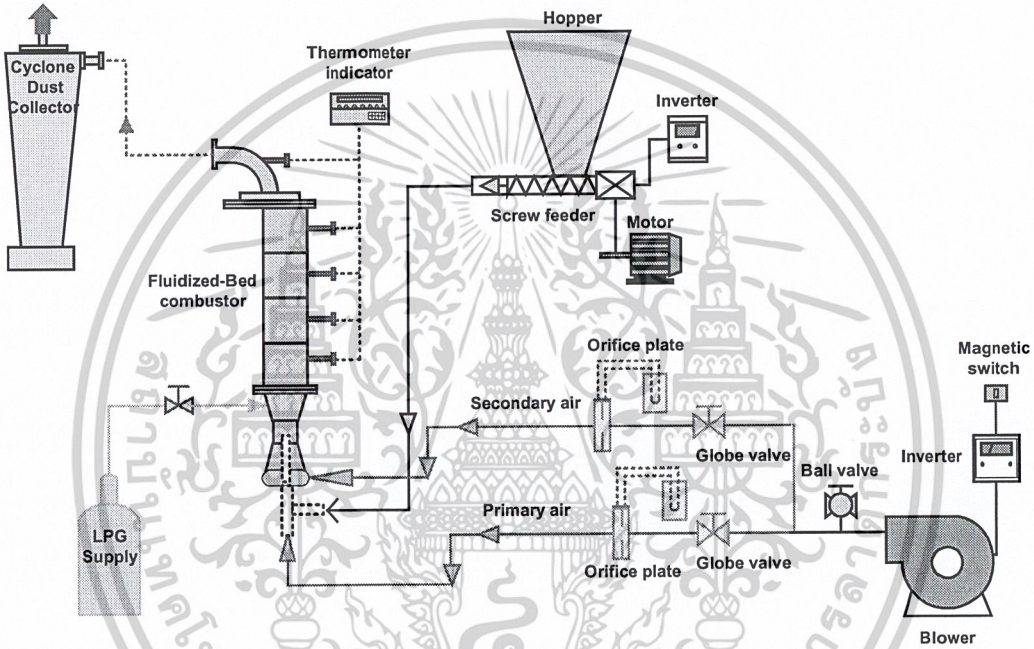
รูปที่ 5.14 มาโนมิเตอร์

5.2 ตำแหน่งและการติดตั้งของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตำแหน่งและการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 5.15 ในแนวความสูงของเตาจะทำการติดตั้งเทอร์โมคับเปิลจำนวน 4 จุดเพื่อวัดการกระจายตัวภายในเตา และอีก 1 จุดที่ทางออกส่วนบนสุดของเตาเพื่อทำการวัดอุณหภูมิไอเสียที่ท่อไอเสียโดยที่ไอเสียที่ออกมาจะนำไปผ่านถัง Cyclon เพื่อดักฝุ่นก่อนออกสู่สิงแวดล้อม โดยค่าที่ได้จะมาแสดงผลที่ Thermometer indicater เพื่อทำให้ทราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงการกระจายตัวภายในเตา โดยอากาศที่ใช้จะถูกป้อนเข้าสู่ระบบโดย Blowerโดยผ่านชุดแยกอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิเป็น 2 ส่วน โดยที่วาล์ว (Globe valve) และ ออริฟิส (Orifice plate) จะถูกติดตั้งก่อนที่อากาศทั้ง 2 ส่วนจะถูกป้อนเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงและเผาไหม้ภายในเตา โดยที่อากาศทุติยภูมิหรืออากาศหลัก (Primary air) จะถูกป้อนเข้าสู่ทางด้านล่างของเตาส่วนอากาศทุติยภูมิหรืออากาศรอง (Secondary air) จะถูกป้อนเข้าทางด้านข้างในแนวสัมผัสกับแนวรัศมีของเตา ระบบป้อนเชื้อเพลิงแกลบจะถูกควบคุมด้วยการปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ Inverter ซึ่งต่ออยู่กับมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อลำเลียงเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 5.15 แสดงตำแหน่งและการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

5.3 การอุ่นเตา

ก่อนทำการทดลองต้องทำการอุ่นเตา เพื่อทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้นจนกระทั่งเชื้อเพลิงแกลบที่ป้อนเข้าไปสามารถเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ การอุ่นเตาใช้หัวเผาโดยมีแก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง ขั้นตอนในการอุ่นเตาดังนี้ จุดไฟที่หัวเผาและทำการปรับวาล์วให้เปลวไฟที่หัวเผาเป็นสีน้ำเงิน หลังจากนั้นนำหัวเผาใส่เข้าตำแหน่งที่ใช้ในการอุ่นเตาบริเวณส่วนล่างของเตา จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาสูงประมาณ 400 - 500 $^{\circ}$C จึงเริ่มป้อนแกลบให้มีอัตราการไหลต่ำๆ เพื่อให้แกลบเผาไหม้และช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จนอุณหภูมิสูงประมาณ 700 - 750 $^{\circ}$C จึงหยุดป้อนเชื้อเพลิงแก๊สที่หัวเผา และนำหัวเผาออกจากห้องเผาไหม้ เนื่องจากอุณหภูมิสูงพอที่ทำให้เชื้อเพลิงแกลบสามารถเผาไหม้ด้วยตนเองอย่างต่อเนื่องแล้วจึงเริ่มทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง

5.4.1ทำการอุ่นเตาโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีในเตาพร้อมกับป้อนอากาศปฐมภูมิเพียงเล็กจน อุณหภูมิในเตาเผามีค่าประมาณ 450 - 500 $^{\circ}$C จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงแกลบละเอียด น้อยจนกระทั่ง อุณหภูมิภายในเตาประมาณ 650 - 700 $^{\circ}$C แล้วนำหัวเผาออกจากเตา

5.4.2 ปรับอัตราการไหลอากาศรวมของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 14 Lps

5.4.3 ปรับอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด 40%, 50% และ 60% ตามลำดับ

5.4.4 เมื่อการเผาไหม้มีความเสถียร ทำการบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูง (x/D) 1.5, 3.5, 6.5 และ8.5 ตามลำดับ และตำแหน่งตามแนวรัศมี (r/R) เท่ากับ 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 และ1.00 ตามลำดับ

5.4.5 ปรับอัตราป้อนเป็น 0.1, 0.12, และ 0.16 kg/min ตามลำดับ

5.4.5 ทำการปรับอัตราการไหลอากาศรวมของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 16 Lps และทดลองซ้ำข้อ 5.4.3 ถึงข้อ 5.4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
ผลการทดลองและวิจารณ์

6.1 บทนำ

จากที่ได้ทำการทดลองที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5 ในการทดลองนี้มุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาถึงผลของการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบวอร์เทค โดยมีชุดสร้างอากาศหมุนวนผสมกับอากาศที่ไหลเข้าทางด้านล่างของเตาเพื่อสร้างความปั่นป่วน (TURBULANCE) ของเชื้อเพลิงภายในเตา อัตราส่วนของปริมาณการไหลของอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณการไหลของอากาศทั้งหมด (γ) และอัตราป้อนปริมาณแกลบที่มีผลต่อการเผาไหม้ โดยพิจารณาจาก การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา เถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองกำหนด ดังนี้

1. อัตราการไหลอากาศที่ 14 และ 16 Lps
2. อัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (γ) = 0.40, 0.50 และ 0.60
3. อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min

6.2 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบ

6.2.1 กรณีอัตราการไหลรวมคงที่ๆ 14 Lps

จากรูป 6.1, 6.3, 6.5 จะเป็นการแสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาที่อัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมดโดยในกราฟแต่ละเส้นจะแสดงถึงอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10 , 0.12 และ 0.16 kg/minโดยแกนในแนวนอนจะแสดงถึงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในแนวรัศมีจากจุดกึ่งกลางจนถึงผนังเตาโดยทำการเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะรัศมีที่ทำการวัดอุณหภูมิต่อขนาดรัศมีของเตา(r/R) ส่วนแกนในแนวตั้งจะแสดงถึงอุณหภูมิในตำแหน่งความสูงต่างๆของเตาโดยทำการเทียบระหว่างตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคับเปิลในแนวความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา(X/D) ส่วนรูป 6.2, 6.4, 6.6 จะเป็นการแสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา

6.2.1.1 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 40%

พิจารณารูปที่ 6.1 ที่ γ = 40% พิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูง X/D = 1.5 ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min จะค่อนข้างไม่มีความแตกต่างกันมากนักและเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งความสูง X/D = 3.5 จนถึง X/D = 8.5 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวรัศมีโดยแนวโน้มค่อนข้างที่จะคล้ายกันแต่ความแตกต่างของอุณหภูมิจะค่อนข้างชัดเจนขึ้นโดยจะเห็นว่าที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.16 kg/min อุณหภูมิจะสูงกว่าที่อัตราป้อนปริมาณแกลบ 0.10 และ 0.12 kg/min เนื่องจากที่ปริมาณอากาศที่คงที่แต่ทำการปรับอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ต่างกันโดยที่อัตราป้อนปริมาณแกลบมาก ซึ่งจะพอเพียงกับอากาศที่ป้อนเข้าไปทำให้สามารถทำอุณหภูมิได้สูง เมื่อพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิในแนวรัศมีจะเห็นว่าอุณหภูมิที่สูงที่สุดจะไม่ใช่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของเตาแต่จะเป็นตำแหน่งถัดไปที่ r/R = 0.25 เนื่องจากที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตาจะเป็นตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลมหมุนซึ่งเป็นตำแหน่งที่ส่วนผสมเบาบางเกินไปเมื่อเทียบกับตำแหน่งถัดมาตามรัศมีของเตา การกระจายอุณหภูมิในตำแหน่งถัดมาจากตำแหน่ง r/R = 0.25 จะมีแนวโน้มลดลงอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงจนถึงบริเวณผนังเตา (r/R = 1) เนื่องจากบริเวณช่วงกลางของเตามีการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่เหมาะสมกว่าบริเวณขอบผนังเตาอีกทั้งอนุภาคของเชื้อเพลิงแกลบที่ถูกเหวี่ยงออกในแนวรัศมีของเตาเนื่องด้วยผลอากาศหมุนวนทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงแกลบเสียดสีกับผนังเตาและปริมาณออกซิเจนที่น้อยเกินไปประกอบกับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่หนาเกินไปจึงทำให้ไม่สามารถที่จะเผาไหม้ได้ ผลที่ได้คืออุณหภูมิตกลงอย่างเห็นได้ชัด

พิจารณารูป 6.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งความสูงของเตาที่ r/R เดียวกันจะพบว่าช่วงของการเผาไหม้จะเริ่มขึ้นที่ตำแหน่ง X/D = 1.5 จนถึง X/D = 3.5 เนื่องจากว่าในช่วงนี้อากาศทุติยภูมิจะทำหน้าที่หน่วงระยะเวลาการเผาไหม้ได้นานทำให้การเผาไหม้จะเริ่มเกิดขึ้นในช่วงนี้ และหลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงจนถึงทางออกโดยผลอันเนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนที่เบาบางทำให้เกิดการเผาไหม้อยู่บ้างแต่อุณหภูมิก็ไม่สูงมากนักในช่วง X/D = 6.5 จนถึงX/D = 8.5 เมื่อเปรียบเทียบกับช่วง X/D = 1.5 จนถึง X/D = 3.5 ซึ่งเป็นช่วงของการเผาไหม้

6.2.1.2 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 50%

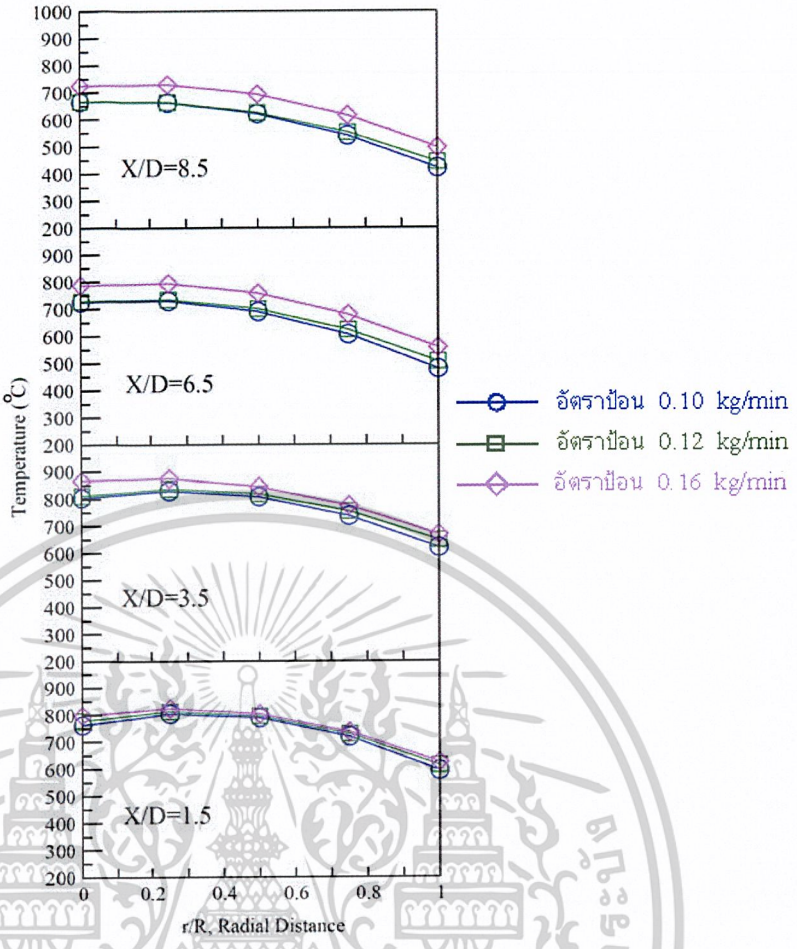
พิจารณารูปที่ 6.3 ที่ γ = 50% พิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิในช่วงเริ่มต้นที่ตำแหน่ง X/D = 1.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min การกระจายตัวของอุณหภูมิจะจะมีแนวโน้มคล้ายกับการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณีที่ γ=40% และอุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่งความสูง X/D = 3.5 โดยอยู่ที่ตำแหน่งในแนวรัศมีที่ r/R = 0.25 จนถึง 0.5 ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบ 0.16 kg/min ซึ่งเป็นอัตราป้อนปริมาณแกลบมากที่สุด เนื่องจากตำแหน่งนี้อากาศและเชื้อเพลิงสามารถคลุกเคล้ากันดีที่สุดโดยสังเกตได้จากอุณหภูมิโดยอุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ 900 องศาเซลเซียสในบริเวณกลางเตา

พิจารณารูป 6.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวความสูงจะมีแนวโน้มที่คล้ายกับกรณีที่ γ=0.40 โดยช่วงของการเกิดการเผาไหม้จะอยู่ที่ตำแหน่งความสูง X/D = 1.5 จนถึง 3.5 เนื่องจากเป็นช่วงที่อิทธิพลของลมหมุนจะช่วยหน่วงเวลาให้เกิดการเผาไหม้ที่นานที่สุด ซึ่งจะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิจะแตกต่างกันมากที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.16 kg/min โดยถัดจากตำแหน่งความสูงนี้ไปอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงจนถึงส่วนตำแหน่ง X/D = 8.5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทางออกของเตา

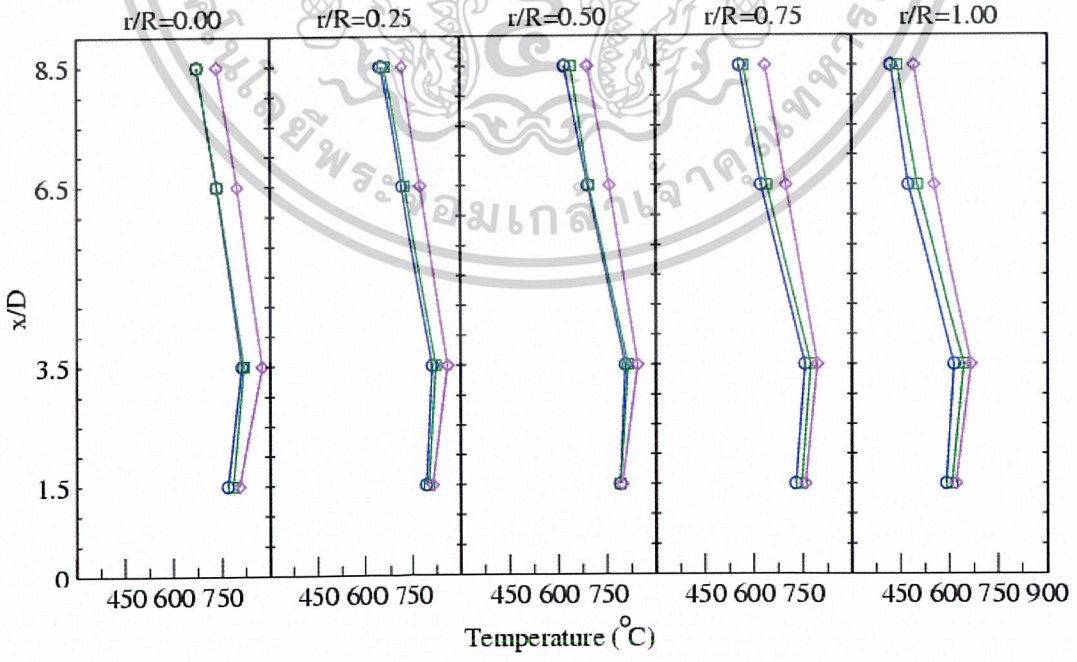
6.2.1.3 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 60%

พิจารณารูปที่ 6.5 ที่ γ = 60% เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรวมที่ตำแหน่งความสูง X/D = 1.5, 3.5, 6.5 และ 8.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราป้อนปริมาณแกลบอุณหภูมิจะสูงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการเปรียบเทียบที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min เนื่องจากเชื้อเพลิงที่มากขึ้น ทำให้สามารถผลิตความร้อนได้มากขึ้น ดังนั้น จึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

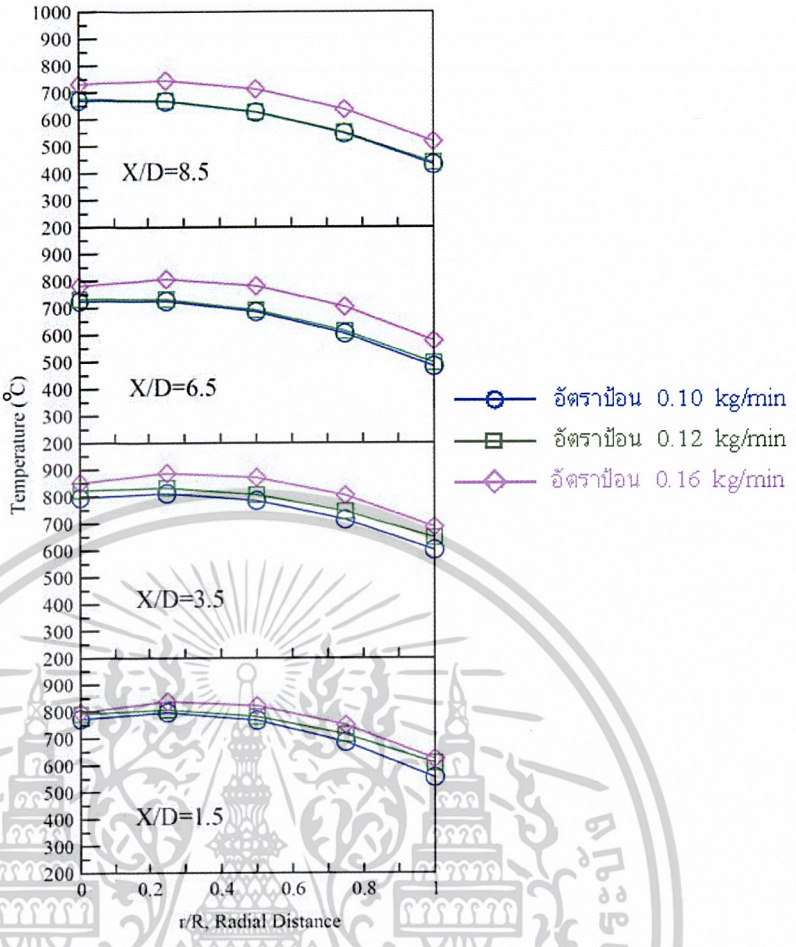


รูปที่ 6.1 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 40% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตา

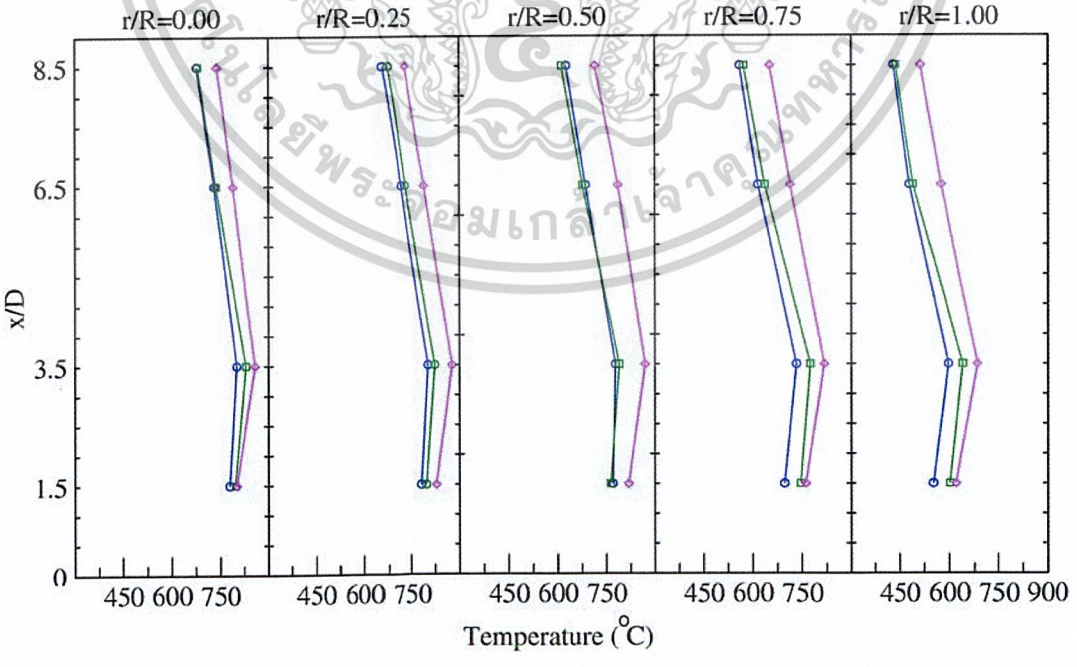


รูปที่ 6.2 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 40% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

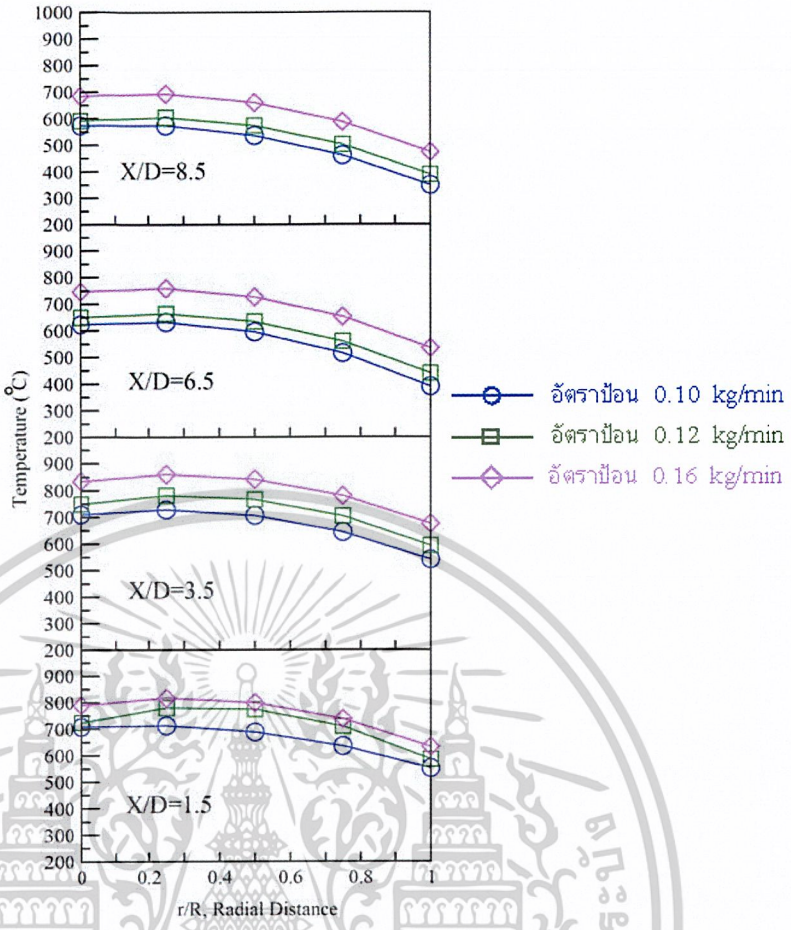


รูปที่ 6.3 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 50% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตา

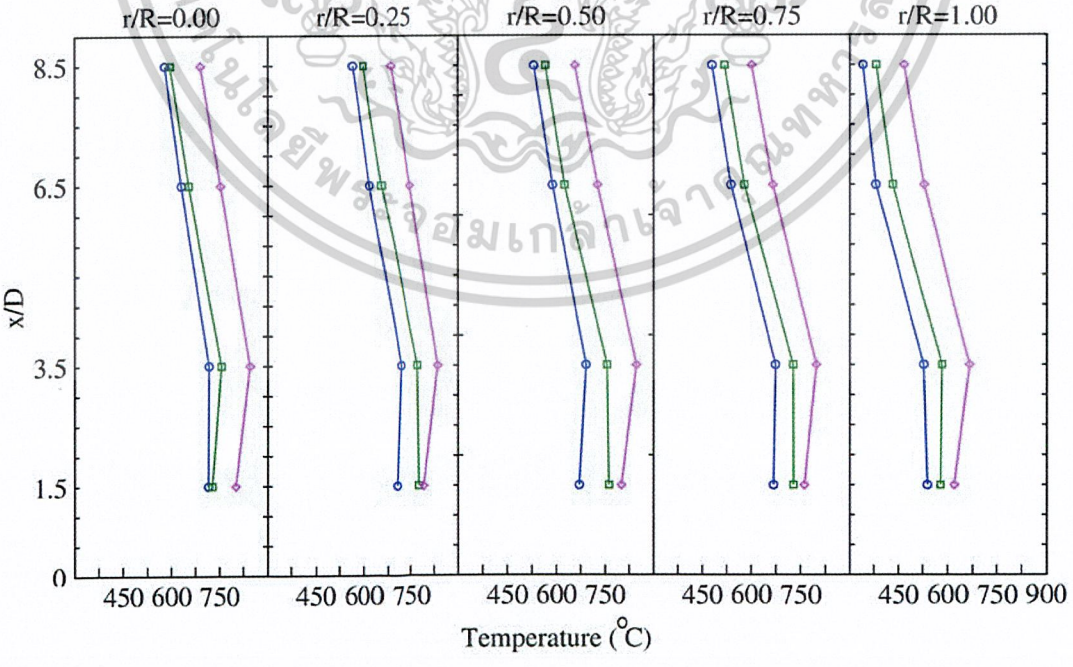


รูปที่ 6.4 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 50% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 60% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตา



รูปที่ 6.6 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 60% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งความสูง X/D = 3.5 ในตำแหน่งในแนวรัศมีที่ r/R = 0.25 จนถึง 0.50 ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบ 0.16 kg/min โดยอุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ 900 องศาเซลเซียส

พิจารณารูปที่ 6.6 พิจารณาที่ตำแหน่ง X/D = 1.5 ซึ่งเป็นจุดเริ่มของการเผาไหม้และอุณหภูมิจะค่อยๆเริ่มสูงขึ้นจนถึงตำแหน่ง X/D = 3.5 ซึ่งเป็นช่วงสิ้นสุดของการเผาไหม้เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่มีปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ ทั้งยังมีความปั่นป่วนที่ได้อิทธิพลจากลมหมุนทำให้ส่วนผสมคลุกเคล้ากันได้ดีจึงทำให้ช่วงนี้สามารททำให้อุณหภูมิได้สูง

6.2.2 กรณีอัตราการไหล 16 Lps

จากรูป 6.7, 6.9, 6.11 จะเป็นการแสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาที่อัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมดโดยในกราฟแต่ละเส้นจะแสดงถึงอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/minโดยแกนในแนวนอนจะแสดงถึงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในแนวรัศมีจากจุดกึ่งกลางจนถึงผนังเตาโดยทำการเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะรัศมีที่ทำการวัดอุณหภูมิต่อขนาดรัศมีของเตา(r/R) ส่วนแกนในแนวตั้งจะแสดงถึงอุณหภูมิในตำแหน่งความสูงต่างๆของเตาโดยทำการเทียบระหว่างตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคับเปิลในแนวความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา(X/D) ส่วนรูป 6.8, 6.10, 6.12 จะเป็นการแสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา

6.2.2.1 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 40%

พิจารณารูป 6.7 γ = 40% พิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิในช่วงแรกที่ตำแหน่ง X/D = 1.5 จนถึง X/D = 3.5 1.5 ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min จะค่อนข้างไม่มีความแตกต่างกันมากนักและ เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งความสูง X/D = 3.5 จนถึง X/D = 8.5 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวรัศมีโดยแนวโน้มค่อนข้างที่จะคล้ายกันแต่ความแตกต่างของอุณหภูมิจะค่อนข้างชัดเจนขึ้นโดยจะเห็นว่าที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.16 kg/min อุณหภูมิจะสูงกว่าที่อัตราป้อนปริมาณแกลบ 0.10 และ 0.12 kg/min เนื่องจากที่ปริมาณอากาศที่คงที่แต่ทำการปรับอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ต่างกันโดยที่อัตราป้อนปริมาณแกลบมาก จึงเป็นสัดส่วนซึ่งจะพอเพียงกับอากาศที่ป้อนเข้าไปทำให้สามารถทำอุณหภูมิได้สูง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในแนรัศมีจะเห็นว่าอุณหภูมิที่สูงที่ r/R = 0.25 เนื่องจากที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตาจะเป็นตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลมหมุนซึ่งเป็นตำแหน่งที่ส่วนผสมเบาบางเกินไปเมื่อเทียบกับตำแหน่งถัดมาตามรัศมีของเตา การกระจายอุณหภูมิในตำแหน่งถัดมาจากตำแหน่ง r/R = 0.25 จะมีแนวโน้มลดลงอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงจนถึงบริเวณผนังเตา (r/R = 1) เนื่องจากบริเวณช่วงกลางของเตามีการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่เหมาะสมกว่าบริเวณขอบผนังเตาอีกทั้งอนุภาคของเชื้อเพลิงแกลบที่ถูกเหวี่ยงออกในแนวรัศมีของเตาเนื่องด้วยผลอากาศหมุนวนทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงแกลบเสียดสีกับผนังเตาและปริมาณออกซิเจนที่น้อยเกินไปประกอบกับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่หนาเกินไปจึงทำให้ไม่สามารถที่จะเผาไหม้ได้ ผลที่ได้คืออุณหภูมิตกลงอย่างเห็นได้ชัด

พิจารณารูป 6.8 เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งความสูงของเตาที่ r/R เดียวกันจะพบว่าช่วงของการเผาไหม้จะเริ่มขึ้นที่ตำแหน่ง X/D = 1.5 จนถึง X/D = 3.5 เนื่องจากว่าในช่วงนี้อากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุติยภูมิจะทำหน้าที่หน่วงระยะเวลาการเผาไหม้ได้นานทำให้การเผาไหม้จะเริ่มเกิดขึ้นในช่วงนี้ และหลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงจนถึงทางออกโดยผลอันเนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนที่เบาบางทำให้เกิดการเผาไหม้อยู่บ้างแต่อุณหภูมิก็ไม่สูงมากนักในช่วง X/D = 6.5 จนถึงX/D = 8.5 เมื่อเปรียบเทียบกับช่วง X/D = 1.5 จนถึง X/D = 3.5 ซึ่งเป็นช่วงของการเผาไหม้ โดยอุณหภูมิที่สูงอยู่จะอยู่ที่บริเวณ X/D = 3.5 อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส

6.2.2.2 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 50%

พิจารณารูปที่ 6.9 ที่ γ = 0.50 พิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูง X/D = 1.5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เริ่มมีเผาไหม้เนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดจากอากาศส่วนที่สองทำให้อุณภูมิในตำแหน่งความสูงนี้ไม่ค่อยสูงมากนัก โดยเฉพาะบริเวณกึ่งกลางที่ตำแหน่ง r/R = 0 จนถึง 0.25 จะตกลงอันเนื่องมาจากอิทธิพลของอากาศเย็นที่เป็นส่วนของอากาศทุติยภูมิโดยอุณหภูมิจะตกลงในส่วนที่เป็นจุดศูนย์กลางของลมหมุนจึงเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในตำแหน่งนี้ เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวรัศมีตลอดหน้าตัดจะเห็นว่าอุณหภูมิบริเวณช่วงกลางเตาที่ r/R = 0 จนถึง 1 อุณหภูมิจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ตำแหน่ง r/R = 0 ซึ่งเป็นตำแหน่งกลางเตาอุณหภูมิจะสูงกว่าที่ตำแหน่ง r/R = 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งติดผนังเตาและจะชัดเจนมากขึ้นที่ตำแหน่งความสูง X/D = 6.5 จนถึง 8.5

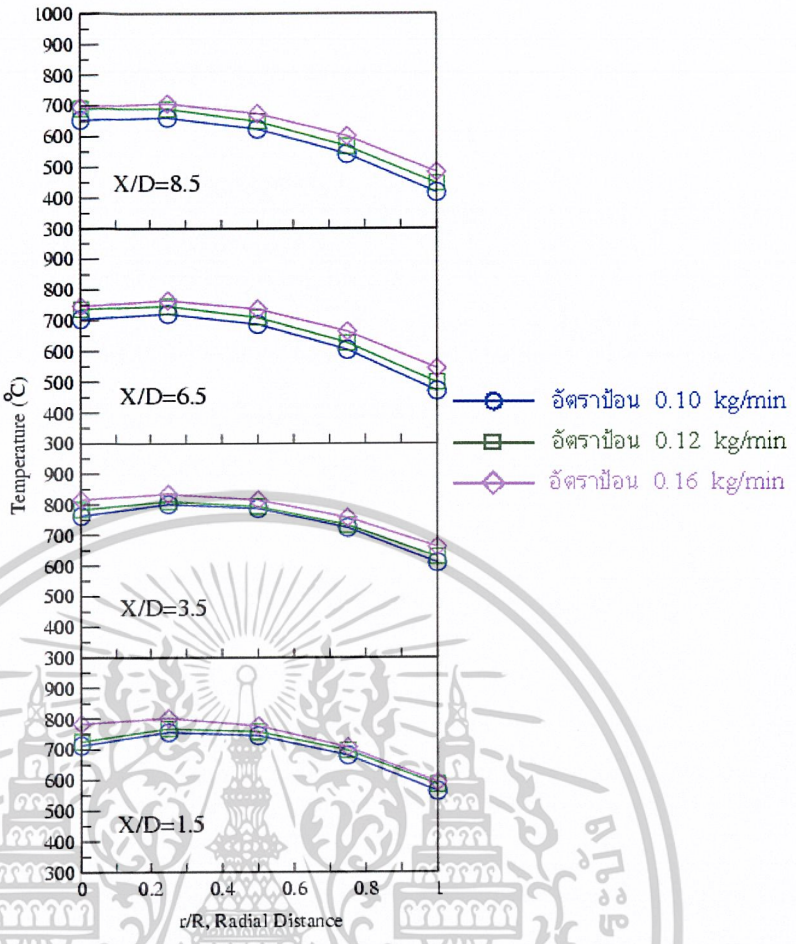
พิจารณารูปที่ 6.10 พิจารณาที่ตำแหน่ง X/D = 1.5 ซึ่งเป็นจุดเริ่มของการเผาไหม้และอุณหภูมิจะค่อยๆเริ่มสูงขึ้นจนถึงตำแหน่ง X/D = 3.5 ซึ่งเป็นช่วงสิ้นสุดของการเผาไหม้เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่มีปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ ทั้งยังมีความปั่นป่วนที่ได้อิทธิพลจากลมหมุนทำให้ส่วนผสมคลุกเคล้ากันได้ดีจึงทำให้ช่วงนี้สามารททำให้อุณหภูมิได้สูง แต่สำหรับในกรณีนี้คือที่ γ = 0.50 และอัตราการไหล 16 Lps แนวโน้มการกระจายอุณหภูมิค่อนข้างที่จะไม่ค่อยคงที่เมื่อเปรียบกับกรณีที่ γ = 0.50 และอัตราการไหล 14 Lps เนื่องจากเพราะปริมาณอากาศที่มากเกินไปทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟค่อนข้างจะแกว่งมาก

6.2.2.3 อิทธิพลจากอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min ที่ γ = 60%

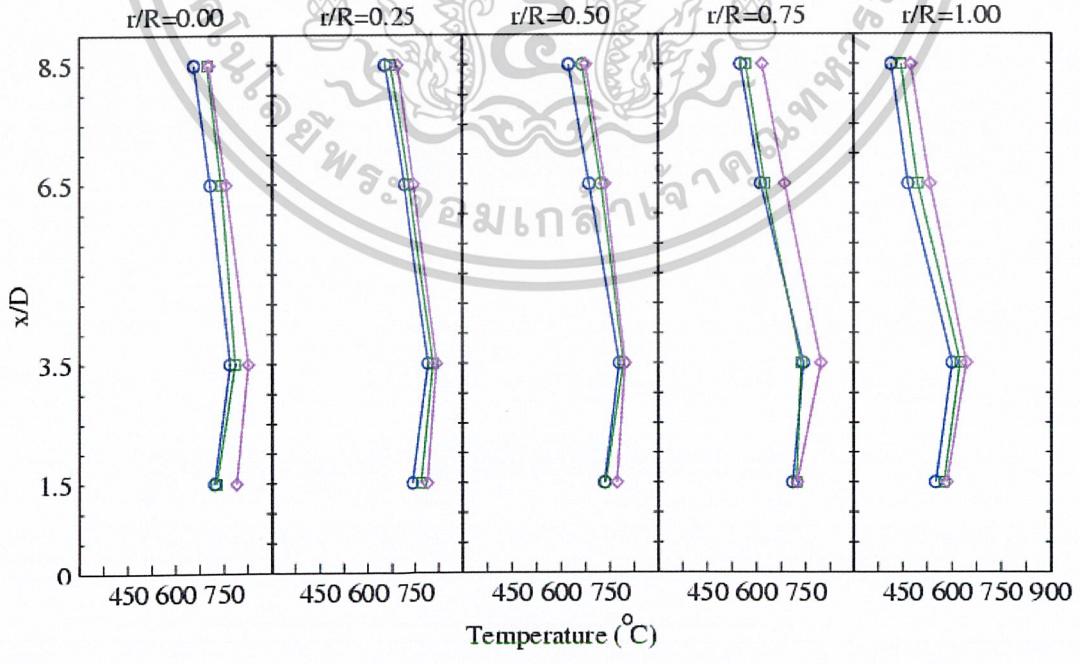
พิจารณารูปที่ 6.11 γ = 0.40 พิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยแนวโน้มการกระจายตัวของอุณภูมิที่อัตราป้อนแกลบที่ 0.16 kg/min จะมีแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สูงกว่า เนื่องจากเชื้อเพลิงที่มากขึ้นทำให้สามารถผลิตความร้อนได้มากขึ้นเพียงพอต่อปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าไปเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10 และ 0.12 kg/min โดยอุณหภูมิจะสูงที่สุดที่บริเวณตำแหน่ง X/D = 3.5 จนถึง 6.5 อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 850 องศาเซลเซียส

พิจารณารูปที่ 6.12 พิจารณาที่ตำแหน่ง X/D = 1.5 ซึ่งเป็นจุดเริ่มของการเผาไหม้และอุณหภูมิจะค่อยๆเริ่มสูงขึ้นจนถึงตำแหน่ง X/D = 3.5 ซึ่งเป็นช่วงสิ้นสุดของการเผาไหม้เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่มีโดยลักษณะการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงจะมีแนวโน้มดังที่ได้กล่าวไว้ในกรณีก่อนหน้านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

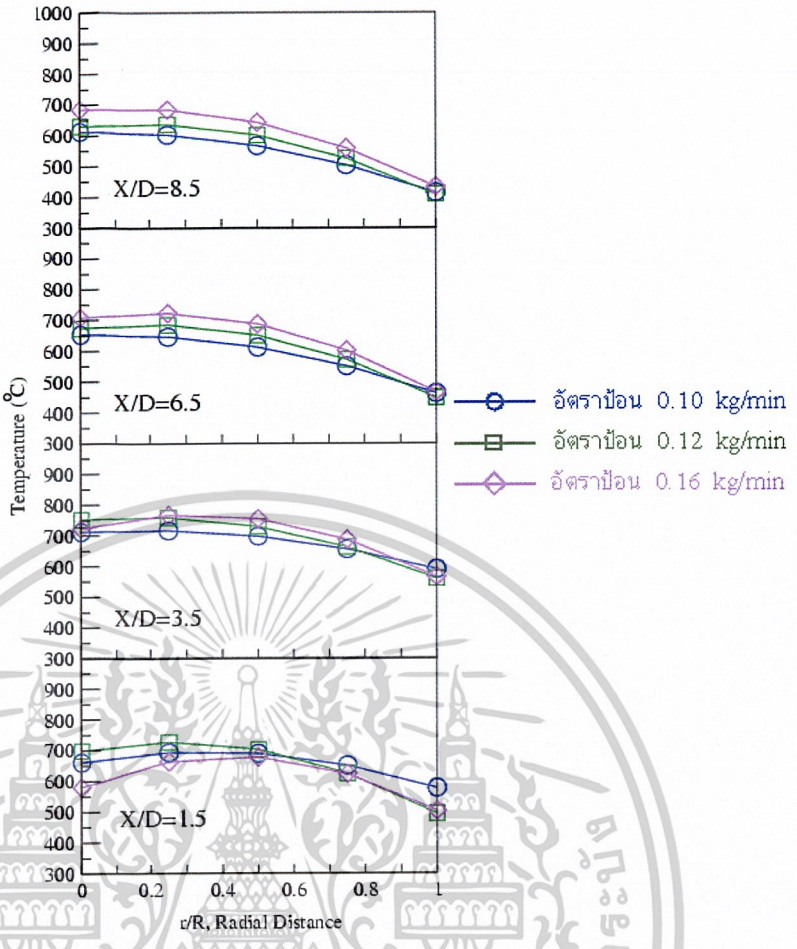


รูปที่ 6.7 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 40% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตา

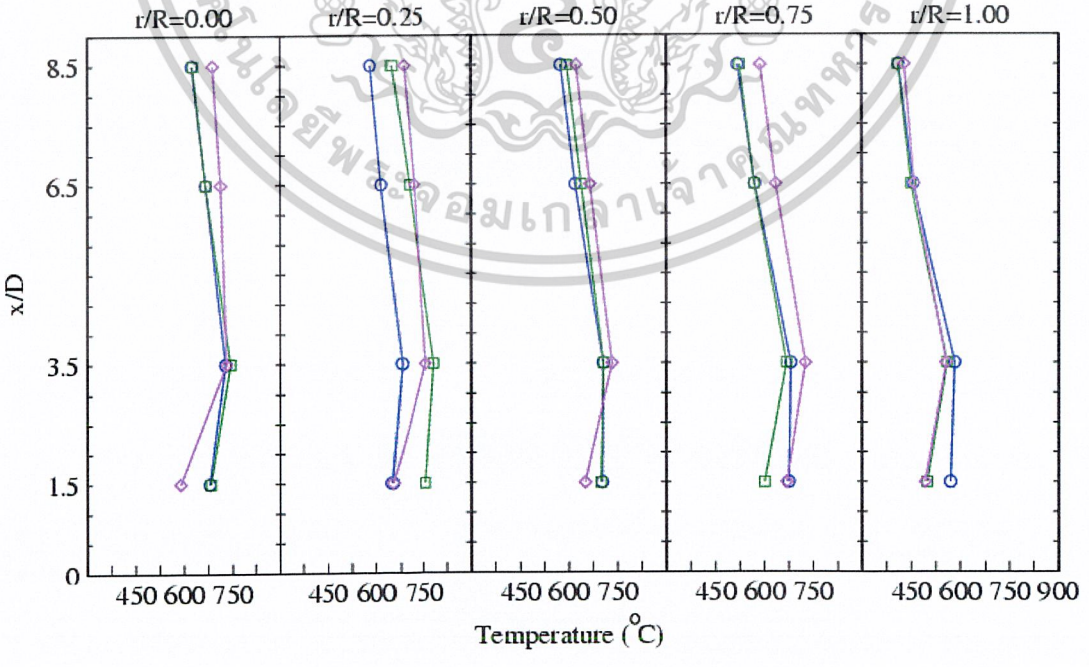


รูปที่ 6.8 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 40% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

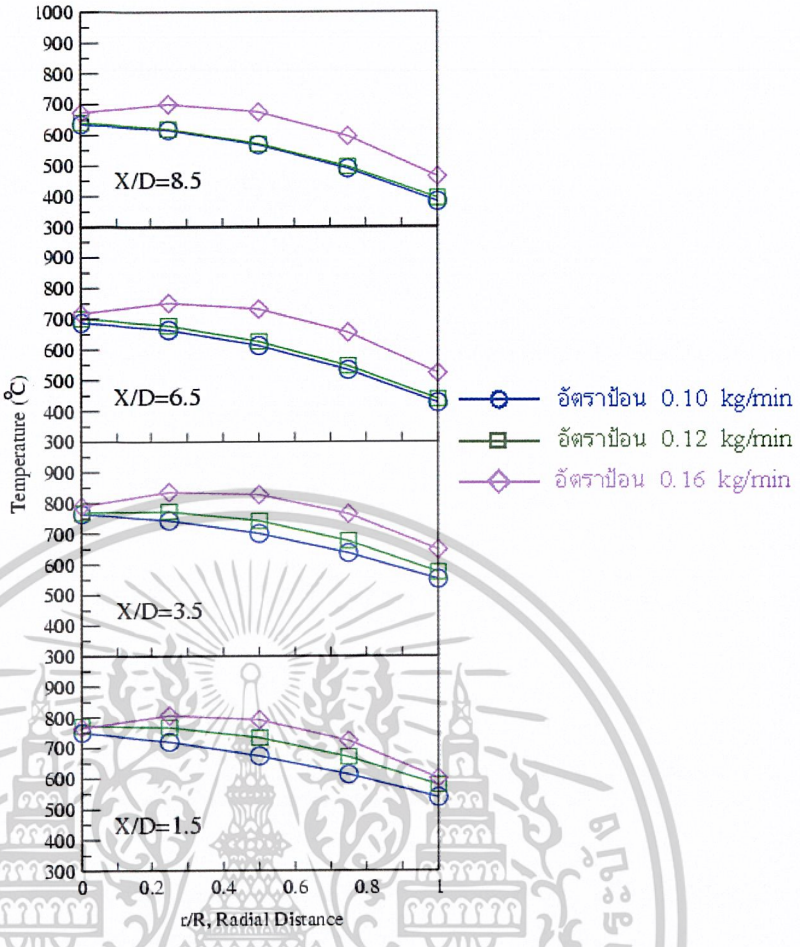


รูปที่ 6.9 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 50% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตา

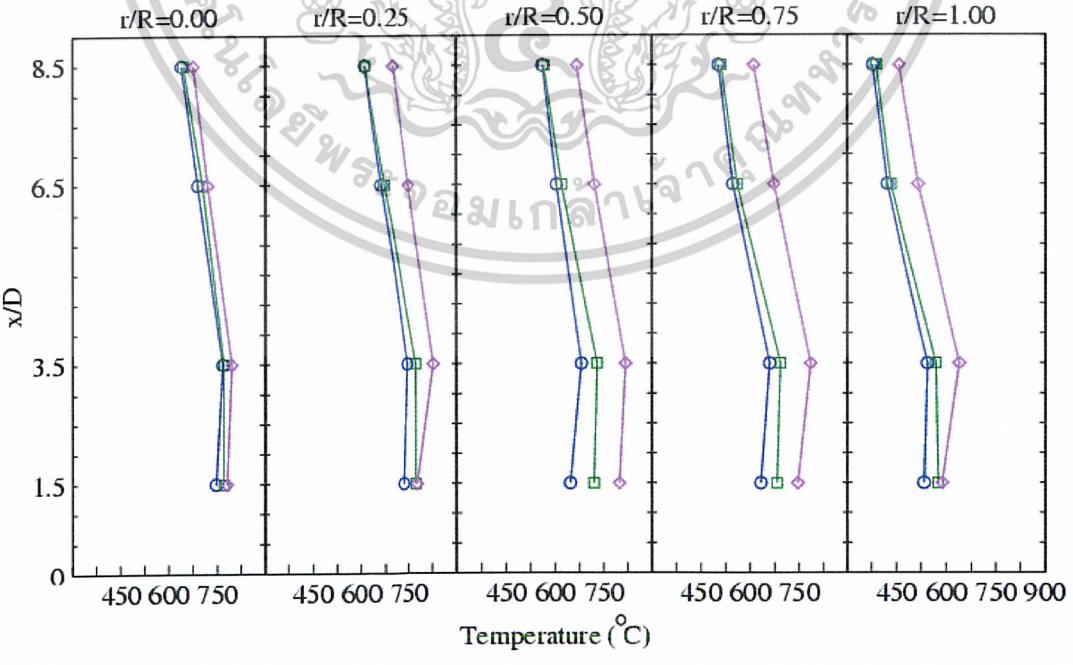


รูปที่ 6.10 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 50% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.11 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 60% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตา



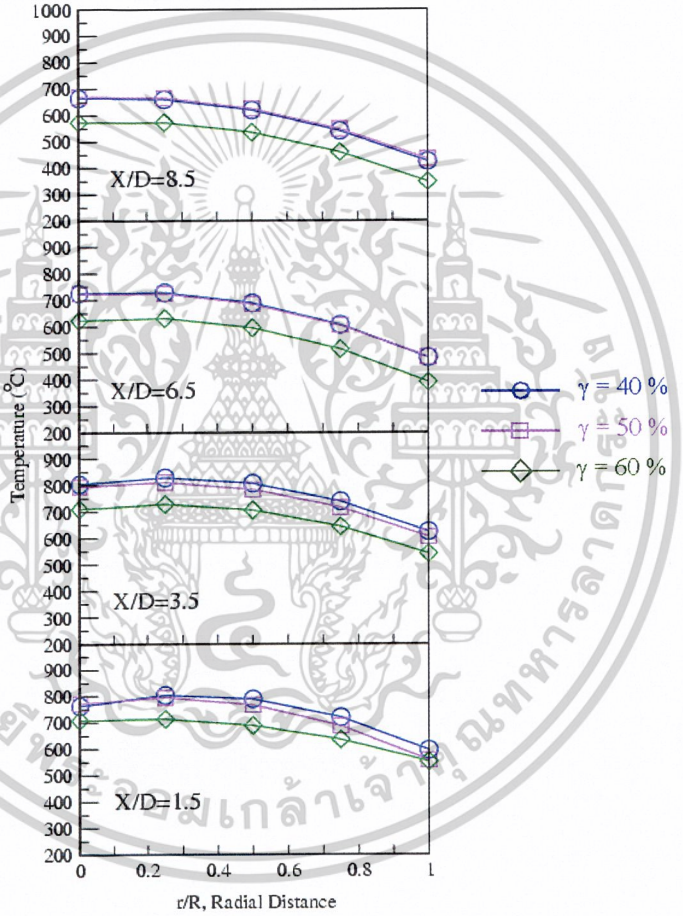
รูปที่ 6.12 กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ , γ = 60% แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 อิทธิพลจากอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (γ)

6.3.1 กรณีอัตราการไหลรวมคงที่ๆ 14 Lps

จากรูป 6.13 - 6.15 จะเป็นการแสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาที่อัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมดโดยในกราฟแต่ละเส้นจะแสดงถึงอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (γ) ที่ 40%, 50% และ 60% โดยแกนในแนวนอนจะแสดงถึงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในแนวรัศมีจากจุดกึ่งกลางจนถึงผนังเตาโดยทำการเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะรัศมีที่ทำการวัดอุณหภูมิต่อขนาดรัศมีของเตา (r/R) ส่วนแกนในแนวตั้งจะแสดงถึงอุณหภูมิในตำแหน่งความสูงต่างๆของเตาโดยทำการเทียบระหว่างตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคับเปิลในแนวความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา(X/D)



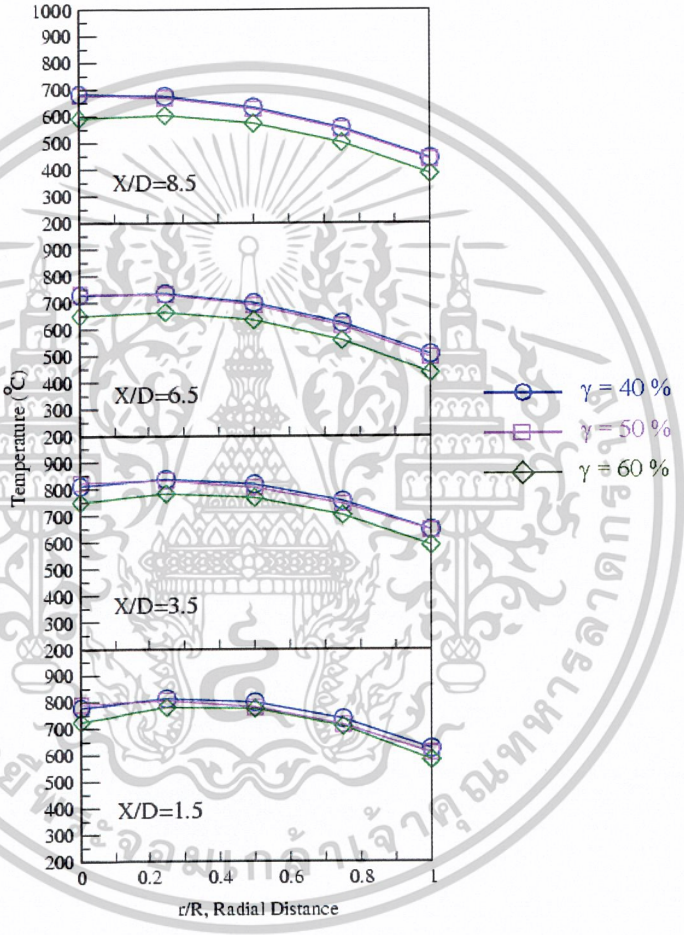
รูปที่ 6.13 กรณีใช้อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10 kg/min แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี

6.3.1.1 อิทธิพลจาก γ = 40%, 50%, 60% ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10 kg/min

พิจารณารูปที่ 6.13 ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10 kg/min เมื่อพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิในแนวรัศมีของเตาจะเห็นว่าผลของการเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 60% อุณหภูมิจะลดลงเมื่อเทียบกับการเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 50% และ 40% โดยเริ่มพิจารณาจากตำแหน่งความสูงเริ่มต้นที่ X/D = 1.5 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่บริเวณกึ่งกลางเตาของการเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 40% จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกับที่การเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 60% ประมาณ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มส่วนของอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็นลมหมุนในปริมาณที่มากเกินไปทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ถูกเหวี่ยงออกไปตามแนวรัศมีทำให้ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่บางเกินไปในส่วนของการเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 40% และ 50% ที่ตำแหน่งความสูง X/D = 3.5 จนถึง 8.5 การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีของเตาจะไม่แตกต่างกันมากนัก โดยอุณหภูมิจะสูงที่สุดที่ตำแหน่ง X/D = 3.5 ในแนวความสูงของเตาและที่ r/R = 0.25 จนถึง 0.50 ในแนวรัศมีของเตาโดยมีอุณหภูมิโดยประมาณอยู่ที่ 800 องศาเซลเซียส พิจารณารูป



รูปที่ 6.14 กรณีใช้อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.12 kg/min แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี

6.3.1.2 อิทธิพลจาก γ = 40%, 50%, 60% ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.12 kg/min

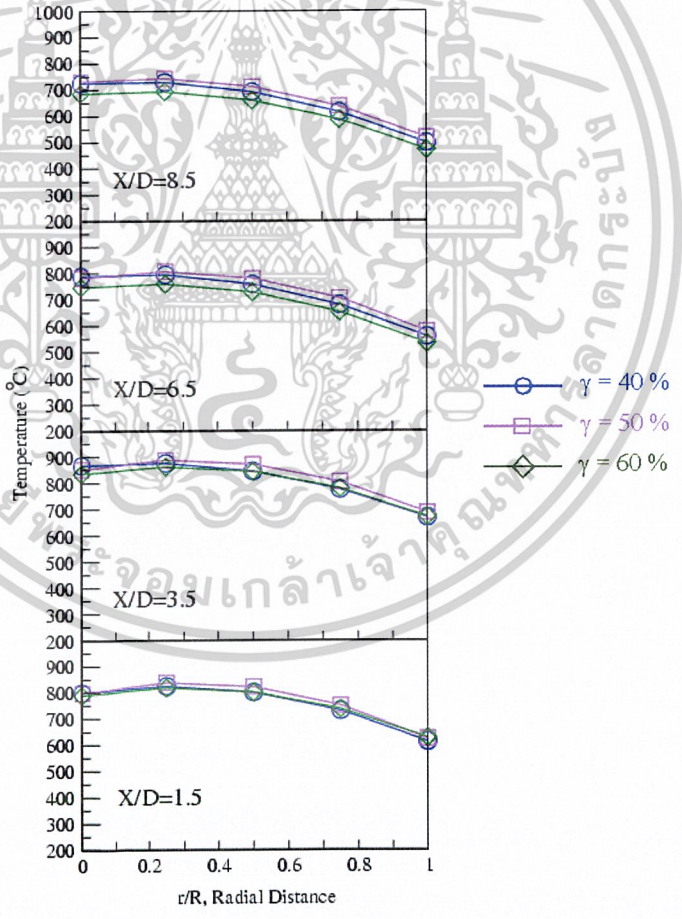
พิจารณารูปที่ 6.14 ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.12 kg/min พิจารณาตำแหน่งความสูงที่ X/D = 1.5 ที่ปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 40%, 50%, 60% ลักษณะการกระจายอุณหภูมิจะไม่ค่อยแตกต่างกันมากเท่าไรนัก แต่อุณหภูมิจะแตกต่างกันที่บริเวณ r/R = 0 ที่ปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 60% เนื่องจากการเพิ่มส่วนของอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็นลมหมุนในปริมาณที่มากทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ถูกเหวี่ยงออกไปตามแนวรัศมีทำให้ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่บางเกินไป จึงทำให้อุณหภูมิในตำแหน่งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลง จากเส้นกราฟการกระจายอุณหภูมิจะเริ่มแตกต่างขึ้นที่ตำแหน่ง X/D = 3.5 จนถึง 8.5 ที่ทางออกของเตา โดยที่การเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 60% ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิมากที่สุดจะไม่เป็นผลดีเท่าไรนักเนื่องจากจะทำให้อุณหภูมิลดลง

6.3.1.3 อิทธิพลจาก γ = 40%, 50%, 60% ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.16 kg/min

พิจารณารูปที่ 6.15 ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.16 kg/min พิจารณาตำแหน่งความสูงที่ X/D = 1.5 ที่ปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 40%, 50%, 60% ลักษณะการกระจายอุณหภูมิจะไม่ค่อยแตกต่างกันมากเท่าไรนัก ลักษณะแนวโน้มโดยรวมจะใกล้เคียงกันจนถึงที่ตำแหน่งความสูง X/D = 6.5 จะเริ่มเห็นว่าอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิจะมีผลทำให้อุณหภูมิลดลง แต่ก็ไม่มากนักจะความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปริมาณอากาศทุติยภูมิสูงสุดที่ γ = 60% และที่ปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ำสุดที่ γ = 40% ในช่วงตำแหน่ง r/R = 0 จนถึง r/R = 1 ในแนวรัศมี โดยความแตกต่างของอุณหภูมิโดยประมาณที่ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.15 กรณีใช้อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.16 kg/min แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการทดลองและศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบวอร์เทค โดยมีชุดสร้างอากาศหมุนวนผสมกับอากาศที่ไหลเข้าทางด้านล่างของเตาเพื่อสร้างความปั่นป่วน (TURBULANCE) ของเชื้อเพลิงภายในเตา ข้อมูลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ถึงปัญหาและสรุปผลการทดลองที่ได้นี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปโดยมีดังต่อไปนี้

1. จากการศึกษาและการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบการปรับอัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.10, 0.12 และ 0.16 kg/min จากรูป 6.1-6.39 (ก) พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราป้อนปริมาณเชื้อเพลิงที่มากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น เนื่องจากผลของการเพิ่มเชื้อเพลิงเข้าไปในขณะที่ปริมาณอากาศภายในเตาเผาคงที่และอยู่ในสัดส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่พอดีไม่อยู่ในช่วงของส่วนผสมที่หนาจนเกินไปจึงสามารถทำอุณหภูมิได้สูง โดยการกระจายตัวอุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 0.16 kg/min และจากรูป 6.1-6.39 (ข) จะทำให้ทราบถึงช่วงของการเกิดการเผาไหม้ภายในเตา โดยการเผาไหม้จะเริ่มที่ตำแหน่ง X/D = 1.5 อนุภาคของเชื้อเพลิงแกลบส่วนใหญ่ที่บริเวณกลางเตาในแนวรัศมีจะเผาไหม้ก่อนและเปลวไฟจะค่อยๆลามเผาไหม้เชื้อเพลิงในส่วนถัดไป โดยอุณหภูมิที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนไปสิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้ที่ตำแหน่ง X/D = 3.5

2. จากการศึกษาและการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบการปรับปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 0.40, 0.50, 0.60 ทำให้ทราบว่าผลที่ได้คือการเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิที่มากเกินไปจะมีผลทำให้อุณภูมิภายในเตาเผาลดลง โดยเฉพาะการเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ γ = 0.60 ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิที่มากที่สุด เนื่องจากการเพิ่มส่วนของอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็นลมหมุนในปริมาณที่มากเกินไปทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่น้ำหนักมากกว่าถูกเหวี่ยงออกไปตามแนวรัศมีในขณะที่บริเวณกลางเตาจะเป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่เบาบาง การเผาไหม้จะเริ่มเกิดขึ้นอย่างช้าๆและไม่สามารถที่จะทำอุณหภูมิได้สูงนักเพราะอนุภาคส่วนใหญ่ที่จะสามารถเผาไหม้ได้จะอยู่ที่บริเวณผนังเตา

จากผลการทดลองนี้ จะทำให้เราสามารถทราบถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในเตาเผาได้จากการกระจายตัวของอุณหภูมิเพื่อเป็นแนวทางศึกษาและพัฒนาควรที่จะต้องมีการปรับหาช่วงของความเหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานจริงต่อไป เนื่องจากโครงงานนี้ได้ทำการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาลงจากในอดีตทำให้ความเร็วของอากาศภายในเตาเผาที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับความเสถียรของเปลวไฟภายในเตาและมีอิทธิพลเป็นอย่างมากในการปรับอากาศที่เป็นส่วนผสมในการเผาไหม้ทำให้เป็นอุปสรรคในการทดลองทั้งนี้ทั้งนั้นจึงต้อง ทำการปรับปรุงเพื่อเหมาะแก่การประยุกต์ไปใช้งานจริงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเตาเผานี้ได้ทำการออกแบบและสร้างพร้อมทั้งยังทำการลดขนาดจากเตาเผาในอดีตโดยการดัดแปลงอุปกรณ์ที่ใช้สร้างอากาศหมุนวนโดยได้ทำการดัดแปลงชิ้นส่วนของชุดเสื้อเทอร์โบซึ่งเป็นส่วนประกอบของรถยนต์ เพื่อให้ได้ลักษณะของอากาศหมุนวนโดยนำมาประกอบเข้าทางด้านล่างของเตาเผาและได้มุ่งเน้นถึงการศึกษาคุณลักษณะการกระจายของอุณหภูมิในแนวรัศมีเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

โดยมีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางดังต่อไปนี้

1. ศึกษาถึงผลกระทบในกรณีที่ทำการดัดแปลงอุปกรณ์ที่สร้างอากาศหมุนวนโดยการเปลี่ยนขนาดต่างๆเพื่อศึกษาและพัฒนาการกระจายตัวของอากาศหมุนวนที่เป็นประโยชน์พฤติกรรมการเผาไหม้

2. ศึกษาและวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกมาจาการเผาไหม้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและวิเคราะห์โดยละเอียดต่อไป

3. ศึกษาการนำความร้อนที่ได้จากเตาเผาไปใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรมเช่นการนำไปอบแห้งพืชผลทางการเกษตรหรือนำไปใช้ลดความชื้นในงานด้านอุตสาหกรรมเป็นต้น

4. ศึกษาและปรับปรุงชุดป้อนแกลบแบบเดิมที่ส่งถ่ายเชื้อเพลิงแบบเกลียว (Screw Feed) ให้มีสมรรถนะในการส่งถ่ายเชื้อเพลิงแกลบให้คงที่มากขึ้นกว่าในอดีต

5. ควรหาแนวทางในการปรับปรุงชุดวัดอัตราการไหลให้มีค่าที่เที่ยงตรงและแม่นยำสำหรับการศึกษาและทดลองเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดต่อไป

6. ศึกษาถึงการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นๆ เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว กากปาล์ม ขี้เลื่อย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] นายธัชชัย ทั่วถวิล และนายสันติ วัชรอาภาไพบูลย์. 2534 "เตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน 2" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[2] เรือโทประจักร์ จิตรีพิทย์. 2536 "การศึกษารูปแบบการไหลและลักษณะการสันดาปของห้องเผาไหม้แบบไซโคลนที่ใช้ขี้เลื่อยเป็นเชื้อเพลิง" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[3] นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ (2544) "การศึกษาเชิงทดลองของเตาเผาแบบวอร์เทค" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[4] Sen Nieh and Tim T.Fu "Development of a Non-Slagging Vortex Combustor (VC) for Space/Water Heating Application" , Proc. 5th International Coal Conf., pp.761 – 768 , 1988

[5] ศุภชัย เลื่อนลอย (2545) "อิทธิพลของความชื้นของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[6] วิศิษฐ์ ลีลาผาติกุล (2545) "เตาเผาแกลบแบบวอร์เทคหลายขั้น" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[7] เสรีย์ ตู้ประกาย " การศึกษาและออกแบบเตาเผาตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด " วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.

[8] ศศิวิมล มูลสว่าง " การเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไดซ์เบด " วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2525.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ (Rice Husk)

แกลบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ในการสีข้าวเปลือก 1 ตัน จะได้แกลบออกมาทั้งหมดประมาณ 220 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 22 สำหรับประเทศไทยประเมินได้ว่าในแต่ละปีจะมีแกลบประมาณ 4.4-4.6 ล้านตัน มีศักยภาพเชิงความร้อนเทียบเท่ากับการใช้น้ำมันดิบ 1.46-1.53 ล้านตัน แต่ตามความเป็นจริงถูกนำมาใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรมทั่วไปเพียงร้อยละ 12 เท่านั้น ทั้งนี้เพราะวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้อยู่กระจัดกระจาย มีความหนาแน่นไม่มากเป็นผลให้การขนส่งมีราคาแพง ปัจจุบันการใช้แกลบเป็นพลังงานอยู่ในวงจำกัดปริมาณการใช้แกลบน้อย โดยที่แกลบอาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หลายวิธี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเตาเผา เพื่อผลิตความร้อนให้หม้อน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ใช้ผลิตแก๊สเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ ทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งใช้แทนฟืนและใช้อบโดยวิธีไพโรไลซิส(Pyrolysis) เพื่อใช้แทนถ่าน เป็นต้น

คุณสมบัติทางกายภาพ

แกลบมีคุณสมบัติทางด้านการเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีพอสมควร แต่จะมีข้อเสียคือเมื่อทำการเผาไหม้เถ้าแกลบจะมีปริมาณสูงถึงประมาณร้อยละ 15.8-24.9 ค่าความร้อนของแกลบจะอยู่ระหว่าง 2,900-4,580 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ค่าความชื้นโดยประมาณ 1.1-9.8% กิโลกรัม

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติของแกลบ

Proximate	Moisture	(%)	1.1-9.8
Analysis	Fixed	(%)	12.7-17.4
	Volatile matier	(%)	56.4-69.3
	Ash	(%)	15.8-24.9
	Carbon	(%)	38.2-55.8
Untimate	Silica	(%)	14.7
Analysis	Hydrogen	(%)	0.2-5.31
	Oxygen	(%)	29.9-31.7
	Sulphur	(%)	0.07-0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิง

	เชื้อเพลิงแข็ง	เชื้อเพลิงเหลว	แก๊สเชื้อเพลิง
การขนส่ง	- ขนส่งง่ายแต่ลำบากในการขนย้าย	- ขนส่งง่ายและขนย้ายง่าย	- แก๊สธรรมชาติขนส่งและขนย้ายง่าย
การเก็บ	- ต้องใช้พื้นที่กว้าง	- ต้องใช้ถัง	- ต้องบรรจุในภาชนะพิเศษ
คุณสมบัติ	- คุณภาพเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน - ค่าความร้อนต่อหน่วยต่ำ - ขี้เถ้ามาก - ประสิทธิภาพในการสันดาปต่ำ - ต้องการอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้เป็นจำนวนมาก - มีความยุ่งยากในการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ	- คุณภาพค่อนข้างคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูง - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง - ต้องการอากาศในการเผาไหม้น้อย - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติง่าย	- คุณภาพคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักมีค่าสูง - ไม่มีขี้เถ้า - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงสุด - ต้องการอากาศส่วนเกินจำนวนน้อยมาก - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติง่าย
อุปกรณ์สันดาป	- ขนาดเล็กไม่ซับซ้อน	- ขนาดเล็ก	- ขนาดค่อนข้างใหญ่
มลภาวะ	- จำเป็นต้องมีการป้องกันการเกิดมลภาวะต่อบรรยากาศ	- จำเป็นต้องมีการป้องกันการเกิดมลภาวะต่อบรรยากาศ	- มีผลกระทบต่อการเกิดมลภาวะของบรรยากาศน้อย
ราคา	- ถูก	- ค่อนข้างแพง	- แพงที่สุดต่อความร้อน 1 หน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ปริมาณชีวะมวลในปี 2540 และ 2544

หน่วย :ตัน

ชีวมวล	ปี พ.ศ.	
	2540*	2544**
กากอ้อย	15,410,636	19,357,826.64
แกลบ	5,962,548	5,582,426.4
ลำต้นมันสำปะหลัง	1,591,353	1,656,557.81
ซังข้าวโพด	9,066,220	6,905,058.88
กากถั่วเหลือง	141,483	259,574.21
เส้นใย/เปลือกผลปาล์ม	680,029	1,449,985.40

หมายเหตุ * ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ปีเพาะปลูก 2540/44

** ประมาณการ

ตารางที่ ก-4 ปริมาณการใช้ชีวะมวลโดยเฉลี่ยต่อโรง

ชีวะมวล	ปี พ.ศ.			
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	เหนือ	กลาง	ใต้
ไม้ฟืน	279.71	528.29	342.16	541.39
ซังข้าวโพด	1,008	178.23	1,250	-
ถ่านไม้	0.48	0.174	0.021	0.041
ต้นข้าวโพดเหลือทิ้ง	-	-	90	-
แกลบ	185.30	383.65	3,729.64	4.14
เส้นใย/เปลือกผลปาล์ม	-	-	70	14,390
ฟางข้าว	700	17	50	-
เส้นใย/เปลือกผลมะพร้าว	-	66	21	101
กากอ้อย	352,805.83	525,984	174,594	-
ลำต้นมันสำปะหลัง	-	-	80	-
ต้นอ้อยเหลือทิ้งในไร่	-	-	70	-
กากถั่วเหลือง	-	-	90	-

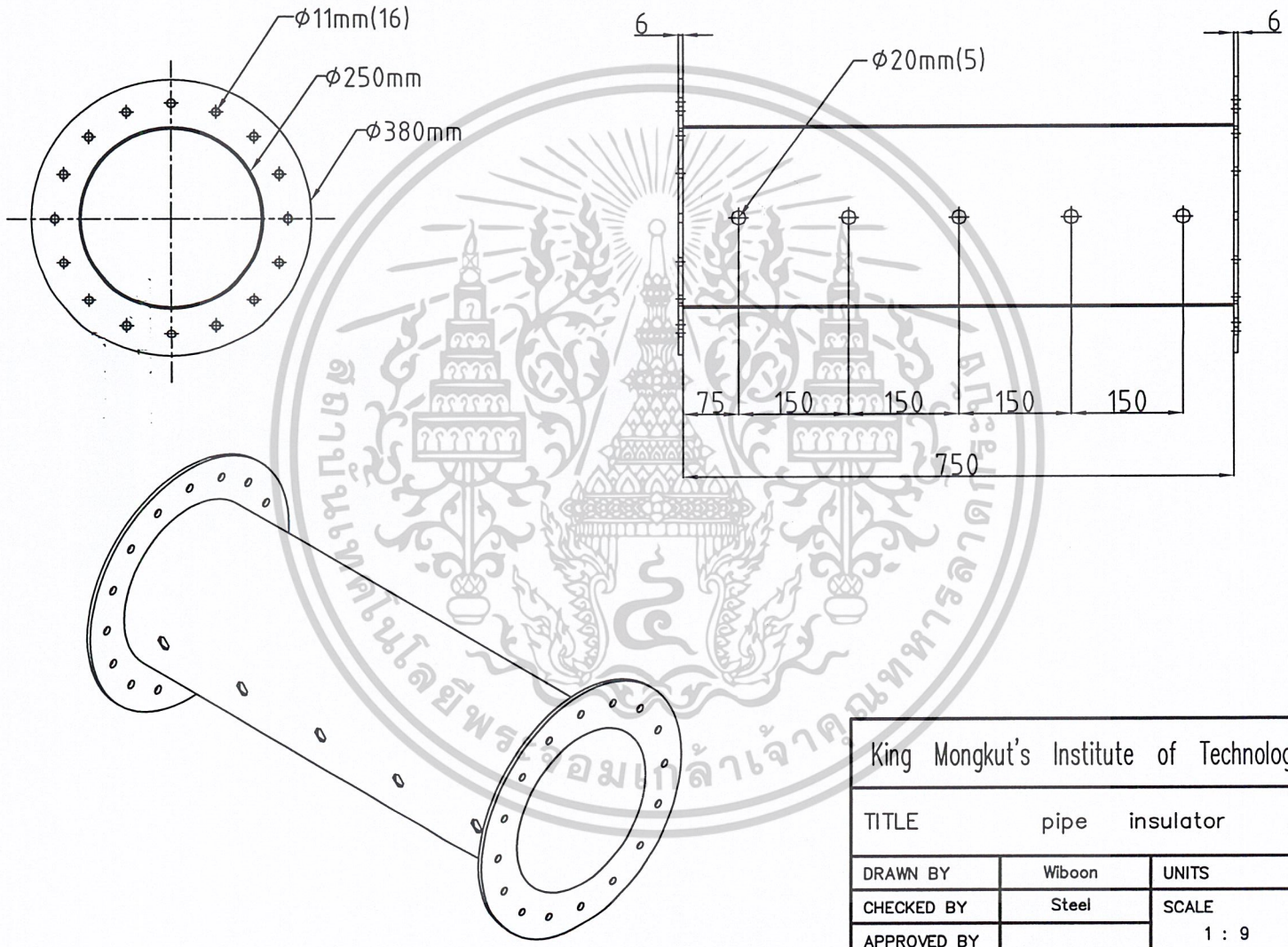
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



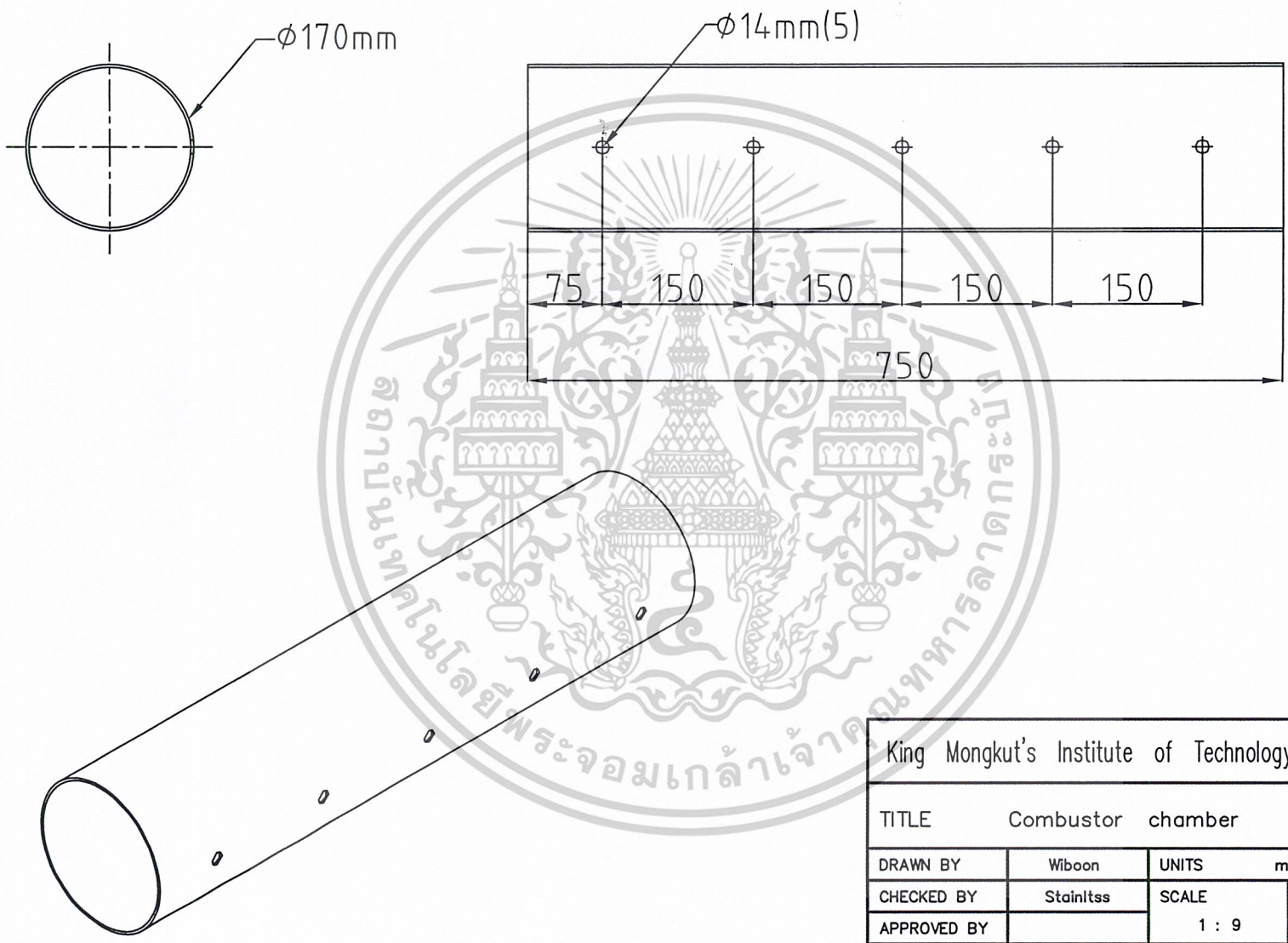
ภาคผนวก ข.

แบบเตาเผาวอร์เทค

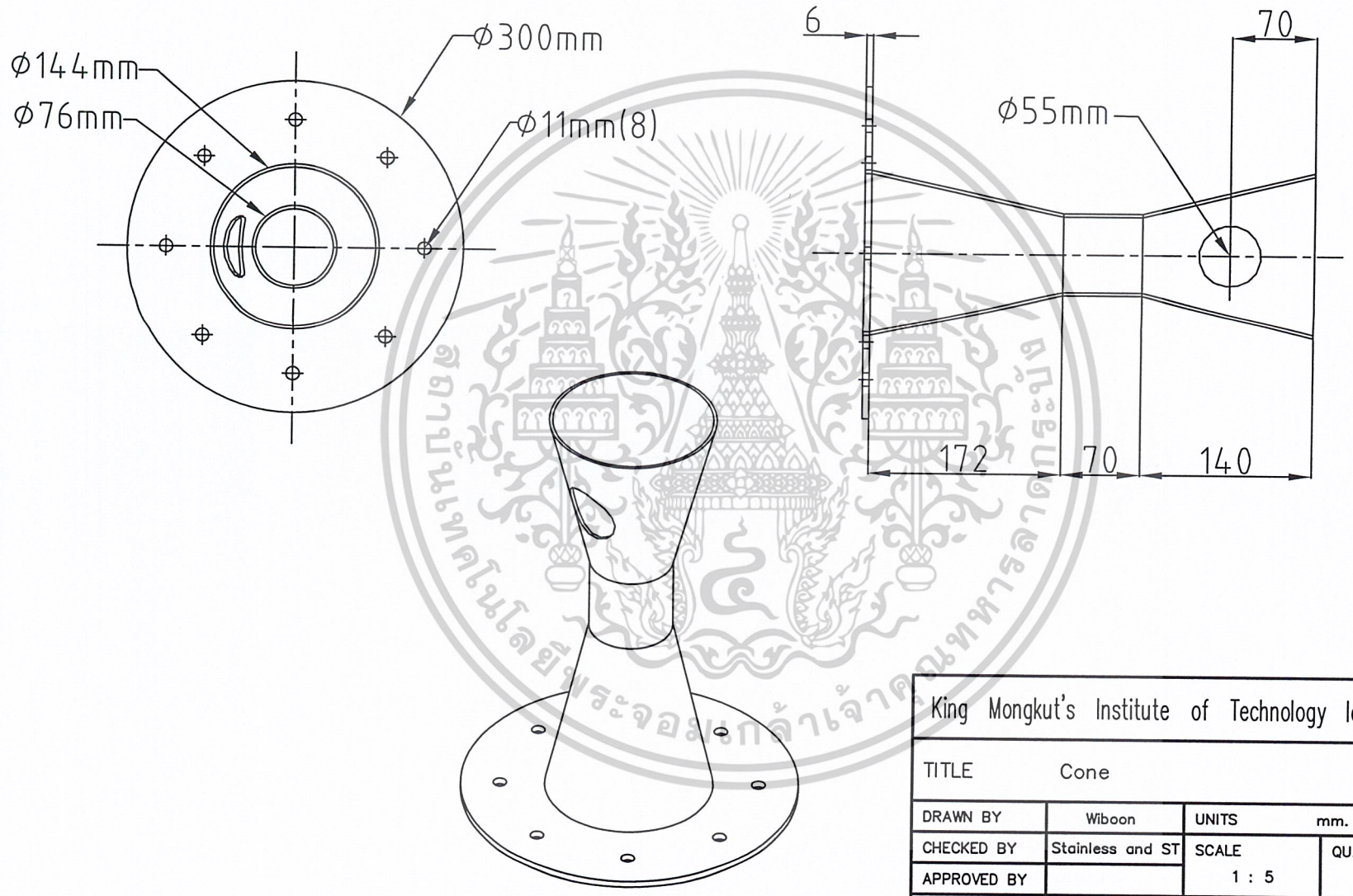
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



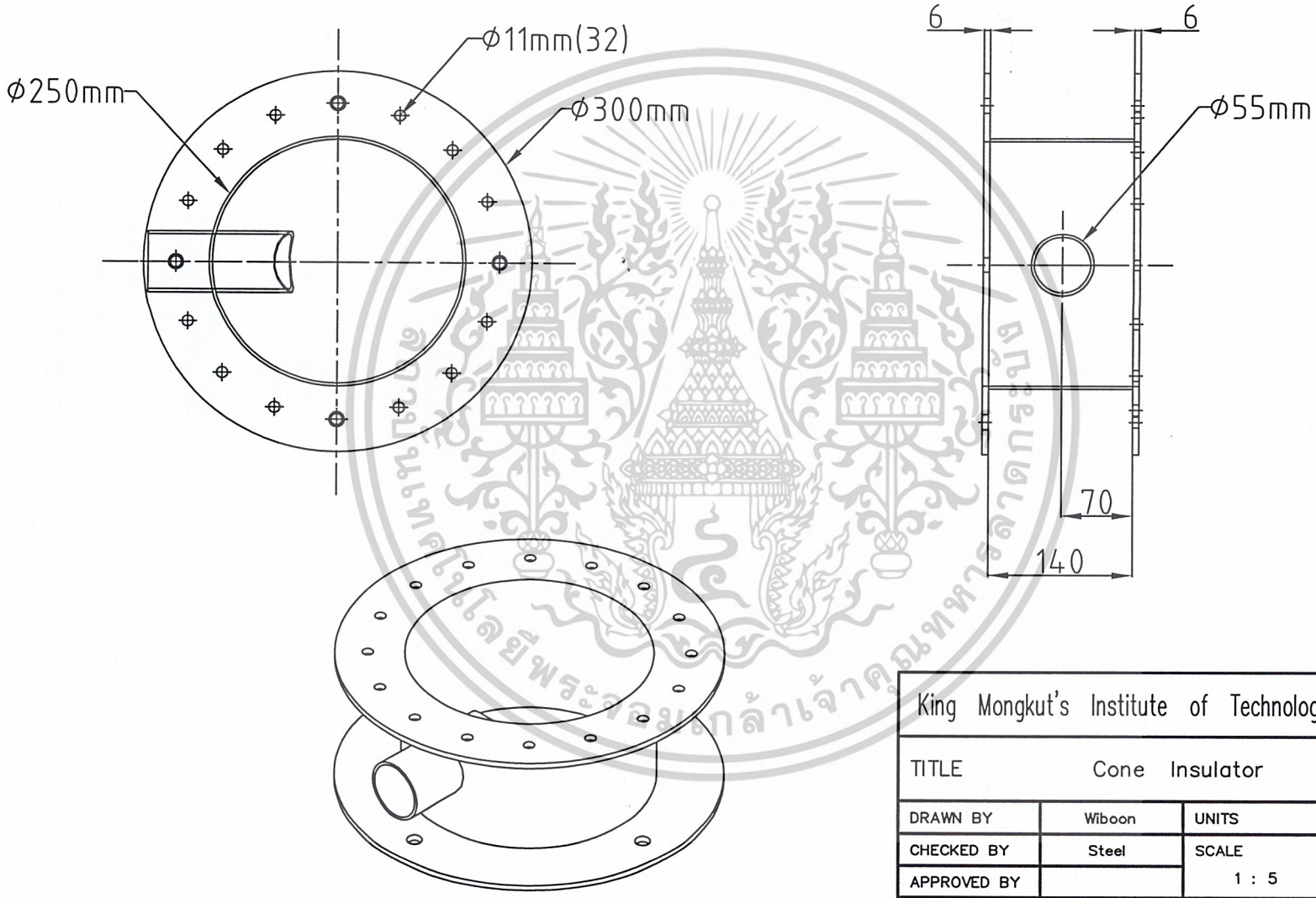
King Mongkut's Institute of Technology ladkrabang			
TITLE	pipe insulator		
DRAWN BY	Wiboon	UNITS	mm.
CHECKED BY	Steel	SCALE 1 : 9	QUANTITY 2
APPROVED BY			
DATE	5/05/47	DRAWING NO.	1



King Mongkut's Institute of Technology ladkrabang			
TITLE Combustor chamber			
DRAWN BY	Wiboon	UNITS mm.	
CHECKED BY	Stainltss	SCALE 1 : 9	QUANTITY 2
APPROVED BY			
DATE	5/05/47	DRAWING NO. 2	



King Mongkut's Institute of Technology ladkrabang			
TITLE Cone			
DRAWN BY	Wiboon	UNITS mm.	
CHECKED BY	Stainless and ST	SCALE 1 : 5	QUANTITY 1
APPROVED BY			
DATE	5/05/47	DRAWING NO. 3	



King Mongkut's Institute of Technology ladkrabang			
TITLE	Cone Insulator		
DRAWN BY	Wiboon	UNITS	mm.
CHECKED BY	Steel	SCALE	PROJECTION
APPROVED BY		1 : 5	1
DATE	5/05/47	DRAWING NO.	4



ภาคผนวก ค.
ตารางบันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลอุณหภูมิ

การทดลองครั้งที่ 1

อัตราส่วนสมมูล: 14 Lps Primary Air : 60 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.1 kg/min Secondary Air: 40 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	761	776	767	768	
	3.5	805	817	817	813	
	6.5	726	734	742	734	
	8.5	663	675	681	673	
	ท่อไอเสีย	449	451	453	451	
0.25	1.5	779	805	795	793	
	3.5	803	818	815	812	
	6.5	712	712	712	712	
	8.5	650	647	647	648	
	ท่อไอเสีย	452	452	452	452	
0.50	1.5	785	786	799	790	
	3.5	797	806	815	806	
	6.5	684	688	701	691	
	8.5	618	617	625	620	
	ท่อไอเสีย	454	453	452	453	
0.75	1.5	731	726	730	729	
	3.5	753	761	757	757	
	6.5	618	627	624	623	
	8.5	553	561	557	557	
	ท่อไอเสีย	441	443	442	442	
1.00	1.5	591	590	592	591	
	3.5	616	613	616	615	
	6.5	476	473	476	475	
	8.5	419	416	419	418	
	ท่อไอเสีย	441	440	442	441	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 2

อัตราส่วนสมมูล: 14 Lps Primary Air : 60 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.12 kg/min Secondary Air: 40 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	759	761	835	785	
	3.5	825	812	820	819	
	6.5	741	728	736	735	
	8.5	678	665	733	692	
	ท่อไอเสีย	456	455	457	456	
0.25	1.5	790	780	833	801	
	3.5	825	820	824	823	
	6.5	722	726	724	724	
	8.5	652	660	656	656	
	ท่อไอเสีย	459	462	462	461	
0.50	1.5	792	789	792	791	
	3.5	814	814	814	814	
	6.5	696	694	695	695	
	8.5	621	616	683	640	
	ท่อไอเสีย	460	456	458	458	
0.75	1.5	760	756	755	757	
	3.5	776	772	774	774	
	6.5	643	638	642	641	
	8.5	572	565	570	569	
	ท่อไอเสีย	462	461	463	462	
1.00	1.5	620	619	588	609	
	3.5	643	643	643	643	
	6.5	501	502	503	502	
	8.5	441	438	441	440	
	ท่อไอเสีย	467	470	470	469	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 3

อัตราส่วนสมมูล: 14 Lps Primary Air : 60 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.16 kg/min Secondary Air: 40 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	805	805	805	805	
	3.5	875	874	876	875	
	6.5	797	798	799	798	
	8.5	733	735	734	734	
	ท่อไอเสีย	508	509	510	509	
0.25	1.5	814	811	814	813	
	3.5	859	858	860	859	
	6.5	775	774	776	775	
	8.5	713	712	714	713	
	ท่อไอเสีย	514	515	516	515	
0.50	1.5	792	801	795	796	
	3.5	839	847	843	843	
	6.5	755	762	757	758	
	8.5	688	691	691	690	
	ท่อไอเสีย	514	514	514	514	
0.75	1.5	746	747	781	758	
	3.5	792	796	794	794	
	6.5	702	697	701	700	
	8.5	640	632	636	636	
	ท่อไอเสีย	514	511	514	513	
1.00	1.5	609	608	643	620	
	3.5	664	663	665	664	
	6.5	553	553	553	553	
	8.5	492	492	492	492	
	ท่อไอเสีย	516	517	518	517	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 4

อัตราส่วนสมมูล: 14 Lps Primary Air : 50 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.1 kg/min Secondary Air: 50 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	777	779	781	779	
	3.5	800	803	800	801	
	6.5	730	733	730	731	
	8.5	677	678	676	677	
	ท่อไอเสีย	452	455	455	454	
0.25	1.5	782	784	780	782	
	3.5	801	805	803	803	
	6.5	711	718	713	714	
	8.5	657	659	652	656	
	ท่อไอเสีย	455	460	462	459	
0.50	1.5	770	771	769	770	
	3.5	775	778	781	778	
	6.5	685	689	684	686	
	8.5	622	625	631	626	
	ท่อไอเสีย	454	458	456	456	
0.75	1.5	695	699	697	697	
	3.5	733	735	731	733	
	6.5	615	618	615	616	
	8.5	549	565	566	560	
	ท่อไอเสีย	452	455	458	455	
1.00	1.5	551	555	550	552	
	3.5	594	599	598	597	
	6.5	479	481	480	480	
	8.5	427	429	431	429	
	ท่อไอเสีย	451	452	453	452	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 5

อัตราส่วนสมมูล: 14 Lps Primary Air : 50 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.12 kg/min Secondary Air: 50 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	793	800	798	797	
	3.5	830	830	830	830	
	6.5	738	734	736	736	
	8.5	680	679	681	680	
	ท่อไอเสีย	461	462	463	462	
0.25	1.5	792	804	798	798	
	3.5	818	830	824	824	
	6.5	723	737	730	730	
	8.5	666	676	671	671	
	ท่อไอเสีย	460	466	463	463	
0.50	1.5	778	748	763	763	
	3.5	800	780	790	790	
	6.5	684	669	678	677	
	8.5	617	607	612	612	
	ท่อไอเสีย	456	453	456	455	
0.75	1.5	745	747	746	746	
	3.5	781	768	776	775	
	6.5	643	630	635	636	
	8.5	578	567	571	572	
	ท่อไอเสีย	462	457	458	459	
1.00	1.5	601	602	603	602	
	3.5	641	640	642	641	
	6.5	491	490	492	491	
	8.5	437	435	436	436	
	ท่อไอเสีย	465	464	466	465	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 6

อัตราส่วนสมมูล: 14 Lps Primary Air : 50 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.16 kg/min Secondary Air: 50 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	799	804	803	802	
	3.5	857	856	858	857	
	6.5	787	790	790	789	
	8.5	737	741	739	739	
	ท่อไอเสีย	518	532	540	530	
0.25	1.5	835	823	829	829	
	3.5	871	880	877	876	
	6.5	778	804	791	791	
	8.5	716	739	729	728	
	ท่อไอเสีย	510	518	514	514	
0.50	1.5	817	820	820	819	
	3.5	867	871	869	869	
	6.5	789	782	787	786	
	8.5	718	711	716	715	
	ท่อไอเสีย	524	529	528	527	
0.75	1.5	760	761	762	761	
	3.5	811	823	817	817	
	6.5	709	719	714	714	
	8.5	646	656	651	651	
	ท่อไอเสีย	523	518	522	521	
1.00	1.5	624	617	622	621	
	3.5	687	681	684	684	
	6.5	578	571	576	575	
	8.5	517	511	514	514	
	ท่อไอเสีย	525	526	527	526	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 7

อัตราส่วนสมมูล: 14 Lps Primary Air : 40 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.1 kg/min Secondary Air: 60 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	713	718	717	716	
	3.5	722	713	719	718	
	6.5	634	628	631	631	
	8.5	582	577	581	580	
	ท่อไอเสีย	379	381	380	380	
0.25	1.5	701	706	705	704	
	3.5	719	714	718	717	
	6.5	624	614	619	619	
	8.5	568	558	563	563	
	ท่อไอเสีย	391	397	394	394	
0.50	1.5	672	669	672	671	
	3.5	695	688	693	692	
	6.5	593	584	590	589	
	8.5	535	528	533	532	
	ท่อไอเสีย	399	402	402	401	
0.75	1.5	669	667	668	668	
	3.5	677	671	674	674	
	6.5	547	528	539	538	
	8.5	485	472	480	479	
	ท่อไอเสีย	400	398	399	399	
1.00	1.5	536	541	540	539	
	3.5	531	525	528	528	
	6.5	387	375	381	381	
	8.5	347	335	341	341	
	ท่อไอเสีย	398	398	398	398	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 8

อัตราส่วนสมมูล: 14 Lps Primary Air : 40 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.12 kg/min Secondary Air: 60 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	725	731	728	728	
	3.5	758	754	756	756	
	6.5	655	655	655	655	
	8.5	595	596	597	596	
	ท่อไอเสีย	405	404	406	405	
0.25	1.5	767	786	778	777	
	3.5	769	775	772	772	
	6.5	654	657	657	656	
	8.5	596	599	599	598	
	ท่อไอเสีย	424	425	426	425	
0.50	1.5	750	773	763	762	
	3.5	762	750	756	756	
	6.5	631	621	626	626	
	8.5	570	565	566	567	
	ท่อไอเสีย	426	427	428	427	
0.75	1.5	725	732	730	729	
	3.5	725	731	728	728	
	6.5	570	587	580	579	
	8.5	510	525	519	518	
	ท่อไอเสีย	434	431	434	433	
1.00	1.5	576	580	578	578	
	3.5	582	583	584	583	
	6.5	434	430	432	432	
	8.5	384	379	383	382	
	ท่อไอเสีย	423	417	420	420	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 9

อัตราส่วนสมมูล: 14 Lps Primary Air : 40 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.16 kg/min Secondary Air: 60 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	794	809	803	802	
	3.5	844	848	846	846	
	6.5	751	755	753	753	
	8.5	689	693	691	691	
	ท่อไอเสีย	457	467	462	462	
0.25	1.5	785	798	793	792	
	3.5	829	849	833	837	
	6.5	746	748	747	747	
	8.5	684	682	683	683	
	ท่อไอเสีย	471	475	473	473	
0.50	1.5	803	798	802	801	
	3.5	855	838	848	847	
	6.5	734	719	728	727	
	8.5	661	656	657	658	
	ท่อไอเสีย	488	488	488	488	
0.75	1.5	763	761	762	762	
	3.5	800	795	799	798	
	6.5	667	664	667	666	
	8.5	601	600	602	601	
	ท่อไอเสีย	493	492	494	493	
1.00	1.5	623	618	622	621	
	3.5	667	664	667	666	
	6.5	532	525	530	529	
	8.5	472	464	468	468	
	ท่อไอเสีย	501	501	501	501	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 10

อัตราส่วนสมมูล: 16 Lps Primary Air : 60 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.1 kg/min Secondary Air: 40 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	736	719	711	722	
	3.5	795	774	738	769	
	6.5	718	679	727	708	
	8.5	664	649	658	657	
	ท่อไอเสีย	460	457	460	459	
0.25	1.5	769	771	686	742	
	3.5	809	806	761	792	
	6.5	716	709	714	713	
	8.5	658	650	654	654	
	ท่อไอเสีย	458	456	460	458	
0.50	1.5	773	770	656	733	
	3.5	799	794	744	779	
	6.5	690	684	687	687	
	8.5	628	620	624	624	
	ท่อไอเสีย	454	450	452	452	
0.75	1.5	723	726	297	582	
	3.5	742	752	738	744	
	6.5	613	623	603	613	
	8.5	550	561	542	551	
	ท่อไอเสีย	453	458	445	452	
1.00	1.5	585	584	484	551	
	3.5	601	601	601	601	
	6.5	466	467	468	467	
	8.5	414	413	415	414	
	ท่อไอเสีย	444	445	446	445	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 11

อัตราส่วนสมมูล: 16 Lps Primary Air : 60 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.12 kg/min Secondary Air: 40 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	788	791	605	728	
	3.5	830	823	702	785	
	6.5	764	748	714	742	
	8.5	711	697	689	699	
	ท่อไอเสีย	484	484	484	484	
0.25	1.5	798	782	730	770	
	3.5	820	817	787	808	
	6.5	732	727	731	730	
	8.5	672	665	670	669	
	ท่อไอเสีย	479	470	476	475	
0.50	1.5	725	747	736	736	
	3.5	778	780	818	792	
	6.5	725	721	723	723	
	8.5	678	674	646	666	
	ท่อไอเสีย	494	494	494	494	
0.75	1.5	721	723	725	723	
	3.5	738	735	738	737	
	6.5	629	621	625	625	
	8.5	569	564	568	567	
	ท่อไอเสีย	488	482	485	485	
1.00	1.5	551	551	1031	711	
	3.5	628	624	626	626	
	6.5	501	493	497	497	
	8.5	448	442	445	445	
	ท่อไอเสีย	477	477	477	477	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 12

อัตราส่วนสมมูล: 16 Lps Primary Air : 60 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.16 kg/min Secondary Air: 40 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	728	716	926	790	
	3.5	763	774	944	827	
	6.5	729	754	785	756	
	8.5	689	708	715	704	
	ท่อไอเสีย	517	528	524	523	
0.25	1.5	737	746	887	790	
	3.5	786	798	873	819	
	6.5	745	746	747	746	
	8.5	691	688	691	690	
	ท่อไอเสีย	534	508	521	521	
0.50	1.5	726	739	851	772	
	3.5	795	789	807	797	
	6.5	736	733	736	735	
	8.5	666	665	970	767	
	ท่อไอเสีย	537	539	538	538	
0.75	1.5	725	720	730	725	
	3.5	800	793	798	797	
	6.5	688	684	686	686	
	8.5	622	612	617	617	
	ท่อไอเสีย	541	540	542	541	
1.00	1.5	577	575	603	585	
	3.5	645	645	645	645	
	6.5	533	534	535	534	
	8.5	476	476	476	476	
	ท่อไอเสีย	549	551	550	550	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 13

อัตราส่วนสมมูล: 16 Lps Primary Air : 50 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.1 kg/min Secondary Air: 50 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	688	672	680	680	
	3.5	732	725	730	729	
	6.5	670	663	668	667	
	8.5	627	620	625	624	
	ท่อไอเสีย	434	435	436	435	
0.25	1.5	646	656	651	651	
	3.5	679	680	681	680	
	6.5	617	616	618	617	
	8.5	580	580	580	580	
	ท่อไอเสีย	429	426	429	428	
0.50	1.5	700	706	703	703	
	3.5	703	709	706	706	
	6.5	619	621	620	620	
	8.5	576	574	575	575	
	ท่อไอเสีย	430	432	431	431	
0.75	1.5	672	674	679	675	
	3.5	680	680	683	681	
	6.5	571	570	572	571	
	8.5	520	519	518	519	
	ท่อไอเสีย	433	434	435	434	
1.00	1.5	566	575	569	570	
	3.5	580	588	581	583	
	6.5	451	466	454	457	
	8.5	404	420	409	411	
	ท่อไอเสีย	440	438	442	440	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 14

อัตราส่วนสมมูล: 16 Lps Primary Air : 50 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.12 kg/min Secondary Air: 50 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	672	687	693	684	
	3.5	737	742	753	744	
	6.5	662	659	680	667	
	8.5	617	624	637	626	
	ท่อไอเสีย	440	440	440	440	
0.25	1.5	800	804	664	756	
	3.5	819	818	712	783	
	6.5	735	729	645	703	
	8.5	676	670	601	649	
	ท่อไอเสีย	456	462	462	460	
0.50	1.5	713	706	678	699	
	3.5	713	704	704	707	
	6.5	649	635	633	639	
	8.5	607	590	585	594	
	ท่อไอเสีย	459	461	460	460	
0.75	1.5	603	601	599	601	
	3.5	669	666	669	668	
	6.5	574	571	565	570	
	8.5	525	526	524	525	
	ท่อไอเสีย	455	453	451	453	
1.00	1.5	519	520	521	520	
	3.5	570	573	570	571	
	6.5	459	461	457	459	
	8.5	420	425	421	422	
	ท่อไอเสีย	451	456	452	453	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 15

อัตราส่วนสมมูล: 16 Lps Primary Air : 50 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.16 kg/min Secondary Air: 50 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	590	589	591	590	
	3.5	742	722	732	732	
	6.5	723	704	715	714	
	8.5	692	685	690	689	
	ท่อไอเสีย	523	507	515	515	
0.25	1.5	660	646	653	653	
	3.5	762	752	757	757	
	6.5	731	708	721	720	
	8.5	698	671	686	685	
	ท่อไอเสีย	520	517	520	519	
0.50	1.5	646	655	652	651	
	3.5	727	739	733	733	
	6.5	652	680	666	666	
	8.5	606	640	623	623	
	ท่อไอเสีย	500	494	497	497	
0.75	1.5	674	664	669	669	
	3.5	733	719	726	726	
	6.5	636	634	635	635	
	8.5	586	590	588	588	
	ท่อไอเสีย	503	506	506	505	
1.00	1.5	507	480	495	494	
	3.5	566	547	558	557	
	6.5	465	455	460	460	
	8.5	434	423	430	429	
	ท่อไอเสีย	499	479	489	489	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 16

อัตราส่วนสมมูล: 16 Lps Primary Air : 40 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.1 kg/min Secondary Air: 60 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	738	749	754	747	
	3.5	760	769	772	767	
	6.5	685	690	695	690	
	8.5	636	639	642	639	
	ท่อไอเสีย	437	433	432	434	
0.25	1.5	736	734	735	735	
	3.5	749	742	747	746	
	6.5	668	655	663	662	
	8.5	616	605	612	611	
	ท่อไอเสีย	427	426	428	427	
0.50	1.5	632	638	674	648	
	3.5	683	675	688	682	
	6.5	605	603	607	605	
	8.5	562	562	565	563	
	ท่อไอเสีย	430	431	432	431	
0.75	1.5	603	671	625	633	
	3.5	632	672	676	660	
	6.5	535	547	559	547	
	8.5	500	499	510	503	
	ท่อไอเสีย	424	434	426	428	
1.00	1.5	536	531	535	534	
	3.5	545	542	545	544	
	6.5	424	420	422	422	
	8.5	380	375	379	378	
	ท่อไอเสีย	428	432	430	430	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 17

อัตราส่วนสมมูล: 16 Lps Primary Air : 40 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.12 kg/min Secondary Air: 60 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	770	771	772	771	
	3.5	773	769	771	771	
	6.5	676	670	769	705	
	8.5	623	618	694	645	
	ท่อไอเสีย	435	435	435	435	
0.25	1.5	778	769	772	773	
	3.5	778	768	773	773	
	6.5	675	667	671	671	
	8.5	616	610	613	613	
	ท่อไอเสีย	437	438	439	438	
0.50	1.5	722	718	720	720	
	3.5	734	727	729	730	
	6.5	626	619	618	621	
	8.5	572	563	563	566	
	ท่อไอเสีย	437	433	432	434	
0.75	1.5	683	684	679	682	
	3.5	693	695	691	693	
	6.5	563	561	556	560	
	8.5	514	512	507	511	
	ท่อไอเสีย	434	435	436	435	
1.00	1.5	576	575	577	576	
	3.5	569	568	570	569	
	6.5	433	432	434	433	
	8.5	388	387	389	388	
	ท่อไอเสีย	441	441	441	441	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 18

อัตราส่วนสมมูล: 16 Lps Primary Air : 40 %

อัตราการป้อนแกลบ : 0.16 kg/min Secondary Air: 60 %

ระยะชัก (r/R)	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (x/D)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หมายเหตุ
		3 นาที	6 นาที	9 นาที		
		อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)	อุณหภูมิ(°C)		
0.00	1.5	717	726	900	781	
	3.5	780	779	829	796	
	6.5	709	707	747	721	
	8.5	664	664	700	676	
	ท่อไอเสีย	475	482	492	483	
0.25	1.5	751	795	776	774	
	3.5	817	838	829	828	
	6.5	740	755	749	748	
	8.5	691	701	696	696	
	ท่อไอเสีย	512	515	515	514	
0.50	1.5	797	801	799	799	
	3.5	823	813	818	818	
	6.5	727	717	722	722	
	8.5	672	664	668	668	
	ท่อไอเสีย	525	525	525	525	
0.75	1.5	742	751	748	747	
	3.5	782	790	786	786	
	6.5	675	671	673	673	
	8.5	615	607	611	611	
	ท่อไอเสีย	528	527	529	528	
1.00	1.5	590	588	589	589	
	3.5	640	639	641	640	
	6.5	517	516	518	517	
	8.5	459	459	459	459	
	ท่อไอเสีย	539	540	541	540	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้