



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การศึกษาวิธีการลดก๊าซมลพิษและหลีกเลี่ยงปัญหาการจับตัวกันของวัสดุ
เบดที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไชเบด

Study on Methods for Minimizing Gaseous Pollutants and Avoiding
Bed Agglomeration Problem during Biomass Combustion
in a Fluidized Bed Combustor

โดย พิเชฐ นิลดวงดี และคณะ

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

สิงหาคม 2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การศึกษาวิธีการลดก๊าซมลพิษและหลีกเลี่ยงปัญหาการจับตัวกันของวัสดุ
เบดที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไชเบด

Study on Methods for Minimizing Gaseous Pollutants and Avoiding
Bed Agglomeration Problem during Biomass Combustion in a
Fluidized Bed Combustor

คณะผู้วิจัย

พิเชฐ นิลดวงดี

ปรีชญา มุขดา

ช่วงชัย ชูปวา

สังกัด

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รายงานการวิจัยนี้เสนอ การศึกษาวิธีการลดก๊าซมลพิษและหลีกเลี่ยงปัญหาการจับตัวกันของวัสดุเบตที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบต งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 4 กรณีศึกษาคือ 1) การเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบตด้วยวิธีปกติ 2) การเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงผสมระหว่าง แกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้น 3) การเผาไหม้ร่วมแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นด้วยการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ 4) การเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบตที่ใช้อลูมินาเป็นวัสดุเบต โดยกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 3 เป็นศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ ในการทดลองนี้ใช้แกลบอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงหลักและใช้แกลบขึ้นเป็นเชื้อเพลิงรอง ส่วนกรณีศึกษาที่ 4 เป็นทดลองเพื่อป้องกันการจับตัวกันของวัสดุเบตระหว่างการเผากะลาปาล์ม ในทุกการทดลองมีการป้อนเชื้อเพลิงให้มีปริมาณความร้อนประมาณ 200 kW_{th} เพื่อศึกษาผลของอากาศส่วนเกินต่อคุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะการทำงานของเตาเผา ได้มีการปรับใช้อากาศส่วนเกิน 20% 40% 60% และ 80% ในการวิจัยนี้ ใช้สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงรองตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.4

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการเผาไหม้ร่วมช่วยสร้างแก๊ส CO และ C_xH_y ในเตาเผามากขึ้นกว่าปกติ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการลด NO ภายในเตาเผาจึงส่งผลให้การปล่อย NO จากเตาเผาลดลง อากาศส่วนเกินและอัตราพลังงานของเชื้อเพลิงรองมีผลต่อการปลดปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตา วิธีการเผาไหม้ร่วมทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการปล่อย CO และ C_xH_y มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม CO และ C_xH_y สามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการเพิ่มอากาศส่วนเกินหรือการลดอัตราส่วนเชื้อเพลิงรอง อากาศส่วนเกินประมาณ 40–50% และอัตราส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองที่ 0.15 เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ ที่สภาวะการทำงานนี้ การเผาไหม้ร่วมแบบผสมเชื้อเพลิงสามารถลดการปล่อย NO_x ได้ประมาณ 15% มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ประมาณ 99% การเผาไหม้ร่วมด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นสามารถลดการปล่อย NO_x ได้ 43% และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ประมาณ 99% และสามารถควบคุมการปล่อย CO และ C_xH_y ให้ต่ำกว่ามาตรฐานการปล่อยมลพิษของประเทศไทยได้

การใช้ทรายอลูมินาในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบต สามารถทำการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบตเป็นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า 98% จากการทดสอบ 30 ชั่วโมง ไม่พบสัญญาณบ่งชี้ถึงการเกิดการเกาะตัวเป็นก้อนเชื้อวัสดุเบต แต่อย่างไรก็ตามวัสดุเบตมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติกายภาพและเคมี ซึ่งมีผลต่อการใช้ต่อเนื่องในระยะยาว

คำสำคัญ: การเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบต, มลพิษ, ไนโตรเจนออกไซด์, การจับตัวกันของวัสดุเบต

Abstract

This Project Report presents a study on methods for minimizing gaseous pollutants and avoiding bed agglomeration problem during biomass combustion in a fluidized bed combustor. In this study Four groups of experiments, for (i) individual combustion of pelletized rice husk, (ii) co-combustion of the pre-mixed pelletized rice husk and moisturized rice husk, (iii) co-combustion of pelletized rice husk and moisturized rice husk using fuel, and (iv) combustion of palm kernel in a fluidized bed using alumina sand for preventing bed agglomeration, were performed. All the tests are conducted at the identical (total) heat input to the combustor, $200 \text{ kW}_{\text{th}}$. To study the effects of excess air on the combustion and emission characteristics, each Case Study includes test groups for four percentages of excess air (EA): 20%, 40%, 60%, and 80%. In this work, the tests in each case study are performed at EF_2 ranged from 0.1 to 0.4.

The experimental results revealed that the proposed combustion methods resulted in significant generation of CO and C_xH_y in the reactor, which was favorable for NO reduction. EA and EF_2 exhibited a substantial effect on combustion and emission performance of the combustor. The CO and C_xH_y emissions decreased with an increase of EA and/decrease EF_2 , whereas NO emission showed opposite effects of excess air and energy fraction. EA of about 40–50% and EF_2 of 0.15 seemed to be suitable for co-firing pelletized rice husk and moisturized rice husk in a conical FBC. At these operating conditions, 15% NO emission reduction was achievable when co-firing premixed the selected biomasses, while fuel staging can reduce 43% NO emission. The combustor ensured 99% combustion efficiency. The CO and C_xH_y emissions can be controlled at the level below the Thai emission standard.

The fluidized bed combustor using alumina sand as the bed material ensured an effective burning of palm kernel shell with 99% combustion efficiency and acceptable level of gaseous emissions. No evidence of bed agglomeration after 30-h operation of the combustor. However, a time-domain changes in physical and composition pointed at the gradual diminishing of bed capability to withstand the agglomeration.

Key words: fluidized-bed combustion, emissions, nitrogen oxides, bed agglomeration

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ตามมติคณะรัฐมนตรี

ขอขอบคุณ Professor Dr. Vladimir I. Kuprianov จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบการผลิต สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือทดสอบ และสถานที่สำหรับการดำเนินงานวิจัย และ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา ศิริสมบูรณ์ และ อ. ดร. ประเมศร์ อารมณ์ดี จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินการวิจัยตลอดมา

พิเชฐ นิลดวงดี และคณะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การเผาไหม้	4
2.2 มลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ชีวมวล	5
2.3 กลไกการก่อตัวและการสลายตัวของมลพิษระหว่างการเผาไหม้	5
2.3.1 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide: CO)	5
2.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of Nitrogen: NO _x)	6
2.4 ฟลูอิดไชต์เบด (Fluidization)	7
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของฟลูอิดไชชัน	7
2.4.2 การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart	8
2.5 การเผาไหม้แบบฟลูอิดไชต์เบด (fluidized bed combustion)	9
2.6 การลดไนตริกออกไซด์โดยเทคนิคการเผาไหม้เป็นขั้น	14
2.7 ปัญหาการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุเบด	18
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และกระบวนการวิจัย	20
3.1 ชุดการทดสอบ	20
3.2 เชื้อเพลิง	21
3.3 วัสดุเบด	24
3.4 วิธีดำเนินการ	25
3.4.1 การวัดผลการทดลอง	26
3.4.2 การคำนวณอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลัก	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้	27
3.4.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้	28
3.4.5 การหาจุดเหมาะสมการทำงานของเตาเผาไหม้	28
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย	30
4.1 การเผาไหม้แกลบอัดเม็ดด้วยวิธีการเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบปกติ	30
4.1.1 สมรรถนะการทำงานของเตาเผาฟลูอิดซ์เบด	30
4.2 การเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้น	31
4.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนภายในเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม	31
4.2.2 ความเข้มข้นของ CO CxHy และ NO ภายในเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม	32
4.2.3 มลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ร่วม	34
4.2.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม	34
4.2.5 จุดเหมาะสมการทำงานของเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม	35
4.3 การเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นโดยใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น	36
4.3.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนภายในเตาเผาเมื่อใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น	36
4.3.2 ความเข้มข้นของ CO CxHy และ NO ในเตาเผาไหม้ที่ใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น	37
4.3.3 มลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ที่ใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น	39
4.3.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเมื่อใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น	41
4.3.5 จุดเหมาะสมการทำงานของเตาเผาเมื่อใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น	41
4.4 การเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบทรงกรวยที่ใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบด	42
4.4.1 การจับตัวกันของวัสดุเบดเมื่อทำการเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด	42
4.4.2 การเผาไหม้โดยใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบด	43
4.4.3 สมรรถนะการทำงานของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบด	45
4.4.4 ลักษณะของวัสดุเบดหลังจากการเผาไหม้ในระยะยาว	46
4.4.5 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวัสดุเบดและถ่านลอยหลังการเผาไหม้กะลาปาล์ม	49
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลการวิจัย	50
5.1.1 การลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล	50
5.1.2 การป้องกันการจับตัวกันของวัสดุเบตระหว่างกาเผาไหม้ชีวมวลที่มี ส่วนประกอบของโพแทสเซียมในถ้ำสูง	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก 56	
ภาคผนวก (ก) การเผยแพร่งานวิจัย	57
ภาคผนวก (ข) ประวัติคณะวิจัย	70

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	เส้นทางการก่อตัวและสลายตัวของไนโตรเจนออกไซด์
2.2	พฤติกรรมการณ์เกิดพลูโอไดเซชั่น
2.3	การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart
2.4	รูปแบบการเผาไหม้ระหว่างป้อนอากาศหุติยภูมิและการป้อนเชื้อเพลิงหุติยภูมิ
2.5	ส่วนประกอบ ของเตา Understoker ที่ใช้ในการทดลองการเผาไหม้เป็นชั้น
2.6	ผลของอัตราส่วน stoichiometric ต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากวิธีการเผาไหม้แบบจ่ายอากาศเป็นชั้นและจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น
2.7	การจับตัวกันเป็นก้อนของวัสดุเบตที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้เมล็ดกาแพในเตาเผาพลูโอไดซ์เบตที่ใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบต
3.1	เตาเผาพลูโอไดซ์เบตแบบทรงกรวยที่ใช้ในการทดลอง
3.2	ลักษณะทั่วไปของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ (ก) แกลบอัดเม็ด (ข) แกลบชั้น (ค) กะลาปาล์ม
3.3	วัสดุเบตที่ใช้ในการเผาไหม้ (ก) ทรายซิลิกา และ (ข) ทรายอะลูมินา
3.4	เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย Testo-350 (Testo Germany)
4.1	การกระจายตัวของ (ก) อุณหภูมิ และ (ข) ออกซิเจนวัดตามระดับความสูงที่ตำแหน่งแกนกลางเตาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบชั้นที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) ในเชื้อเพลิงผสมต่างกันโดยใช้อากาศส่วนเกินประมาณ 40%
4.2	การกระจายตัวของ (ก) CO (ข) C_xH_y และ (ค) NO วัดตามระดับความสูงที่ตำแหน่งแกนกลางเตาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบชั้นที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) ในเชื้อเพลิงต่างกันโดยใช้อากาศส่วนเกินประมาณ 40%
4.3	การปล่อยมลพิษ (ก) คาร์บอนมอนอกไซด์ (ข) ไฮโดรคาร์บอน (ค) ไนตริกออกไซด์จากเตาเผาพลูโอไดซ์เบตทรงกรวยที่ทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบชั้นที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) ในเชื้อเพลิงผสมและอากาศส่วนเกินต่างกัน
4.4	ผลของอากาศส่วนเกินและสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองต่อราคาการปล่อยมลพิษของการเผาไหม้แกลบอัดเม็ดและแกลบชั้นในเตาเผาพลูโอไดซ์เบตแบบทรงกรวย
4.5	การกระจายตัวของ (ก) อุณหภูมิ และ (ข) ออกซิเจนวัดตามระดับความสูงที่ตำแหน่งแกนกลางของเตาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบชั้นด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) ในเชื้อเพลิงผสมต่างกันโดยใช้อากาศส่วนเกินประมาณ 40%

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 การกระจายตัวของ (ก) CO (ข) C_xH_y และ (ค) NO วัดตามระดับความสูงที่ตำแหน่งแกนกลางของเตาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น ที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) ในเชื้อเพลิงผสมต่างกัน โดยใช้อากาศส่วนเกินประมาณ 40%	38
4.7 การปล่อยมลพิษ (ก) คาร์บอนมอนอกไซด์ (ข) ไฮโดรคาร์บอน (ค) ไนตริกออกไซด์ จากเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดทรงกรวยที่ทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) และอากาศส่วนเกินต่างกัน	39
4.8 ผลของอากาศส่วนเกินและสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองต่อราคาการปล่อยมลพิษของการเผาไหม้แกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นด้วยวิธีการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบทรงกรวย	42
4.9 ตัวอย่างเบด (ทราย) ที่จับตัวกันระหว่างการเผาไหม้กะลาปาล์ม	43
4.10 (ก) การกระจายตัวของอุณหภูมิและ (ข) ความเข้มข้นของออกซิเจนวัดในแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไชน์เบด	43
4.11 (ก) ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ (ข) ไฮโดรคาร์บอน และ (ค) ไนตริกออกไซด์ วัดในแนวแกน (กึ่งกลางหน้าตัด) ของเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดที่ทำการเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ที่อากาศส่วนเกิน 40% และ 80%	44
4.12 มลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบทรงกรวยที่อากาศส่วนเกินต่างกัน	45
4.13 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเมื่อเผาไหม้กะลาปาล์มที่อากาศส่วนเกินต่างกัน	46
4.14 (ก) อุณหภูมิเบดและความดันตกคร่อมเบด (ข) และการปล่อยมลพิษของเตาเผาตลอดระยะเวลาการทำงาน 30 ชั่วโมง	47
4.15 ตัวอย่างทรายอลูมินา (ก) หลังการทดสอบ 10 ชั่วโมง (ข) หลังจากการทดสอบ 20 ชั่วโมง (ค) หลังจากการทดสอบ 30 ชั่วโมง	47
4.16 โครงสร้างสัณฐานของทรายอลูมินาก่อนทำการเผาไหม้	48
4.17 โครงสร้างสัณฐานบริเวณพื้นผิวของอลูมินาที่หลังการทดสอบที่ 10 ชั่วโมง 20 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย (ก) 150 เท่า และ (ข) 3700 เท่า	48
4.17 องค์ประกอบทางเคมีของ (ก) ทรายอลูมินาก่อนการเผาไหม้และช่วงเวลาต่างๆ (ข) ถ้าวาลอยจากการเผาไหม้ที่เวลาต่างกัน	49

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	มลภาวะที่เกิดจากการกระบวนการเผาไหม้ของชีวมวล	5
2.2	ผลวิจัยจากการวิจัยเผาไหม้ของ ฐานันท์ เมธิยานนท์และคณะ	13
3.1	คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง	23
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเบด	24
3.3	กรณีศึกษาและตัวแปรที่ศึกษาและควบคุมและช่วงของการทดสอบ	25
4.1	สมรรถนะการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไบด์เมื่อกลบอัดเม็ดด้วยเผาไหม้แบบปกติ	30
4.2	ค่าความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาฟลูอิดไบด์ทรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างกลบอัดเม็ดและกลบขึ้นที่อากาศส่วนเกินต่างกัน	35
4.3	ค่าความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาฟลูอิดไบด์แบบทรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างกลบอัดเม็ดและกลบขึ้นด้วยวิธีการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อากาศส่วนเกินต่างกัน	40

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิง	% wt
C _c	คาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ที่อยู่ในเถ้าลอย	% wt
EA	อากาศส่วนเกิน	%
EF ₂	สัดส่วนพลังงานจากเชื้อเพลิงรอง	
FC	คาร์บอนคงตัว	wt %
LHV _{f1}	ค่าความร้อนต่ำสุดของเชื้อเพลิงหลัก	kJ/kg
LHV _{f2}	ค่าความร้อนต่ำสุดของเชื้อเพลิงรอง	kJ/kg
M _d	มวลของน้ำรวมกับเชื้อเพลิง	%db
MF ₂	สัดส่วนของเชื้อเพลิง	
$\dot{m}_{f1}$	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงหลัก	kg/h
$\dot{m}_{f2}$	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงรอง	kg/h
M _w	มวลของน้ำ	%wb
NO _x	ความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์	ppm
q _{uc,ic}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้	LHV%
q _{ic,cf}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์	LHV%
V ⁰	ปริมาณอากาศตามทฤษฎี ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม	Nm ³ /kg
V _{dg}	ปริมาณไอเสียแห้ง	Nm ³ /kg
VM	ปริมาณสารระเหยได้	wt %
W	ค่าความชื้น	wt %
α	อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน	
η	ประสิทธิภาพการเผาไหม้	%LHV

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศมีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศในแต่ละปีจำนวนมาก จากข้อมูลในปี 2554 ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานถึง 60% ของปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมดในกลุ่มอุตสาหกรรมภายในประเทศ ส่งผลทำให้ทุกภาคส่วนของประเทศได้รับผลกระทบจากความผันผวนของราคาพลังงานโลกเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ รัฐบาลจึงได้หาแนวทางในการแก้ปัญหาวิกฤติพลังงานและราคาพลังงานอย่างยั่งยืน โดยได้กำหนดเป้าหมายให้มีการใช้พลังงานทดแทนจากชีวมวลให้ได้ 3600 MW ภายในปี พ.ศ. 2564 ภายใต้นโยบายที่ชื่อว่า “Renewable and Alternative Energy Development Plan for 25 percent in 10 years หรือ AEDP 2012–2021” (DEDE, 2012).

นโยบายดังกล่าวมีความเป็นไปได้อย่างมากเพราะเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญที่สุดแห่งหนึ่งของโลก ประชากรในประเทศมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม แต่ปีมีการสร้างผลผลิตทางการเกษตรอย่างมากมาตั้งแต่เพื่อการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก ซึ่งในระหว่างกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรก็มีของเสียและวัสดุเหลือ (residues) จากกระบวนการทางการเกษตรเกิดขึ้นปริมาณมาก โดยวัสดุเหล่านี้สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นพลังงานหมุนเวียนในรูปของพลังงานชีวมวลได้ จากการรายงานของกรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตทางการเกษตรสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ถึงประมาณ 33,014 กิโลตันเทียบเท่าน้ำมันดิบต่อปี ดังนั้น การวิจัย พัฒนา และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งเพื่อการเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานของประเทศ อีกทั้งเป็นการลดการปลดปล่อย CO₂ รวมของประเทศอีกทางหนึ่งด้วย

การแปลงพลังงานที่อยู่ในชีวมวลให้เป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ มีวิธีการอยู่หลายวิธี เช่น การใช้กระบวนการเคมีความร้อน (Thermo chemical conversion) กระบวนการชีวเคมี (Biochemical conversion) (McKendry, 2002) แต่วิธีการที่ง่ายที่สุดคือการเผาชีวมวลในเตาเผา วิธีการนี้เรียกว่าเป็นวิธีการเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด เป็นหนึ่งในวิธีการเผาไหม้โดยตรงที่กำลังได้รับการสนใจเพื่อใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อการผลิตความร้อนและผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเทคโนโลยีนี้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หลากหลาย เช่น เชื้อเพลิงเกรดต่ำที่มีค่าความร้อนต่ำ ปริมาณเถ้าและความชื้นสูง นอกจากนี้เตาฟลูอิดไธซ์เบดยังมีรูปร่างและขนาดที่หลากหลาย เตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด (fluidized-bed) จะอาศัยหลักการฟลูอิดไธซ์เซชัน (fluidization) ซึ่งทำให้เกิดการกระจายตัวของความร้อน รวมถึงการผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศเป็นอย่างดี ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดสูงและมีมลพิษเนื่องจากการเผาไหม้ต่ำ (Natarajan et al., 1998; Permchart & Kouprianov, 2004; Werther et al., 2000) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการเผาไหม้ชีวมวลจะถูกพิจารณาว่า

มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นศูนย์ (CO_2 -neutral) ในระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล พบว่ายังมีการปลดปล่อยมลภาวะหลักอื่นๆ เช่น ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) ออกมาระหว่างการเผาไหม้ อัตราการปลดปล่อยมลภาวะเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบของเตา ชนิดหรือคุณสมบัติของเชื้อเพลิง และสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้ (Armesto et al., 2002; Fang et al., 2004) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง NO_x ซึ่งมีความร้ายแรงมากกว่าก๊าซพิษตัวอื่นๆ เพราะเป็นต้นเหตุของฝนกรด สามารถทำลายพืชทั้งทางใบและลดผลผลิต และทำให้เซลล์ของสัตว์เปลี่ยนแปลง สามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง และทำให้ตาระคายเคือง และที่สำคัญ สามารถทำให้เกิดสารมลพิษทางโฟโตเคมี (photochemical pollutant)

แต่จากข้อมูลงานวิจัยพบว่า ในปัจจุบันไม่มีวิธีที่ดีที่สุดในการกำจัด NO_x หลังจากออกจากห้องเผาไหม้ เนื่องจาก NO_x เสถียรมาก จึงนิยมใช้วิธีควบคุมการเผาไหม้ให้เกิด NO_x น้อยที่สุด โดยการควบคุมปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air) ซึ่งสามารถลดการเกิด NO_x ได้ประมาณร้อยละ 20-30 (Permchart & Kouprianov, 2004) หรือใช้วิธีการนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ซ้ำ (Emission Gas Recirculation, EGR) จะช่วยลด NO_x ได้ประมาณร้อยละ 50 (กัญจนา บุญเกียรติ 2544) แต่วิธีการเหล่านี้ทำให้การปลดปล่อย CO และ C_xH_y เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบลดลง

ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคส์เบดคือ **การจับตัวกันของวัสดุเบด (bed agglomeration)** โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด สาเหตุหลักของการจับตัวของวัสดุเบดเกิดจากสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic) จำพวกอัลคาไล (alkali) เช่น โพแทสเซียม (Potassium, K) และ โซเดียม (Sodium, Na) ที่อยู่ในเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยในระหว่างกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคส์เบดนั้น สารประกอบอัลคาไล (โดยเฉพาะอย่างยิ่งโพแทสเซียม) ที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาที่อยู่ในวัสดุเบดทำให้เกิดสารประกอบยูเทคติก (eutectic compound) ที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ (ต่ำกว่าอุณหภูมิทำงานของเตาเผา) เป็นผลทำให้บริเวณผิวนอกของวัสดุเบดเหนียวเนื่องจากการหลอมเหลว และเนื่องจากวัสดุเบดในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไคส์เบดมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้วัสดุเบดที่เหนียวเกิดการชนกันอย่างต่อเนื่องเป็นผลทำให้เกิดการรวมตัวกันมากที่สุด (Werther et al., 2000; Yu et al., 2011) การรวมตัวกันนี้ สามารถอยู่ในรูปแบบของการรวมตัวเป็นเม็ดเล็กๆ (มีการรวมตัวกันของเม็ดทรายไม่มาก) หรือการรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ ซึ่งการจับตัวกันของเบดนี้จะทำให้พฤติกรรมของการเผาไหม้ภายในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้การปลดปล่อยมลพิษจากระบบสูงขึ้น รวมทั้งประสิทธิภาพของการเผาไหม้ที่ลดลง และหากกระบวนการรวมตัวกันของวัสดุเบดไม่ได้รับการตรวจสอบหรือแก้ไขอย่างทันท่วงที จะส่งผลให้เกิดการหยุดชะงัก (unscheduled shutdown) ของระบบ ซึ่งทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและกู้คืนระบบ

จากปัญหาที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้เกิดประเด็นของการวิจัยว่า ทำอย่างไรจะสามารถทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเทคโนโลยีการเผาไหม้ฟลูอิดไคส์เบดได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดปริมาณของแก๊สมลพิษให้อยู่ในระดับที่ต่ำที่สุด รวมทั้งป้องกันการเกิดปัญหาเนื่องจากการหลอมตัวของเถ้าชีวมวลอันเป็นสาเหตุของการจับตัวกันของวัสดุเบด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อศึกษาและเสนอวิธีการเผาไหม้ที่สามารถลดก๊าซมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล
- เพื่อแก้ปัญหการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุเบตระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคเบต

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- ทำการศึกษาในเตาเผาฟลูอิดไคเบตขนาดต้นแบบ (200 kW_{th})
- ในการศึกษาวิธีการลดการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ใช้แก๊สอัดเม็ดและแก๊สขึ้นเป็นเชื้อเพลิง สำหรับการทดสอบเพื่อป้องกันการจับตัวกันของวัสดุเบตใช้กะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิงทดสอบ
- ใช้ทรายซิลิกา ทรายอะลูมินา เป็นวัสดุเบต
- อากาศส่วนเกินที่ใช้อยู่ในช่วง 20% ถึง 80%
- อัตราส่วนเชื้อเพลิงรองในการทดสอบการเผาไหม้แบบเป็นขั้นใช้ระหว่าง 0–0.25
- ใช้มาตรฐานการปล่อยมลพิษจากโรงไฟฟ้าของประเทศไทยเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการลดก๊าซมลพิษ

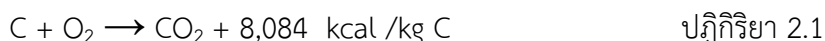
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเผาไหม้

กระบวนการหรือปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (Combustible element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนหรือความร้อนและแสงสว่าง การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อมีปริมาณออกซิเจนเต็มให้เพียงพอ ออกซิเจน (O_2) เป็นหนึ่งในธาตุพื้นฐานของโลกซึ่งมีปริมาณถึง 21 เปอร์เซ็นต์ของอากาศทั้งหมดของเรา การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็วของเชื้อเพลิง จะทำให้เกิดความร้อนในปริมาณมาก เชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลว จะต้องถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซเสียก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ โดยปกติแล้วจะต้องมีการใช้ความร้อนในการเปลี่ยนของเหลวหรือของแข็งให้เป็นก๊าซ และก๊าซเชื้อเพลิงก็จะถูกเผาไหม้ในสถานะปกติถ้ามีปริมาณอากาศเพียงพอ

คาร์บอน (Carbon, C) ไฮโดรเจน (Hydrogen, H) และกำมะถัน (Sulfur, S) ในเชื้อเพลิง เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศแล้วจะก่อตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยจะปล่อยพลังงาน 8,084 kcal, 28,922 kcal และ 2,224 kcal ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขที่แน่นอน คาร์บอนอาจจะรวมตัวกับออกซิเจนแล้วเกิดเป็น คาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งก็จะทำให้เกิดการปล่อยพลังงานความร้อนที่ต่ำ (2,430 kcal ต่อกรัมของคาร์บอน) ดังนั้นจะหมายถึง การสูญเสียความร้อนเท่ากับ 5654 kcal (8084–2430) ปฏิกิริยาการเผาไหม้สามารถเขียนได้ตามปฏิกิริยา 2.1 ถึง 2.4



การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. เวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอ เพื่อทำปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์
2. อุณหภูมิระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง
3. การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องอยู่ในลักษณะการไหลผสมแบบปั่นป่วน (Turbulence)

2.2 มลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ชีวมวล

มลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลสามารถถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) เกิดจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และ 2) เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ แหล่งของการเกิดและมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลแสดงในตาราง 2.1

1. มลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยมลพิษเหล่านี้ จะเกิดขึ้นแม้ว่ากระบวนการเผาไหม้จะเป็นไปอย่างสมบูรณ์ก็ตาม โดยสาเหตุหลัก ๆ มาจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้ มลพิษเหล่านี้ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O), ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x), ไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) และพวกฝุ่นละออง (particulate matter)

2. มลพิษที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), น้ำมันดิน (tar), โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (PAH), ไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y), แอมโมเนีย (NH_3) และพวกฝุ่นหรือเขม่า โดยมลพิษเหล่านี้จะเกิดขึ้นมาจากสภาวะการทำงานของระบบที่ไม่เหมาะสม เช่น

- การผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ไม่ทั่วถึง (poor mixing) ทำการเผาไหม้ไม่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
- มีปริมาณอากาศที่ใช้เผาไหม้ไม่เพียงพอ
- อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำเกินไป
- เวลาในการเผาไหม้น้อย (too short residence time)

ตารางที่ 2.1 มลภาวะที่เกิดจากการกระบวนการเผาไหม้ของชีวมวล

แหล่งที่มา	มลพิษที่เกิดขึ้น
การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (เชื้อเพลิงชีวมวลทุกชนิด)	CO , tar, C_xH_y , PAH, char particle, NH_3
การเผาไหม้สมบูรณ์ (เชื้อเพลิงชีวมวลทุกชนิด)	CO_2 , NO_x , N_2O
เชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของ Cl and S (urban waste woods, straw, grass)	HCl , SO_2 , salts, (KCl , K_2SO_4 , NH_4Cl)
เถ้า (เชื้อเพลิงชีวมวลทุกชนิด)	Particles
ชีวมวลที่ประกอบไปด้วยพวกโลหะหนัก (urban waste wood, sludge)	Pb, Zn, Cd, Cu, Cr, Hg etc.
เชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของ Cl สูง	PCDD, PCDF

ที่มา (Werther et al., 2000)

2.3 กลไกการก่อตัวและการสลายตัวของมลพิษระหว่างการเผาไหม้

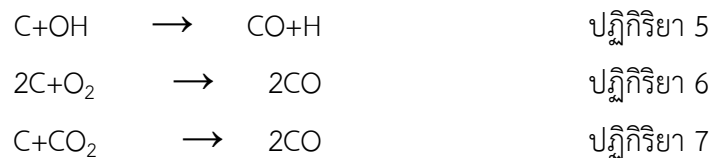
2.3.1 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide: CO)

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น แต่เป็นพิษร้ายแรงต่อมนุษย์ เกิดจากการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (incomplete combustion) ของสารประกอบคาร์บอน อัตราการเกิดหรือการ

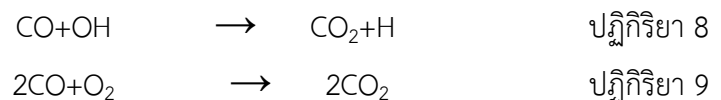
ลดลงของ CO จะขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบของการเผาไหม้ ดังนั้น CO จึงถูกใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการเผาไหม้

ในระบบการเผาไหม้ CO จะเกิดขึ้นการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องระหว่าง ถ่านคาร์บอน (char-C) กับ ออกซิเจน (O_2) น้ำ (H_2O) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ตามปฏิกิริยาที่ 5-7 (Saenger et al., 2001; Tillman et al., 1981) และจะเกิดการลดลงเนื่องจากปฏิกิริยารอง (secondary reactions) ของการเผาไหม้ CO ให้กลายเป็น CO_2 ด้วย O_2 และ H_2O ดังแสดงในปฏิกิริยา 8 และ 9 โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นบริเวณพรีบอร์ดของเตาปฏิกรณ์ (Löffler et al., 2002; Tillman et al., 1981)

CO Formation

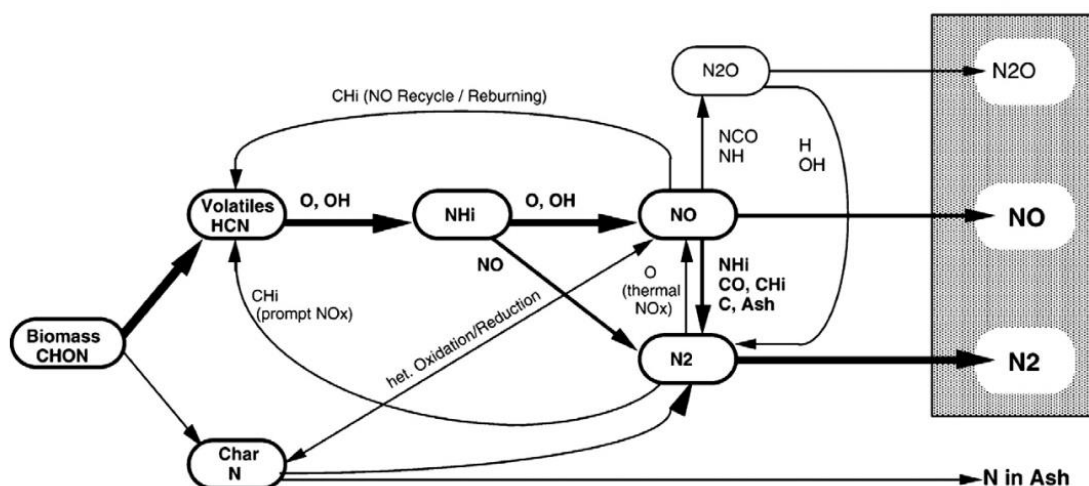


CO Oxidation



2.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of Nitrogen: NO_x)

ก๊าซกลุ่มออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เป็นก๊าซมลพิษ โดยทั่วไปประกอบด้วย ไนตริกออกไซด์ (NO) มากกว่าไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) มีสารมลพิษเริ่มต้นคือ NO ถูกออกซิไดซ์เมื่อพบกับออกซิเจนและโอโซนในอากาศกลายเป็น NO_2 ซึ่งเป็นต้นเหตุของฝนกรด เนื่องจากสามารถกลายน้ำกลายเป็นกรดไนตริก นอกจากนี้ NO_2 สามารถทำลายพืชทั้งทางใบและลดผลผลิต และทำให้เซลล์ของสัตว์เปลี่ยนแปลง ส่วน NO

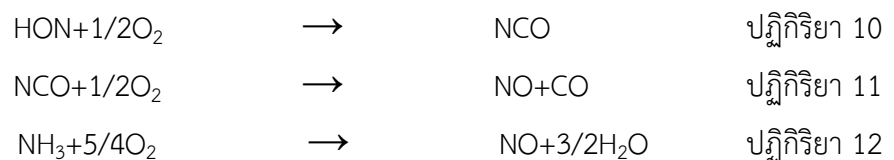


ภาพที่ 2.1 เส้นทางการก่อตัวและสลายตัวของไนโตรเจนออกไซด์ (Khan et al., 2009)

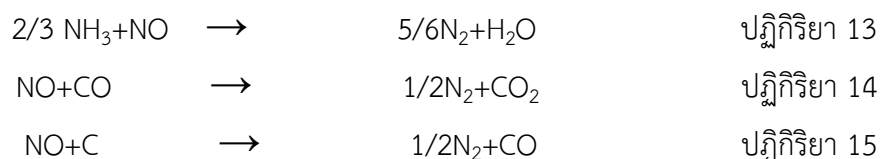
สามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง และทำให้ตาระคายเคือง และที่สำคัญ NO₂ สามารถทำให้เกิดสารมลพิษทางโฟโตเคมี (photochemical pollutant) (Werther et al., 2000)

ภาพที่ 2.1 แสดงเส้นทางการก่อตัวและลดลงของไนโตรเจนออกไซด์ จะเห็นได้ว่า ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ ไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนไปเป็น HCN และ NH ก่อนที่จะถูกออกซิไดซ์ด้วยกลุ่มอนุมูลอิสระ (radicals) ได้แก่ O, H และ OH แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนในระบบ HCN และ NH จะกลายไปเป็น N₂ และ H₂O แทน ปฏิกิริยาของการเกิดและลดลงของ NO สามารถสรุปได้ตามปฏิกิริยาที่ (Salzmann & Nussbaumer, 2001)

NO Formations



NO Reduction

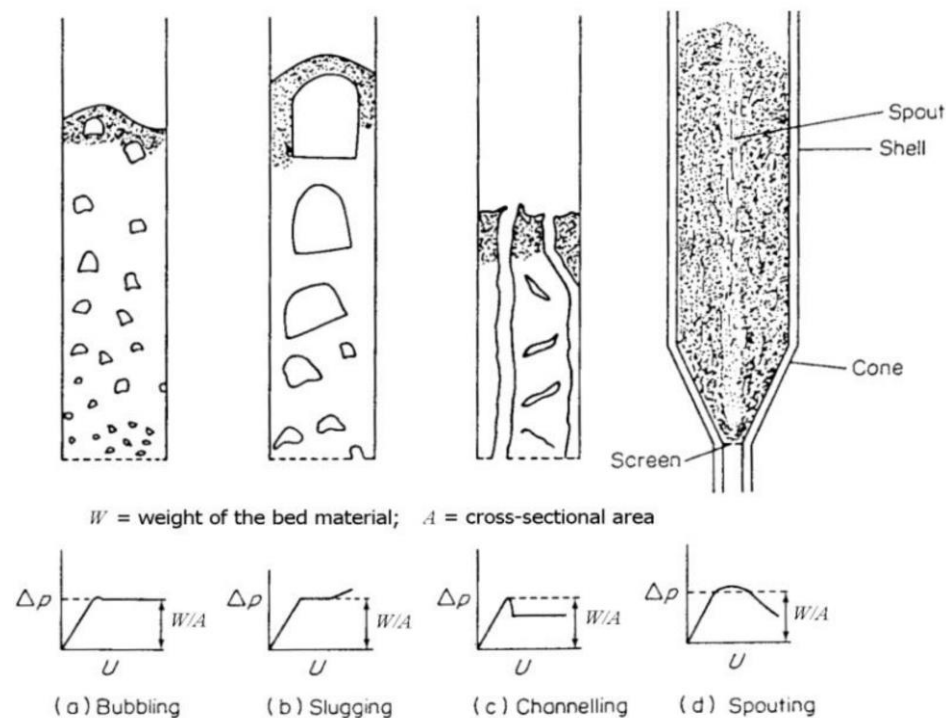


2.4 ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization)

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของฟลูอิดิเซชัน

ฟลูอิดิเซชัน คือ การที่ทำให้ของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายของเหลวที่สามารถไหลได้ โดยใส่วัสดุเบดเมื่อวัสดุเบดที่เป็นของแข็งถูกบรรจุเข้าไปในเตา อากาศจะไหลผ่านมาจากด้านล่าง ในขณะที่อากาศยังมีความเร็วต่ำ วัสดุเบดของแข็งจะยังไม่ขยับตัว เบดในขณะนี้อาจเรียกว่า เบดที่ยังไม่เกิดการเคลื่อนที่ (fixed bed) ถ้าหากอากาศร้อนมีความเร็วที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง จะทำให้วัสดุเบดของแข็งขยับลอยตัวอย่างเป็นอิสระ ซึ่งความเร็วที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้เบดขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วย แต่วัสดุเบดของแข็งยังอยู่ชิดกันมากอยู่ จนดูเหมือนว่าวัสดุเบดของแข็งยังจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งเรียกว่า “Dense Phase Fluidized Bed” ถ้าเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นอีก จะทำให้วัสดุเบดของแข็งลอยตัวมากยิ่งขึ้น ระยะห่างระหว่างเบดของแข็งก็มีมากขึ้น เบดในขณะนี้อาจเรียกว่า “Dilute Phase Fluidized Transport” และถ้าเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นอีก วัสดุเบดของแข็งก็จะลอยตัวจนหลุดออกไปจากเตา ซึ่งเรียกว่า “Pneumatic Transport”

ปรากฏการณ์ฟลูอิดิเซชันที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวของเมล็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เรียกว่า เบดสม่ำเสมอหรือเบดที่มีเนื้อเดียวกัน ส่วนฟลูอิดิเซชันที่ของไหลเป็นลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ของไหลเป็นของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชันแล้ว ส่วนหนึ่งจะทำให้เกิดการลอยตัวของวัสดุเบดของแข็ง แต่ก๊าซอีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นฟองก๊าซลอยขึ้นมา ซึ่งจะทำให้วัสดุเบดของแข็งที่ติดอยู่บนฟองก๊าซไหล จากส่วนบนของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง นอกจากนี้มีบางส่วนของวัสดุเบดของแข็งที่



ภาพที่ 2.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดเซชัน (Kunii & Levenspiel, 1991)

ลอยติดตามฟองก๊าซไปด้วย ลักษณะดังกล่าวทำให้ภายในเบดจะมีการเคลื่อนที่อย่างสุ่มแบบเบดชนิดนี้เรียกว่า “เบดฟองอากาศ (Bubbling Bed)”

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเม็ดของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และลักษณะของแผ่นกระจายอากาศ โดยลักษณะของฟองอากาศอาจแบ่งได้ดังรูปภาพที่ 2.2

(a) Bubbling ของแข็งในเตาฟลูอิดเซชันเบดจะมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและสม่ำเสมอทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแบบอื่น

(b) Slugging เป็นการเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซจนได้ฟองก๊าซที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอทดลองมีการแยกตัวของเม็ดของแข็งเป็นชั้นๆ ทำให้การถ่ายเทมวลสารหรือความร้อนเกิดได้ไม่ทั่วถึงเนื่องจากเม็ดของแข็งสัมผัสกับก๊าซเป็นเวลาอันสั้นหรือไม่สัมผัสเลยในบางส่วน

(c) Channelling เป็นการเกิดการผ่านของก๊าซเป็นช่องๆ โดยที่เม็ดของแข็งที่อยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่มีการเคลื่อนที่แต่บริเวณข้างเคียงจะไม่มีเคลื่อนที่

(d) Spouted Bed เป็นการที่ก๊าซส่วนใหญ่ไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของเม็ดของแข็งมากกว่าบริเวณรอบข้างด้วยความเร็วสูงมากทำให้บริเวณตรงกลางที่มีความหนาแน่น

2.4.2 การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart

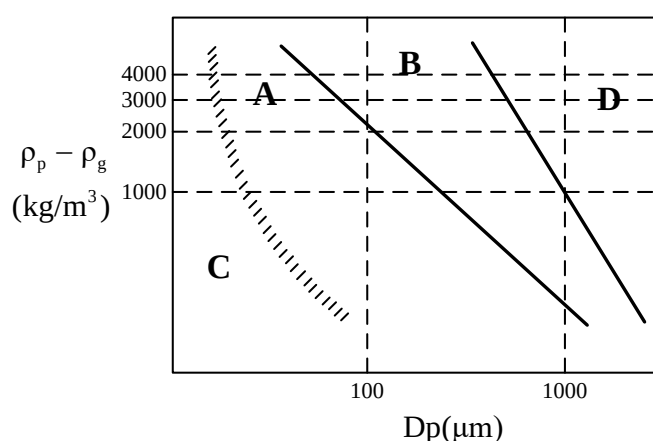
ในการจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart สามารถจัดเรียงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคได้แตกต่างกัน 4 กลุ่ม โดยจัดเรียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค จากเล็กสุดไปยิ่งใหญ่สุด ดังที่แสดงตามแผนผังการจัดหมวดหมู่ของ Geldart ในภาพที่ 2.3

ในกลุ่ม A อนุภาคที่มีขนาดเล็กหรืออนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำ (1400 kg/m^3) ซึ่งเป็นกลุ่มที่อากาศสามารถผ่านอนุภาคได้ อนุภาคของแข็งนี้สามารถทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ง่ายที่ความเร็วของก๊าซที่ใช้เป็นของไหลที่มีความเร็วต่ำ อนุภาคของเบดจะมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนของไหลแบบราบเรียบ (Smooth Fluidization) ที่ความเร็วก๊าซสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ (Minimum Bubbling) วัสดุเบดจะเปลี่ยนไปเป็นช่วงของการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ

ในกลุ่ม B เป็นกลุ่มที่มีลักษณะคล้ายกับทราย (Sandlike Particles) โดยปกติแล้วในกลุ่มนี้จะใช้เป็นวัสดุเบดในเตาเผาฟลูอิดไธเซตแบบฟองอากาศ จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $40\text{--}500 \mu\text{m}$ และความหนาแน่นของอนุภาคอยู่ระหว่าง $1400\text{--}4000 \text{ kg/m}^3$ อนุภาคในกลุ่มนี้จะเคลื่อนที่ได้ดีในรูปแบบฟองอากาศ เมื่อความเร็วของก๊าซที่ใช้เป็นของไหลมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน

ในกลุ่ม C เป็นกลุ่มที่อนุภาคมีการยึดเกาะได้ดี และมีความละเอียดที่สุด โดยปกติอนุภาคในกลุ่มนี้จะเกิดการฟลูอิดเซชันได้ยากเพราะแรงยึดเกาะของอนุภาคมีค่ามากกว่าแรงดันของของไหลอย่างไรก็ตาม ก๊าซของไหลก็ยังสามารถหาช่องว่างที่จะผ่านออกไปได้โดยจะมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนในส่วนที่วัสดุเบดมีการยึดเกาะต่ำ

ในกลุ่ม D อนุภาคจะมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นมากสำหรับกลุ่มนี้ฟองอากาศจะเกิดขึ้นได้ช้ากว่ากลุ่มอื่นและเกิดช่องว่างที่สามารถทำให้ก๊าซของไหลพุ่งผ่านขึ้นมาได้ง่าย ซึ่งสำหรับวัสดุเบดที่ยึดเกาะกันได้ดีสามารถที่จะเกิดการฟลูอิดเซชันได้ แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่แบบน้ำพุ (Spouting Fluidization) จะเกิดขึ้นโดยมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนเนื่องมาจากการจ่ายก๊าซของไหลที่ไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 2.3 การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart (Geldart, 1973)

2.5 การเผาไหม้แบบฟลูอิดไธเซต (fluidized bed combustion)

การเผาไหม้แบบฟลูอิดไธเซตทำงานโดยอาศัยหลักการฟลูอิดเซชัน (fluidization) ซึ่งหลักการดังกล่าวเป็นปรากฏการณ์ที่กลุ่มอนุภาคของแข็งถูกกระทำให้มีพฤติกรรมคล้ายของไหล ภายใต้กระแสการพวยของก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านกลุ่มอนุภาคของแข็งขึ้นด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง ดังนั้น ในเตาเผาแบบฟลูอิดไธเซตจึงมีการใส่วัสดุเบด (bed material) โดยปกติจะใช้ทรายซิลิกา หรือหินปูน หรือ

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนและการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศเผาไหม้เกิดขึ้นเป็นอย่างดี ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชันเกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบบางประการ เช่น ความเร็วของของไหล ชนิดของเม็ดวัสดุที่ประกอบกันเป็นเบด ระบบฟลูอิดไดซ์เบดนี้ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถใช้กับเชื้อเพลิงแข็งได้หลากหลายชนิด เพราะอุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าใกล้เคียงตลอดทั่วเตาเผา ทำให้อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสม่ำเสมอ สามารถเผาเชื้อเพลิงที่มีปริมาณความชื้นสูงได้ดี นอกจากนั้นยังทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟคงที่

ข้อดีของระบบฟลูอิดไดซ์เบด คือมีสารเฉื่อย เช่น ทราย เป็นเบด จึงทำให้เกิดการผสมของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดี เกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว นอกจากนี้ตัวเบดยังช่วยอมความร้อน ทำให้เตามีความเสถียร ไม่ดับง่าย และเกิดการเผาไหม้ในตัวเตาเผาได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าเท่ากันและสม่ำเสมอ สามารถใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงในช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำ (ประมาณ 850 °C) จึงช่วยแก้ปัญหาด้านมลพิษของอากาศเนื่องจากการเกิดสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ได้ เป็นระบบเกี่ยวกับลมเกือบทั้งหมด (pneumatic system) ไม่ค่อยมีระบบเครื่องกล (mechanical system) ทำให้การควบคุมระบบทำได้ง่าย เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ในเตาระบบฟลูอิดไดซ์เบด ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้หมดสมบูรณ์ไม่เกิน 5 วินาที ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่เชื้อเพลิงใช้อยู่ในเตาเผา จึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์

ข้อเสียของระบบฟลูอิดไดซ์เบด คือ จะต้องมีการเสริมสำหรับการจุดเตา ระบบการป้อนเชื้อเพลิงจะต้องสอดคล้องกับเชื้อเพลิงที่ใช้ มีการสักร้อนของอุปกรณ์ต่างๆ ได้ เนื่องจากการปะทะกันอย่างรุนแรงของอนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในเตา ปัญหาอีกอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดคือ การเกาะตัวกันของวัสดุเบด ซึ่งเกิดขึ้นจากองค์ประกอบพวกอัลคาไลน์ในเถ้าของเชื้อเพลิง

ในทศวรรษที่ผ่านมาการได้มีการให้ความสนใจในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทั้งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดเส้นใย เมล็ด และ เปลือกของผลไม้ และถั่วชนิดต่างๆ โดยเฉพาะการเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (bubbling) และหมุนเวียน (circulating) ดังที่ได้ทราบจากงานวิจัยในช่วงเริ่มต้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของระบบที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทดังกล่าวไว้ข้างต้นนั้นค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ได้รับเป็นที่น่าพอใจและสามารถควบคุมให้อยู่ในระดับเดียวกันกับเชื้อเพลิงชนิดทั่วไป

Kaynak และคณะ (Kaynak et al., 2005) ได้ทำการทดลองเผาไหม้เมล็ดพืช และแอปเปิ้ลคอกในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้ทรายควอทซ์เป็นวัสดุเบด อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองนั้นเริ่มต้นที่ 5 กรัม/นาที่ ไปจนถึง 20 กรัม/นาที่ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (ซึ่งรวมผลกระทบจากการสูญเสียความร้อนที่เกี่ยวข้องกับ C_xH_y ไว้แล้ว) มีค่าอยู่ที่ 96% ถึง 97% สำหรับเมล็ดพืช และมีค่าอยู่ที่ 93% ถึง 96% สำหรับเมล็ดแอปเปิ้ลคอก โดยอากาศส่วนเกินสำหรับการเผาไหม้อยู่ที่ 40% ถึง 100% การเพิ่มขึ้นของอากาศส่วนเกินสำหรับการเผาไหม้มีผลกระทบเล็กน้อยต่อการปลดปล่อย CO ในการเผาไหม้เมล็ดแอปเปิ้ลคอก ซึ่งอัตราการปล่อย CO นั้นผันผวนอยู่ใกล้เคียงค่าเฉลี่ยที่ 1,500 mg/Nm³ อย่างไรก็ตามในกรณีของเมล็ดพืชพบว่าอัตราการปล่อย CO นั้นเพิ่มขึ้นจาก 6500 mg/Nm³ เป็น 13,500 mg/Nm³ ซึ่งเป็นบ่งบอกถึงการผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศในสถานะที่ไม่เหมาะสม เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินสำหรับการเผาไหม้

สำหรับการปลดปล่อย C_xH_y พบว่าในการใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิด อัตราการปล่อย C_xH_y เพิ่มขึ้นในแนวโน้มที่เกือบจะเป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับการเพิ่มอากาศส่วนเกินสำหรับการเผาไหม้ โดยอัตราการปล่อย C_xH_y มีค่าอยู่ที่ 340 ถึง 460 mg/Nm^3 สำหรับอัตราการปล่อย NO ในงานวิจัยนี้พบว่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินสำหรับการเผาไหม้ ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ NO ที่ปล่อยออกมาอยู่ที่ประมาณ 280 และ 250 mg/Nm^3 สำหรับเมล็ดแอปปริคอต และเมล็ดพีช ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของการปล่อย NO จากการเผาเมล็ดแอปปริคอตเมื่อเทียบกับเมล็ดพีชนั้นเป็นผลมาจากปริมาณไนโตรเจนในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่มากกว่านั่นเอง อย่างไรก็ตามการปลดปล่อย SO_2 ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีค่าน้อยมาก(เกือบเป็นศูนย์) เนื่องจากมีองค์ประกอบซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงน้อยมาก ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยนี้คือ การจ่ายอากาศชั้นที่สองเข้าไปในเตาเผาแบบพองอากาศอาจช่วยให้ลดการปล่อยก๊าซมลพิษลงได้ งานวิจัยอื่นๆได้กล่าวถึงการแบ่งระดับการจ่ายอากาศเข้าไปในเตาเผาว่าเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่จะรักษาระดับมลพิษจากการเผาไหม้ไว้ที่ระดับที่น่าพอใจ และเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ (Topal et al., 2003; Varol & Atimtay, 2007)

ในงานวิจัยของ Chyang และคณะ (Chyang et al., 2008) ได้ใช้กลบ และถั่วเหลืองเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาแบบ vortexing ฟลูอิดไชด์โดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด อากาศชั้นต้น (primary air) ถูกปรับอัตราการไหลไว้ที่ 1.98 ถึง 3.4 Nm^3/min ในขณะที่ อากาศชั้นที่สอง (secondary air) ถูกปรับอัตราการไหลไว้ที่ 0 ถึง 2.07 Nm^3/min พบว่าเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยสูงมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิด NO และ N_2O ขึ้นมาก ในเตาเผาบริเวณเหนือพื้นผิวเบด และเห็นได้ชัดว่าอัตราการปลดปล่อย NO นั้นเพิ่มขึ้นเมื่อมีอากาศเหลือจากการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามอัตราการปลดปล่อย NO แทบจะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเบด (ในช่วง 600-760 องศาเซลเซียส) ในขณะเดียวกันในงานวิจัยนี้ก็พบผลกระทบที่เห็นได้ชัดเจนจากการจ่ายอากาศชั้นที่สอง ที่มีต่อการปล่อย NO และ N_2O ส่วนการใส่น้ำเข้าไปที่เบดนั้นเป็นการเพิ่มการเกิด NO และ N_2O ภายในห้องเผาไหม้ อย่างไรก็ตามการปลดปล่อย N_2O พบว่าอยู่ในปริมาณที่น้อยมากสำหรับเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด

Varol และ Atimtay (Varol & Atimtay, 2007) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการจ่ายอากาศชั้นที่สองเข้าไปในการเผาไหม้เมล็ดมะกอกในเตาเผาแบบพองอากาศโดยใส่เชื้อเพลิงในอัตรา 10 กรัม/นาทีก และให้มีอากาศส่วนเกินสำหรับการเผาไหม้อยู่ที่ 12% ถึง 130% ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างอากาศชั้นที่สองต่ออากาศรวมอยู่ที่ตั้งแต่ 11% ถึง 23% เมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศชั้นที่สอง (เมื่ออากาศรวมคงที่) พบว่าการปลดปล่อย CO และ C_xH_y จากเตาเผาลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากการเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและอากาศในบริเวณเบดของเตาเผา ซึ่งสามารถนำไปสู่การลดลงของ CO และ C_xH_y จากผลดังกล่าวซึ่ง CO และ C_xH_y ถูกทำให้ลดลงจึงนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้จาก 83.6% เป็น 96.1% เป็นที่น่าสังเกตว่าการปล่อย NO จากเตาเผา นั้นน้อยลงเมื่อสัดส่วนของอากาศชั้นที่สองเพิ่มขึ้นจาก 11% เป็น 17% อย่างไรก็ตามเมื่อสัดส่วนของอากาศชั้นที่สองเพิ่มขึ้นจาก 17% เป็น 23% การปล่อย NO แสดงแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เป็นการบ่งบอกว่ามีอัตราการเกิด NO สูงขึ้นในบริเวณ freeboard ซึ่งงานวิจัยของ Topal และคณะ (Topal et al., 2003) ก็พบแนวโน้ม และผลกระทบแบบเดียวกันในการเผาไหม้เมล็ดมะกอกในเตาเผาแบบหมุนเวียน

Sun และคณะ (Sun et al., 2008b) ประยุกต์การแบ่งระดับการจ่ายอากาศในการเผาไหม้ ต้นฝ้ายในเตาเผาแบบ bubbling ฟลูอิดไชต์เบดที่อัตราการใส่เชื้อเพลิง 35 kg/hr โดยมีอากาศเหลือจากการเผาไหม้ ตั้งแต่ 14% ถึง 50% และมีสัดส่วนของอากาศชั้นที่สอง (ต่ออากาศรวมที่ใส่เข้าไปในเตาเผา) ตั้งแต่ 0.38 ถึง 0.61 ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาสามารถเพิ่มขึ้นจนถึง 99.5% ในขณะที่การปล่อย NO ลดลงจาก 183 ppm เหลือ 120 ppm การปล่อย SO₂ พบว่าน้อยมาก เพียง 32 ถึง 60 ppm ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้นั้นมีซัลเฟอร์ในปริมาณที่ต่ำมาก

Tarelho และคณะ (Tarelho et al., 2011) ทำการทดลองการเผาไหม้ เศษชีวมวลอัดเม็ดจากวัสดุในป่าไม้ในเตาเผาแบบ ฟองอากาศที่อุณหภูมิเบด 750 ถึง 800 องศาเซลเซียส ทราบซิลิกาได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเบดเพื่อใช้ในการฟลูอิดเซชัน ในการทดลองนี้ได้มีการปรับอัตราอากาศส่วนเกินอยู่ที่ 10% ถึง 100% ในขณะที่สัดส่วนการแบ่งระดับอากาศคงที่ (อากาศชั้นแรก 80% และอากาศชั้นที่สอง 20%) จากการทดลองพบว่า 75% ถึง 80% ของคาร์บอนในชีวมวลถูกแปลงให้อยู่ในรูปของ CO₂ ในบริเวณเบด และ bed splash zone ในขณะที่ไนโตรเจนจากเชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนเป็น NO น้อยกว่า 8% ซึ่งเป็นการสร้างความมั่นใจว่าการปล่อย NO อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ สำหรับการปล่อย N₂O นั้นพบว่าอยู่ในปริมาณที่ต่ำ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ NH₃ เป็น NO และ N₂ (มากกว่า N₂O) คาร์บอนทั้งหมดถูกทำปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปของ CO₂ ซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ในช่วงระหว่าง 97.2% ถึง 99.3%

Youssef และคณะ (Youssef et al., 2009) ศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดไม้แพร่หลายในประเทศอียิปต์บางชนิด เช่น ฟางข้าวสาลี เมล็ดฝ้าย และซังข้าวโพด ในเตาเผาฟลูอิดไชต์เบดแบบหมุนเวียนขนาดย่อ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน (ซึ่งมีผลต่ออัตราความร้อนที่ป้อนเข้า) ทราบซิลิกาประมาณ 5 kg ถูกใช้เป็นวัสดุเบด ในการทดลองมีอัตราส่วนอากาศส่วนเกินอยู่ที่ 1.08, 1.24 และ 1.4 สำหรับเชื้อเพลิงทุกชนิด ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างอากาศชั้นต้นต่ออากาศรวมคงที่ที่ 0.5 อากาศชั้นที่สองถูกแยกออกเป็น 3 สาย ที่สัดส่วนปริมาตรที่ 0.15, 0.25 และ 0.1 ไปตามความสูงของเตาเผา ตามที่งานวิจัยนี้ได้สรุปว่าอากาศส่วนเกินมีผลกระทบต่อการปล่อย CO และ NO_x จากเตาเผา อย่างไรก็ตามก็ยังขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเชื้อเพลิงด้วย โดยอากาศส่วนเกินที่ดีที่สุดพบว่าอยู่ที่ 1.24 สำหรับเชื้อเพลิงทุกชนิดในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีปริมาณซัลเฟอร์อยู่น้อย การปล่อย SO₂ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้จึงน้อยมาก กล่าวคือ น้อยกว่า 20 มิลลิกรัม/นิวตัน.ม.³ อีกทั้งยังไม่ขึ้นอยู่กับอากาศส่วนเกิน

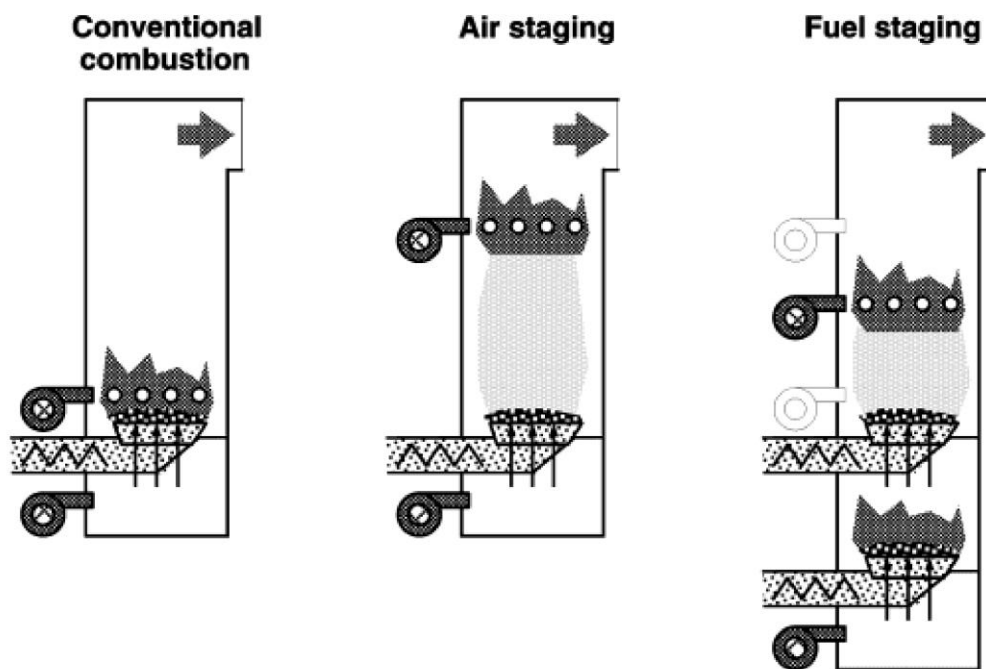
ตารางที่ 2.2 ผลวิจัยจากการวิจัยเผาไหม้ของ ฐานิตย์ เมธิยานนท์และคณะ

เตาเผา/ระบบการเผาไหม้	สภาวะการทำงาน	มลพิษที่ปลดปล่อย (ที่ 6% O ₂)			Combustion efficiency
		CO	NO _x	SO ₂	
Cyclonic fluidized-bed combustor (ψ-FBC) with 100 kW _{th} co-firing of rice husk and coal	– fluidizing air = 1.0–1.9 m/s – Excess air = 67–130% – bed temperature > 1000 °C	50–400	350–425	N/A	more than 98 (%)
Cyclonic fluidized-bed combustor (ψ-FBC) with 120 kW _{th} co-firing of rice husk and coal	– fluidizing air = 1.35 m/s – Excess air = 60–120% – bed temperature >1000 °C – energy fraction of coal 0–25%	60–260	260–416	15–180	more than 97 (%)
Short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC) with 250 kW _{th} firing rice husk	– fluidizing air = 0.5–0.9 m/s – Excess air = 80–130% – bed temperature >1000 °C	50–550	230–350	N/A	more than 99 (%)

แต่อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยบางส่วนได้ระบุว่า การปลดปล่อยมลพิษ NO_x และ CO จากเตาเผาฟลูอิดไธด์เบตยังมีปริมาณสูงอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง NO_x หากว่าเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนปริมาณสูง (Akpulat et al., 2010; Madhiyanon et al., 2006; Qian et al., 2011)

Akpulat และคณะ (Akpulat et al., 2010) ได้ทำการเผาไหม้เศษของเหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมันมะกอกในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธด์เบต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีการปล่อย NO_x ในปริมาณที่สูงมากถึง 1400 mg/Nm³ ที่ปริมาณ O₂ 6%

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และคณะนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยมหานคร ประเทศไทย ได้ทำการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธด์เบตแบบต่างๆ เช่น แบบที่มีการไหลแบบไซโคลน และ เตาเผาแบบสั้น เพื่อทำการเผาไหม้ ถ่านหิน และเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของงานวิจัยได้ถูกสรุปและแสดงในตารางที่ 2 จากผลการทดสอบพบว่า เตาเผาที่สร้างขึ้นสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆได้เป็นอย่างดี สามารถให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้สูงถึงประมาณ 99% เนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และมีการปล่อย CO ในปริมาณที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม หากเมื่อพิจารณาถึงการปลดปล่อย NO_x พบว่า มีการปลดปล่อยค่อนข้างสูงอยู่ที่ประมาณ 230–425 ppm (ที่ 6% O₂) ซึ่งหากพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการปลดปล่อย NO_x ของประเทศไทย ซึ่งกำหนดให้การปลดปล่อย NO_x ไม่เกิน 210 ppm ที่ 6% O₂ (กรมควบคุมมลพิษ, 2558)



ภาพที่ 2.4 รูปแบบการเผาไหม้ระหว่างการป้อนอากาศทุติยภูมิและการป้อนเชื้อเพลิงทุติยภูมิ
(Nussbaumer, 2003)

2.6 การลดไนโตรเจนออกไซด์โดยเทคนิคการเผาไหม้เป็นขั้น

การใช้อากาศทุติยภูมิถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดยการนำมาใช้ควบคุมมลพิษของยานพาหนะโดยเริ่มมีการใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1966 การป้อนอากาศทุติยภูมิ คือ การป้อนอากาศที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มเข้าไปในส่วนของห้องเผาไหม้เพื่อทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

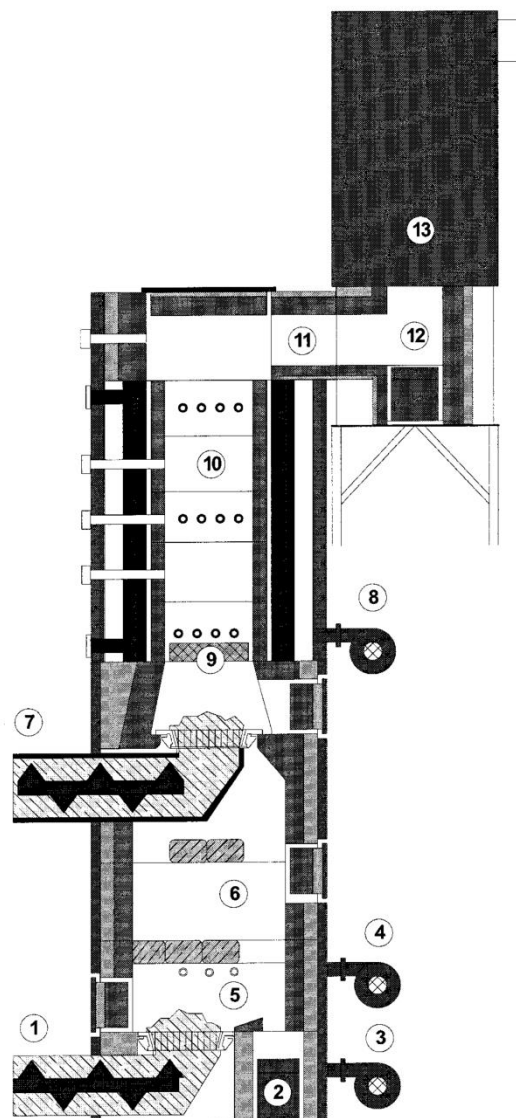
กลไกการปล่อยมลพิษจะถูกควบคุมด้วยวิธีการฉีดของหัวฉีดจุดปล่อยอากาศเข้าสู่ระบบไอเสียจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีดังต่อไปนี้

ระบบฉีดอากาศให้ใกล้ห้องเผาไหม้ โดยสามารถเลือกได้ว่าจะฉีดเข้าบริเวณเหนือห้องเผาไหม้หรือจะฉีดเข้าใกล้ปล่องไอเสีย โดยระบบนี้จะเป็นการฉีดออกซิเจนเข้าไปในส่วนห้องเผาไหม้ในขณะที่เชื้อเพลิงยังมีการเผาไหม้ไม่หมดทำให้เห็นได้ชัดว่าการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าไปนั้นทำให้ปริมาณมลพิษลดลงแต่อย่างไรก็ตามการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าไปในห้องเผาไหม้นั้นจะทำให้เกิดความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ซ้ำเพิ่มขึ้นและไอเสียในห้องเผาไหม้เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นในห้องเผาไหม้ระบบป้อนอากาศโดยใช้ปั๊มอากาศ โดยฉีดอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้หรือจุดป้อนอากาศที่กำหนดไว้ ข้อดีของปั๊มอากาศคือ สามารถอัดอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้ปริมาณสูงอีกทั้งยังสามารถคุมปริมาณอากาศได้ด้วยวาล์วปรับอากาศ ข้อเสียคืออาจมีชิ้นส่วนหรือเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดย้อนกลับเข้ามาสร้างความเสียหายให้กับปั๊มอากาศได้

ระบบป้อนอากาศโดยใช้ความแตกต่างของความดัน ระบบนี้เป็นการนำอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้หรือจุดปล่อยอากาศที่กำหนดโดยใช้จังหวะความดันด้านลบในระบบเผาไหม้ส่วนของไอเสียโดยใช้วาล์วควบคุมอากาศที่มีความไวสูงเป็นพิเศษ ข้อดีของระบบนี้คือ สามารถป้องกันชิ้นส่วนหรือเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่

หมดออกมานอกระบบได้ ข้อเสียของระบบนี้คือ ไม่สามารถคาดเดาได้ล่วงหน้าว่าความดันด้านลบจะมากหรือน้อยแค่ไหนในการดูดอากาศเข้าไปแต่ละครั้ง

ระบบป้อนอากาศแบบเป็นขั้นนั้นถูกพัฒนาโดยนำมาใช้ร่วมกับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อเป็นการลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงการเผาไหม้ดังแสดงในภาพที่ 2.4 การป้อนอากาศทุติยภูมินั้นจะมีการเพิ่มอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมนั้นหมายความว่าอากาศปฐมภูมินั้นจะถูกลดอัตราส่วนลงเป็นเหตุให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เพิ่มมากขึ้นนั้นส่งผลให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้นจึงเข้าหาการเร่งปฏิกิริยากับก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) จึงทำให้ปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศนั้นลดลง หรือในอีกกรณีคือ เมื่อลดปริมาณอัตราส่วนอากาศปฐมภูมินั้นส่งผลให้เกิดการเผาไหม้



Research facility at the ETH Zurich (1. understoker (stage 1); 2. ash box; 3. and 4. air inlet; 5. primary zone; 6. burnout zone; 7. understoker (stage 2: reburn stage); 8. air inlet (level variable); 9. mixing element; 10. reduction zone; 11. burnout zone; 12. flyash box; 13. boiler).

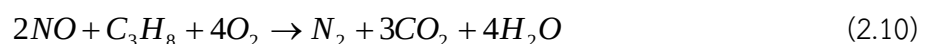
ภาพที่ 2.5 ส่วนประกอบ ของเตา Understoker ที่ใช้ในการทดลองการเผาไหม้เป็นขั้น
(Salzmann & Nussbaumer, 2001)

ที่ไม่สมบูรณ์เพิ่มมากขึ้นอีกทั้งปริมาณสารระเหยและก๊าซแอมโมเนีย NH_3 มีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาระหว่างก๊าซแอมโมเนียกับก๊าซไนตริกออกไซด์ เกิดเป็นก๊าซไนโตรเจนและน้ำดังแสดงในปฏิกิริยา 2.9 ได้อากาศส่วนเกิน

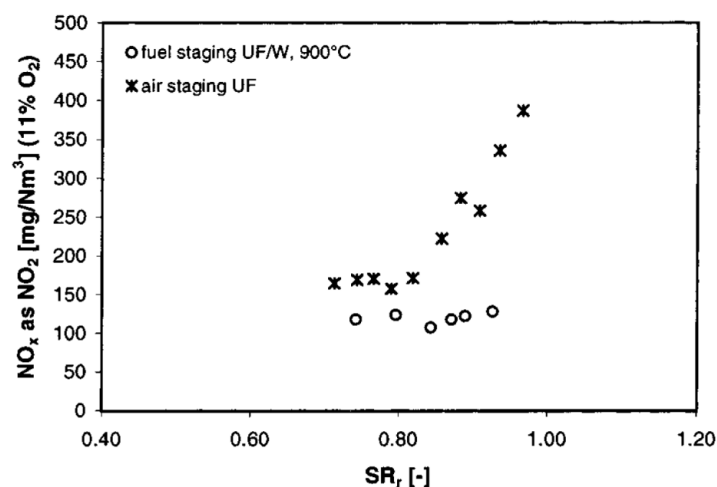


การใช้เชื้อเพลิงทุติยภูมิถูกนำมาใช้เพื่อการควบคุมมลพิษที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศและลดต้นทุนในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลประเภทเดียวในการเผาไหม้เนื่องจากสามารถหาเชื้อเพลิงชีวมวลอีกชนิดที่มีค่าความร้อนใกล้เคียงกันแต่ต้นทุนถูกกว่าเข้ามาใช้ในการเผาไหม้ในชั้นทุติยภูมิได้ หลักการเผาไหม้โดยใช้การป้อนเชื้อเพลิงทุติยภูมิจะมีความแตกต่างจากการใช้อากาศทุติยภูมิดังแสดงในภาพที่ 2.4

การป้อนเชื้อเพลิงทุติยภูมินั้นการป้อนเชื้อเพลิงทุติยภูมิเป็นการเพิ่มอัตราส่วนของเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่อเชื้อเพลิงรวมนั้นส่งผลให้มีปริมาณเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นในขณะที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซไฮโดรคาร์บอนออกมาในห้องเผาไหม้เป็นจำนวนมากส่งผลให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนเข้าทำการเร่งปฏิกิริยากับก๊าซไนตริกออกไซด์ เป็นเหตุให้เมื่อมีการปล่อยมลพิษออกสู่บรรยากาศนั้นปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ กลไกการลดก๊าซไนตริกออกไซด์จากการใช้การป้อนเชื้อเพลิงทุติยภูมิ ดังแสดงในสมการที่ 2.10



Salzmann R. และ Nussbaumer T (Salzmann & Nussbaumer, 2001) ในเรื่องของการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของการเกิดและการสลายของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ สภาวะการทดลองใช้ Wood



ภาพที่ 2.6 ผลของอัตราส่วน stoichiometric ต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากวิธีการเผาไหม้แบบจ่ายอากาศเป็นชั้นและจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น (Salzmann & Nussbaumer, 2001)

Chips และ UF-chipboard เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งทำการเผาในเตาเผา Understoker แบบป้อนเชื้อเพลิงแบบเป็นชั้นดังแสดงในภาพ 2.5 โดยใช้ UF-chipboard เป็นเชื้อเพลิงหลักและ Wood Chips เป็นเชื้อเพลิงรอง

จากการทดลองพบว่า การป้อนเชื้อเพลิงแบบเป็นชั้น สามารถช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนได้เนื่องจากการป้อนเชื้อเพลิงแบบเป็นชั้นนั้นจะมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงซ้ำ 2 ครั้งคือ จุดที่ 5 และ 9 จะเป็นตำแหน่งของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงหลักและรอง จุดที่ 6 และ 10 จะเป็นจุดที่เชื้อเพลิงเผาไหม้หมดเหลือแต่สภาวะที่เป็นก๊าซเท่านั้น และตรงจุดที่ 9 จะเป็นจุดที่ก๊าซที่เผาไหม้จากเชื้อเพลิงหลักเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงรองเนื่องจากก๊าซที่มาจากการเผาไหม้ชั้นแรกจะมีส่วนประกอบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สูงเมื่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้ามาทำปฏิกิริยากับก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์ ก็จะทำให้ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ปล่อยออกสู่บรรยากาศมีค่าต่ำลง โดยเมื่อเปรียบเทียบการเผาแบบปกติ และการป้อนอากาศแบบเป็นชั้นดังแสดงในภาพที่ 2.6 พบว่า การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงแบบเป็นชั้นสามารถลดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ได้สูงกว่า 2 วิธีข้างต้นคือ การเผาไหม้โดยใช้วิธีการป้อนอากาศแบบเป็นชั้น และการเผาไหม้โดยใช้ปริมาณอากาศเกินเพียงอย่างเดียว

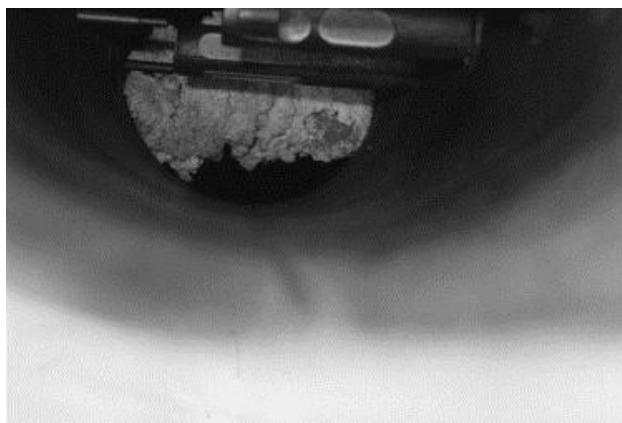
Spliethoff และคณะ (Spliethoff et al., 1996) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาพื้นฐานของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เมื่อใช้การเผาไหม้โดยการป้อนเชื้อเพลิงแบบเป็นชั้นโดยใช้เชื้อเพลิงหลักเป็นถ่านหินบิทูมินัส บดละเอียดและถ่านหินสีน้ำตาลเชื้อเพลิงรองเป็นก๊าซธรรมชาติ เตาเผามีลักษณะเป็นท่อเซรามิกมีความยาว 2.5 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีขนาด 200 mm สามารถทนความร้อนได้ถึง 1400 °C และมีการป้อนเชื้อเพลิงแบบแนวตั้งจากด้านบนโดยใช้ฮีตเตอร์เผาและตรงกลางมีการเผาไหม้อีกครั้งโดยใช้ก๊าซ

จากการวิจัยพบว่า ที่เวลาในการเผาไหม้ 1-2 วินาทีนั้นจะทำให้ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ลดลงและที่เวลาในการเผาไหม้มากกว่า 1.5 วินาทีนั้นจะทำให้ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ลดลงเหลือน้อยกว่า 200 mg/Nm³ และถ่านหินสีน้ำตาลจะมีปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่สูงกว่าถ่านหินบิทูมินัสบดละเอียดและผลของอัตราส่วนอากาศในช่วงของการลดก๊าซไอเสียนั้นพบว่าช่วงที่อัตราส่วนของอากาศเท่ากับ 0.6 นั้นสามารถลดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด

Su และ คณะ (Su et al., 2009) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากเตาเผาแบบบนลงล่าง (down-fired furnace) สภาวะการทดลองใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลักและใช้ก๊าซมีเทนเป็นเชื้อเพลิงรองโดยใช้การเผาไหม้แบบป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นลักษณะของเตาเผาเป็นท่อเซรามิก สูง 3.5 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 0.175 m และใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.8 kg/h อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ไม่เกิน 1,500 K อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิเท่ากับ 5 Nm³/h และ อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 4, 5, 6, 6.5, และ 7 Nm³/h

จากผลการวิจัยพบว่า ที่ระยะเวลาในบริเวณการเผาไหม้ซ้ำ 0.6-0.9 วินาทีนั้นจะทำให้ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ลดลงได้ถึง 50% และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้โดยการติดตั้งเข้ากับ boiler ก็จะทำให้ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ลดลงเหลือ 235 mg/Nm³ ที่ 3% O₂ คิดเป็น 60%

งานวิจัยของ Kicherer และคณะ (Kicherer et al., 1994) บ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณสารระเหยที่มีอยู่มากในชีวมวลมีส่วนช่วยในการลดการปลดปล่อย NO_x ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.7 การจับตัวกันเป็นก้อนของวัสดุเบตที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้เมล็ดกาแฟในเตาเผาฟลูอิดซ์เบตที่ใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบต (Saenger et al., 2001)

นอกจากนี้ผลวิจัยของ Casaca และ Costa (Casaca & Costa, 2009) Ballester และคณะ (Ballester et al., 2008) และ Shu และคณะ (Shu et al., 2015) ได้ยืนยันไปในทางเดียวกันว่าการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงรองสามารถลดการปลดปล่อย NO_x ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังสามารถช่วยลดปัญหาเนื่องจากการก่อก้อนในเชื้อเพลิงได้ด้วย

2.7 ปัญหาการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุเบต

ในปัจจุบัน มีนักวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาเกี่ยวกับการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล เช่น การจับตัวกันของเบต (bed agglomeration) แสกกิ้ง (slagging) และ เฟาลิง (fouling) ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในระบบเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบต เมื่อเผาชีวมวลที่มีสารประกอบอัลคาไลอยู่ในถ้ำสูง และใช้ทรายควอตซ์เป็นวัสดุเบต การจับตัวกันของวัสดุเบตนั้นทำให้เกิดการหยุดชะงักของการเกิดฟลูอิดซ์เซชันแม้ว่าอุณหภูมิในบริเวณเบตจะต่ำก็ตาม (มักพบในการเผาไหม้ชีวมวล) และสุดท้ายก็จะนำไปสู่การหยุดการทำงานของระบบโดยสมบูรณ์ (Chaivatamaset et al., 2011; Saenger et al., 2001; Yu et al., 2011) ผู้วิจัยบางท่านได้กล่าวถึงและทำการทดลองเพื่อลดการจับตัวของเบตโดยใช้วัสดุเบตทางเลือก และสารเติมชนิดต่างๆ (Arvelakis et al., 2001; Shimizu et al., 2006; Sun et al., 2008a)

Saenger และคณะ (Saenger et al., 2001) ทำการทดลองเผาไหม้เปลือกกาแฟ ซึ่งมีโพแทสเซียมในถ้ำสูง (37-38% โดยน้ำหนัก ในรูปขององค์ประกอบออกไซด์) ในเตาเผาแบบฟลูอิดซ์เบตขนาดเล็ก ในการทำการทดลอง เปลือกกาแฟถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาสองในสองลักษณะ คือป้อนเข้าสู่บริเวณเบต และป้อนเข้าสู่บริเวณเหนือเบต ผลการทดลองพบว่า ระหว่างการเผาไหม้โดยใส่เชื้อเพลิงเข้าไปในเบต อุณหภูมิสูงสุด (ใน bed splash zone) ถูกควบคุมอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า การใส่เชื้อเพลิงเข้าไปเหนือเบต จากการศึกษาได้พบว่าเกิดการจับตัวของอนุภาคในเบตเกิดขึ้นเมื่อเผาเปลือกกาแฟในเตาเผาแบบฟลูอิดซ์เบตโดยใช้ทรายควอตซ์เป็นวัสดุเบต โดยเฉพาะเมื่อใส่เชื้อเพลิงเข้าไปเหนือเบต ดังแสดงในภาพที่ 2.7 จากการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการสรุปว่า ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากโลหะผสมที่เกิดบนพื้นผิวของอนุภาคทรายสัมผัสกับไอของเกลือ

โพแทสเซียมจากเถ้าของเชื้อเพลิงซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ (น้อยกว่า 700 องศาเซลเซียส) เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการ sintering ของเปลือกกาแฟ (800–900 องศาเซลเซียส)

Chaivatamaset และคณะ (Chaivatamaset et al., 2011) สังเกตการจับตัวของเบตระหว่างกาแฟไหม้กะลาปาล์มน้ำมัน และซังข้าวโพด ซึ่งมีปริมาณโพแทสเซียมในเถ้าอยู่ที่ 5.8% และ 33% โดยมวล (ในรูปของออกไซด์) ตามลำดับ ในเตาเผาแบบฟลูอิดไชต์เบตขนาดระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ทรายควอตซ์เป็นวัสดุเบต จากผลการวิจัยพบว่า อุณหภูมิที่เบต ขนาดอนุภาค และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการฟลูอิดเซชัน เป็นปัจจัยสำคัญที่จะเพิ่มอัตราการจับตัวกันของเบต ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคของวัสดุเบตถูกเคลือบโดย ternary ($K_2O-CaO-SiO_2$) eutectic systems ซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ

Arvelakis และคณะ (Arvelakis et al., 2001) ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลดีของการใช้หินปูนเป็นวัสดุเบต โดยทำการเผาไหม้ฟางข้าวสาลี และส่วนที่เหลือใช้ของมะกอกในเตาเผาแบบฟลูอิดไชต์เบต ผลการทดลองพบว่าสามารถยืดระยะเวลาในการจับตัวกันของเบตของเบตได้ เนื่องจากหินปูนมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะอัลคาไลในอัตราที่ต่ำ เมื่อเทียบกับทรายควอตซ์ ในขณะเดียวกันหินปูนก็ไม่ส่งผลกระทบต่อที่ชัดเจนต่อการปล่อย CO และ C_xH_y ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงดังกล่าว แต่หินปูนได้ดูดซับ SO_2 ซึ่งทำให้ซัลเฟอร์ในเถ้าลดลง

Sun และคณะ ได้ทำการทดลองการเผาไหม้ต้นฝ้าย ในเตาเผาชนิดฟองอากาศ (Sun et al., 2008b) และเตาเผาชนิดหมุนเวียน (Sun et al., 2008a) ในการทดลองกับเตาเผาแบบชนิดฟองอากาศ วัสดุเบตที่ใช้ คือ ทรายอลูมินา และทรายซิลิกา พบว่าเมื่อใช้ซิลิกาเป็นวัสดุเบต อนุภาคของวัสดุเบตถูกเคลือบด้วยโลหะผสม และติดอยู่ด้วยกันเกิดเป็นคอคอดระหว่างอนุภาคทราย ในขณะที่บางอนุภาคถูกเคลือบด้วยอนุภาคละเอียดของเถ้าซึ่งมี ซิลิกอน และโพแทสเซียม เป็นส่วนประกอบหลัก จากผลการทดลองในการวิจัยที่อุณหภูมิปฏิบัติการ 800 องศาเซลเซียส ความแตกต่างความดันคร่อมเบตแสดงแนวโน้มที่จะค่อยๆ ลดลง และเริ่มจะผันผวนหลังจากปฏิบัติการได้ 3 ชั่วโมง หลังจากที่ทำกาเผาทำการปฏิบัติการได้ 10 ชั่วโมง พบว่าความแตกต่างความดันลดลงอีกทั้งยังเกิดความผันผวนตลอดเวลาซึ่งสุดท้ายแล้วนำไปสู่การหยุดปฏิบัติการของเตาเผา อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบต เตาเผาสามารถปฏิบัติการได้ 38 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเบต 880 องศาเซลเซียส โดยไม่มีการจับตัวกันของเบตเกิดขึ้น

Shimizu และคณะ (Shimizu et al., 2006) ทำการทดลองเผาไหม้เม็ดซีตาร์ โดยใช้ทรายอลูมินาแบบพูนเป็นวัสดุเบตทางเลือกในเตาเผาแบบ bubbling ฟลูอิดไชต์เบตจากการทดลองพบว่า เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถถูกเผาไหม้ได้ที่อุณหภูมิสูง (950 องศาเซลเซียส) โดยไม่เกิดการจับตัวของเบต

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และกระบวนการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ถูกแบ่งรูปแบบของการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ 1) การวิจัยเพื่อหาแนวโน้มการลดของ NO_x โดยใช้เทคนิคการเผาไหม้ร่วม (co-firing) และการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (fuel staging) และ 2) การวิจัยเพื่อป้องกันการเกาะตัวกันของวัสดุเบดด้วยการใช้วัสดุเบดทางเลือก ในบทนี้อธิบายวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งกระบวนการในการดำเนินการวิจัย ตลอดทั้งโครงการวิจัย

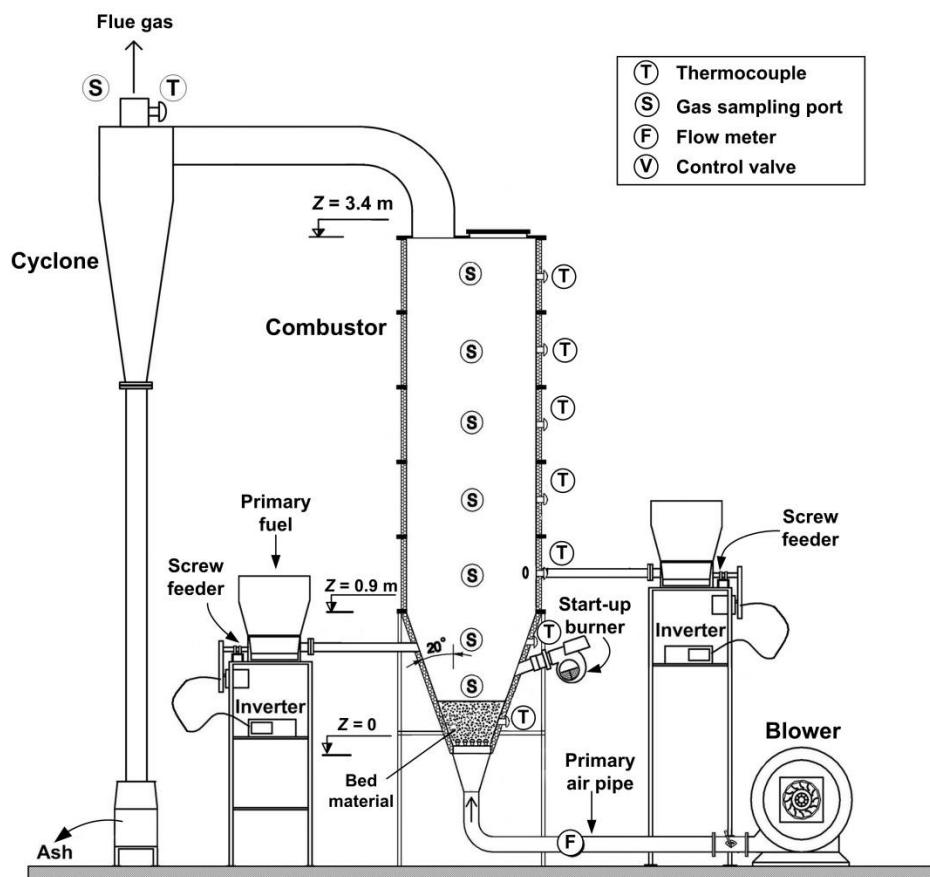
3.1 ชุดการทดสอบ

ในการวิจัยนี้ การทดลองทั้งหมดถูกทดลองในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบทรงกรวยดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยเตาผานี้ถูกออกแบบให้สามารถเชื้อเพลิงได้หลากหลายเช่น ถ่านหิน และชีวมวลชนิดต่าง โดยมีขนาดการออกแบบให้สามารถรับภาระความร้อนได้สูงสุดประมาณ 350 kWth จากภาพที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าเตาผานี้ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ (1) ส่วนทรงกรวยมุม 40° ความสูง 1 m ติดตั้งอยู่ด้านล่างของเตา (2) ส่วนทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.9 m ความสูง 2.5 m ซึ่งประกอบมาจาก ทรงกระบอก 5 ชั้น แต่ละชั้นสูง 0.5 m เตาเผาสร้างมาจากเหล็กเคลือบกันสนิม (galvanized steel) หนา 4.5 cm และถูกหุ้มฉนวนภายในด้วยปูนซีเมนต์ นอกจากตัวเตาเผาแล้ว มีการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ 8 ตัว (thermocouple of type K ความแม่นยำในการวัด $\pm 0.5^\circ\text{C}$) ตลอดความสูงของเตาและที่ปลายปล่องไอเสียเพื่อทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาระหว่างการเผาไหม้ โดยหัววัดอุณหภูมิทุกตัวเชื่อมต่อกับ data logger ซึ่งสามารถแสดงอุณหภูมิทุกจุดได้พร้อมกัน

แต่อย่างไรก็ตาม เตาผานี้ได้ถูกออกแบบให้มีการเผาไหม้แบบทั่วไป (conventional combustion) โดยการป้อนเชื้อเพลิงตำแหน่งเดียวและมีการจ่ายอากาศหลักเพื่อการเผาไหม้เท่านั้น ดังนั้นก่อนทำการทดลอง จำเป็นต้องมีการปรับปรุง ต่อเติม อุปกรณ์ ต่างๆ เพื่อให้ชุดทดลองสามารถทำงานได้ตามหลักการของการเผาไหม้แบบจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น (ต้องมีการจ่ายเชื้อเพลิงต่างระดับ) ดังนั้นจึงมีการติดตั้งชุดป้อนเชื้อเพลิงตัวที่สองเข้าไปกับตัวเตาที่ระยะ 1.15 m (วัดจากหัวจ่ายอากาศ)

อากาศที่ใช้เผาไหม้ถูกป้อนเข้าเตาโดยเครื่องจ่ายอากาศขนาด 25 แรงม้า ผ่านท่อขนาด 10 cm หัวกระจายอากาศถูกใช้เพื่อการกระจายอากาศและการสร้างฟลูอิดไธซ์เซชันภายในเตาให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัดของเตาเผา

ในระหว่างกระบวนการเริ่มติดเตา หัวเผาน้ำมันดีเซลถูกใช้สำหรับการอุ่นวัสดุเบด เมื่อทรายอมความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 700°C ซึ่งสูงเพียงพอต่อการติดไฟของชีวมวล ก็จะหยุดการจ่ายน้ำมัน จากนั้นจะเริ่มการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล



ภาพที่ 3.1 เตาเผาฟลูอิด์เบดแบบทรงกรวยที่ใช้ในการทดลอง

3.2 เชื้อเพลิง

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้เชื้อเพลิง 3 ชนิดคือ 1) แกลบอัดเม็ด และ 2) แกลบขึ้น (ใช้สำหรับการวิจัยเพื่อลดการปล่อย NO_x) และ 3) กะลาปาล์มใช้สำหรับการวิจัย ลักษณะโดยทั่วไปของเชื้อเพลิงแสดงในภาพที่ 3.2 จากภาพจะเห็นได้ว่าแกลบอัดเม็ดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 mm ความยาว 5–15 mm สำหรับแกลบขึ้นมีความยาวสูงสุดประมาณ 5 mm ส่วนกะลาปาล์มที่แสดงในภาพเป็นชีวมวลที่ผ่านการบดเนื่องจากกะลาปาล์มที่รับมาจากแหล่งผลิตมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสมกับการป้อนด้วยระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู โดยขนาดหลังการบดและร่อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 9 mm

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด จากตารางที่ 3.1 พบว่าแกลบอัดเม็ดและกะลาปาล์มมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอน (C) ในปริมาณที่สูงและมีค่าความร้อนต่ำอยู่ในระดับปานกลาง (สามารถเปรียบเทียบกับถ่านหินคุณภาพปานกลาง) แต่สำหรับแกลบขึ้นจะเห็นได้ว่า มีค่าความร้อนต่ำที่ต่ำเนื่องจากมีปริมาณความชื้นสูง ดังนั้นหากทำการเผาไหม้แกลบที่มีความชื้นอาจทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพต่ำได้

(ก)



(ข)



(ค)



ภาพที่ 3.2 ลักษณะทั่วไปของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ (ก) แกลบอัดเม็ด (ข) แกลบขึ้น (ค) กะลาปาล์ม

ในด้านองค์ประกอบของเถ้า (fuel ash analysis) จะสังเกตได้ว่าแกลบอัดเม็ดมีส่วนประกอบของ SiO_2 สูง แต่มี องค์ประกอบของ K_2O ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นปัญหาการเกาะตัวของวัสดุเบด จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นต่ำ เมื่อเทียบกับกะลาปาล์มที่ $\text{K}_2\text{O} = 8.12\%$

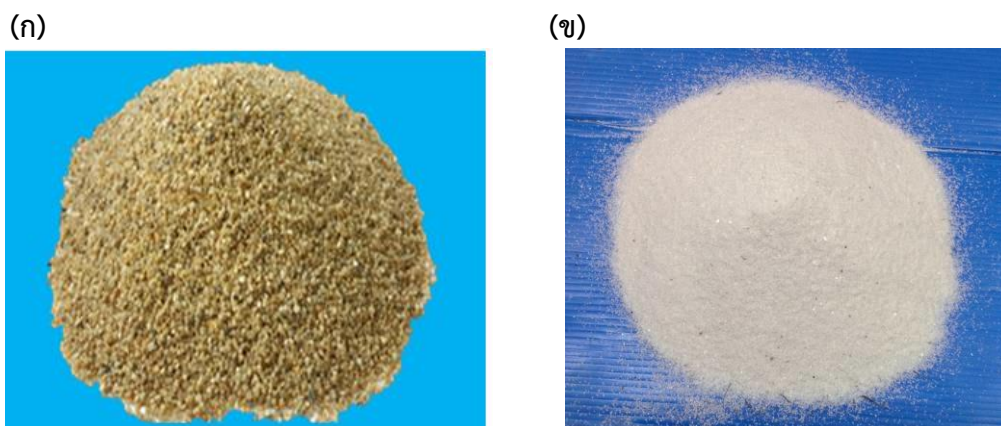
ในการวิจัยนี้ แกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักและเชื้อเพลิงรองตามลำดับ ในการทดสอบเพื่อลดการปล่อย NO_x สาเหตุที่ใช้แกลบอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงหลัก เนื่องจาก เป็นเชื้อเพลิงที่หาง่าย และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการเผาไหม้ (ดังแสดงในตารางที่ 3.1) สำหรับการเลือกเชื้อเพลิงรองจะมีเงื่อนไขในการเลือกคือ 1) จะต้องเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำเพราะจะไม่ทำให้อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งการป้อนเชื้อเพลิงรองสูงมากเกินไป 2) เป็นเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบไนโตรเจนต่ำ (N) 3) มีส่วนประกอบของโพแทสเซียม (K) ในเถ้าต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ แกลบขึ้น เพื่อสร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการสลาย/ขัดขวางการเกิด NO_x ระหว่างการเผาไหม้

ในการวิจัยนี้ได้นำเชื้อเพลิงที่มีความชื้นในเชื้อเพลิงสูงเข้ามาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วยเนื่องจากเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงนั้นสามารถช่วยลดการเกิดก๊าซไนตริกออกไซด์ ได้อีกทั้งการวิจัยนี้ยังสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเชื้อเพลิง 2 ชนิดได้คือ แกลบ และ แกลบขึ้น เพื่อทำการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซไนตริกออกไซด์ของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดนี้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิง	แกลบอัดเม็ด	แกลบชั้น	กะลาปาล์ม
<i>Proximate analysis (wt.%)</i>			
W	9.81	29.56	5.4
VM	64.9	41.9	71.1
FC	15.39	14.33	18.8
A	9.90	14.21	4.7
<i>Ultimate analysis (wt.%)</i>			
C	43.47	29.94	48.06
H	5.04	3.01	6.38
O	31.17	22.93	1.27
N	0.59	0.34	34.10
S	0.02	0.01	0.09
<i>Fuel ash analysis (wt.%)</i>			
SiO ₂	83.28	88.45	54.12
Al ₂ O ₃	0.06	0.11	3.10
K ₂ O	6.68	5.82	8.12
CaO	6.63	3.00	23.21
Na ₂ O	0.02	0.02	0.81
MgO	0.90	0.29	2.65
Fe ₂ O ₃	1.16	0.14	6.14
P ₂ O ₅	0.2	1.4	1.15
Cl	0.40	0.62	0.20
<i>Lower heating value (kJ/kg)</i>	15,100	10,600	16,300

วิธีการเตรียมแกลบชั้นเริ่มจาก ทำการส่งตรวจเชื้อเพลิงแกลบว่าเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้วิจัยนี้มี ค่าความชื้นในเชื้อเพลิง %db ในการวิจัยนี้ต้องการวิจัยแกลบที่มีความชื้นประมาณ 30 %db ดังนั้นจึงทำการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องใส่เพิ่มเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงแกลบโดยใช้วิธีการคำนวณในสมการที่ 3.1



ภาพที่ 3.3 วัสดุเบตที่ใช้ในการเผาไหม้ (ก) ทรายซิลิกา และ (ข) ทรายอะลูมินา

$$M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \quad (3.1)$$

โดย M_w คือ มวลของน้ำ (%wb)

M_d คือ มวลของน้ำรวมกับเชื้อเพลิง (%db)

สำหรับการป้องกันการเกิดการจับตัวของวัสดุเบตจะใช้กาลาปาล์มเนื่องจากมีส่วนประกอบของ K ค่อนข้างสูง เพราะ K เป็นสาเหตุหลักของการเกิดปัญหาดังกล่าว

3.3 วัสดุเบต

ในการวิจัยสำหรับการหาวิธีการลดการปล่อย NO_x ได้ใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบต เพราะโดยปกติแล้ว ทรายซิลิกาเป็นทรายที่ถูกใช้ในการเผาไหม้แบบฟลูอิดไซ์เบต และเนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าของแกลบอัดเม็ด และแกลบขึ้นมีความเสี่ยงต่อการเกิดการจับตัวกันของวัสดุเบต

ในการทดลองเผาไหม้กะลาปาล์ม ได้ใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบตเพื่อป้องกันการเกิดการจับตัวกันของวัสดุเบต ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าของกะลาปาล์มมีความเสี่ยงต่อการจับตัวกันของเบตสูง

ภาพที่ 3.3 แสดงลักษณะทั่วไปของวัสดุเบต (ทราย) ที่ใช้ในการวิจัยนี้ โดยวัสดุเบตที่ใช้มีขนาด 300–500 μm โดยเทียบได้กับอนุภาคตามการจัดแบบ Geldart (Geldart, 1973) กลุ่ม B ซึ่งจะทำให้เกิดการฟลูอิดาไอซ์แบบฟองอากาศ (bubbling fluidization) หรือ แบบปั่นป่วน (turbulent fluidization) คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุเบตถูกแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเบต

วัสดุเบต	องค์ประกอบ (คิดเป็น oxides, wt.%):						
	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Fe_2O
ทรายซิลิกา	6.59	87.82	0.06	0.13	4.24	0.27	0.55
ทรายอะลูมินา	87.18	12.29	0.04	-	0.43	0.01	0.01

3.4 วิธีดำเนินการ

ในโครงการวิจัยนี้จะมีการทดสอบหลายกรณีศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการปลดปล่อยมลภาวะของการเผาไหม้ด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งแสดงในตาราง 3.3

จากตารางจะเห็นได้ว่า ปริมาณความร้อนป้อนรวม (heat input) เข้าสู่เตาเผา ถูกกำหนดให้มีปริมาณเท่ากันที่ประมาณ 200 kW_{th} ทั้งนี้ เพื่อให้ผลการทดสอบ สามารถเปรียบเทียบกันได้ ทั้งนี้ปริมาณ

ตารางที่ 3.3 กรณีศึกษาและตัวแปรที่ศึกษาและควบคุมและช่วงของการทดสอบ

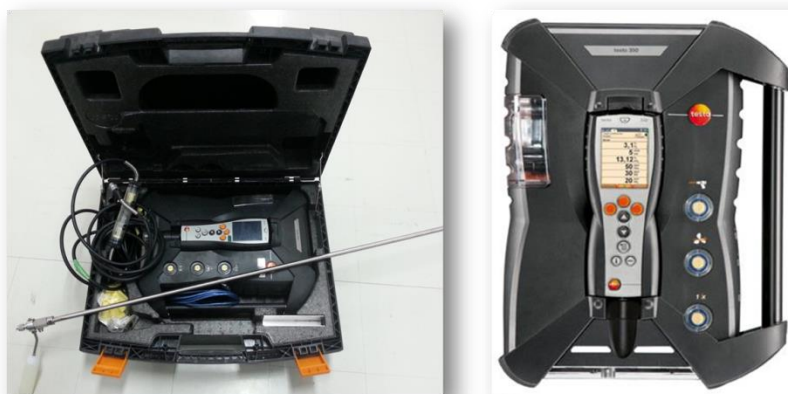
การทดสอบ	ตัวแปรที่ศึกษาและควบคุม	ช่วงการทดลอง
กรณีศึกษาที่ 1: การเผาไหม้แบบปกติไม่มีการใช้การเผาไหม้ซ้ำ (ใช้เพื่อเป็นกรณีเปรียบเทียบการปลดปล่อยของมลพิษ)	ปริมาณความร้อนป้อนรวม (heat input) เข้าสู่เตาเผา	200 kW _{th}
	อากาศส่วนเกิน excess air (EA)	20–80%
กรณีศึกษาที่ 2: การเผาไหม้ร่วม (co-combustion) ด้วยการใช้เชื้อเพลิงผสม (pre-mixed biomass fuels)	ปริมาณความร้อนป้อน	200 kW _{th}
	สัดส่วนของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำในเชื้อเพลิงผสม (energy fraction (EF ₂) of secondary fuel in fuel blend)	0.1–0.4
	อากาศส่วนเกิน	20–80%
กรณีศึกษาที่ 3: การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เทคนิคการเผาไหม้แบบจ่ายเชื้อเพลิงต่างระดับ (fuel staging)	ปริมาณความร้อนป้อนเข้าสู่เตาเผา	200 kW _{th}
	อากาศส่วนเกิน	20–80%
	สัดส่วนของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำในปริมาณการป้อนพลังงานความร้อนรวม Energy fraction (EF ₂) of secondary fuel in total fuel supply	0.1–0.4
	อัตราส่วนอากาศรองต่ออากาศรวม Secondary-to-total air ratio (SA/TA)	0.05–0.20
กรณีศึกษาที่ 4: การเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบด	ปริมาณความร้อนป้อนเข้าสู่เตาเผา	200 kW _{th}
	อากาศส่วนเกิน	20–80%

ความร้อนป้อนสามารถคำนวณได้จาก อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (สัดส่วนของเชื้อเพลิงหลัก และ เชื้อเพลิงรอง) คูณกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ในการวิจัยนี้จะทำการกำหนดปริมาณส่วนเกินเท่ากันทุกการทดลอง คือ 20% 40% 60% และ 80%

3.4.1 การวัดผลการทดลอง

ตัวแปรที่ทำการวัดในขณะที่ทำการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วย อุณหภูมิ ความเข้มข้นของออกซิเจน และความเข้มข้นของก๊าซมลพิษ NO_x CO และ C_xH_y โดยทำการวัดตามความสูงของเตาเผา และที่ทางออกของไซโคลน โดยมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบการเผาไหม้ และการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาฟลูอิดไธเบต โดยอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิคือ Chromel-alumel thermocouples type K โดยติดตั้งไว้ที่ระดับต่างๆ ตามความสูงของเตาเผาเพื่อวัดอุณหภูมิภายในเตา เช่นเดียวกันกับที่ทางออกของไซโคลน thermocouple ทุกตัวเชื่อมต่อกับ data logger ซึ่งสามารถแสดงอุณหภูมิทุกจุดได้พร้อมกัน

ในการปฏิบัติการแต่ละครั้ง ปริมาณอากาศส่วนเกินสามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าความเข้มข้นของ O_2 , CO และ C_xH_y ที่ทางออกของไซโคลน อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซ (ไอเสีย) คือ เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Testo-350 (Testo Germany) ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย Testo-350 (Testo Germany)

3.4.2 การคำนวณอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลัก

ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงหลักและเชื้อเพลิงรองขึ้นอยู่กับสัดส่วนพลังงานของแต่ละเชื้อเพลิง โดยกำหนดให้ EF_2 เป็นส่วนส่วนความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงรอง ซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเชื้อเพลิงรอง MF_2 ในการป้อนเชื้อเพลิงทั้งหมด โดยสามารถคำนวณได้จากอัตราการป้อนเชื้อเพลิงหลัก ($\dot{m}_{f1}$) และเชื้อเพลิงรอง ($\dot{m}_{f2}$) ดังสมการ

$$\text{MF}_{f2} = \frac{\dot{m}_{f2}}{\dot{m}_{f1} + \dot{m}_{f2}} \quad (3.2)$$

EF_2 คำนวณได้จากค่าความร้อนต่อของเชื้อเพลิงหลัก LHV_{f1} และเชื้อเพลิงรอง LHV_{f2}

$$EF_{f2} = \frac{MF_{f2} LHV_{f2}}{(1 - MF_{f2}) LHV_{f1} + MF_{f2} LHV_{f2}} \quad (3.3)$$

3.4.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้

ปริมาณอากาศตามทฤษฎี (the theoretical volume of air, m^3/kg , at $0^\circ C$ and $1\ atm$) ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม ภายใต้สภาวะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (stoichiometric conditions) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.4 โดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง

$$V^0 = 0.089(C + 0.375S) + 0.265H - 0.033O \quad (3.4)$$

ปริมาณไอเสียแห้ง (volume of dry flue gas, V_{dg} , m^3/kg , under standard conditions), ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม สามารถคำนวณจากสมการที่ 3.5

$$V_{dg} = V_{RO_2} + V^0_{N_2} + (\alpha - 1)V^0 \quad (3.5)$$

โดยที่ V_{RO_2} และ $V^0_{N_2}$, สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

$$V_{RO_2} = 0.01866(C + 0.375S) \quad (3.6)$$

$$V^0_{N_2} = 0.79V^0 + 0.08N \quad (3.7)$$

ในการทดสอบการเผาไหม้ พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวกำหนดสภาวะการทำงานคือ อากาศส่วนเกิน (excess air, EA) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (excess air ratio, α) โดยใช้ข้อมูลของปริมาณออกซิเจน (O_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ (C_xH_y เทียบเป็น CH_4) ที่วัดได้ ณ ทางออกของปล่องไอเสีย อัตราส่วนอากาศส่วนเกินคำนวณจากสมการที่ 3.8

$$\alpha = \frac{21}{21 - (O_2 - 0.5CO - 2CH_4)} \quad (3.8)$$

ปริมาณเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (EA, %) คำนวณจากสมการที่ 3.9

$$\%EA = 100(\alpha - 1) \quad (3.9)$$

3.4.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาสามารถคำนวณได้โดยวิธีความร้อนสูญเสีย (the heat-loss method) (Basu P. et al., 2000) ซึ่งรวมผลของความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (incomplete combustion) และ ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ ตามสมการ 3.10

$$\eta_c = 100 - (q_{ic} + q_{uc}) \quad (3.10)$$

- ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ความร้อนที่สูญเสียจากคาร์บอนส่วนที่ไม่เผาไหม้จำเป็นที่จะต้องหาจากถ้ำที่เกินออกมาจากกระบวนการการเผาไหม้ โดยค่าการสูญเสียความร้อนเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ในถ้ำ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.11

$$q_{uc} = 32,866 \left(\frac{C_c}{100 - C_c} \right) A \frac{(100)}{LHV} \quad (3.11)$$

โดย C_c คือ คาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ที่อยู่ในถ้ำ (คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก)

A คือ ปริมาณถ้ำของเชื้อเพลิง (คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)

- ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์สามารถคำนวณได้จาก ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ก๊าซไฮโดรเจน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่วัดได้ ณ ทางออกของปล่องไอเสียของเตาเผา ปริมาณความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.12

$$q_{ic} = (126.4CO + 358CH_4) \times V_{dg} \frac{(100)}{LHV} \quad (3.12)$$

3.4.5 การหาจุดเหมาะสมการทำงานของเตาเผาไหม้

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีการหาจุดเหมาะสมโดยวิธีอ้างอิงต้นทุน (cost-based approach) (Kuprianov, 2005; Kuprianov et al., 2011) เพื่อทำการหาอากาศส่วนเกินและอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลักที่เหมาะสมที่สุด วิธีการนี้จะให้ค่าต่ำสุดของต้นทุนสำหรับการลดมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ชีวมวล โดยมีสมการกำหนดเป้าหมาย (objective function) ดังแสดงในสมการ 3.13

$$J_{ec} = \text{Min}(P_{\text{NO}_x} \dot{m}_{\text{NO}_x} + P_{\text{CO}} \dot{m}_{\text{CO}} + P_{\text{C}_x\text{H}_y} \dot{m}_{\text{C}_x\text{H}_y}) \quad (3.13)$$

โดย P_{NO_x} คือ ต้นทุนของการลด NO_x (US\$/t)

P_{CO} คือ ต้นทุนของการลด CO (US\$/t)

$P_{\text{C}_x\text{H}_y}$ คือ ต้นทุนของการลด C_xH_y (พิจารณาให้เป็น CH_4) (US\$/t)

$\dot{m}_{\text{NO}_x}$ คือ อัตราการปล่อย NO_x (kg/s)

$\dot{m}_{\text{CO}}$ คือ อัตราการปล่อย CO (kg/s)

$\dot{m}_{\text{C}_x\text{H}_y}$ คือ อัตราการปล่อย C_xH_y (kg/s)

ซึ่ง $P_{\text{NO}_x} = 2400$ US\$/t และ $P_{\text{C}_x\text{H}_y}$ หรือ $P_{\text{CH}_4} = 330$ US\$/t (ESCAP-UN, 1995) แต่สำหรับค่าต้นทุนการลด CO ยังไม่มีค่าแนะนำไว้ในเอกสารหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แต่อย่างไรก็ตามได้มีการแนะนำว่า อัตราส่วนระหว่างค่าของการลด NO_x ต่อ CO ($P_{\text{NO}_x} / P_{\text{CO}}$) ควรอยู่ระหว่าง 5 ถึง 8 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ใช้ค่าต้นทุนของการลด CO หรือ P_{CO} เป็น 400 US\$/t (Salisdisouk, 1994; Wei, 2003)

อัตราการปล่อยมลพิษสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.14–3.16 โดยการนำค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/s) และค่าความเข้มข้นของมลพิษ (ppm) ที่วัดได้ที่ปล่องควันมาทำการคำนวณ

$$\dot{m}_{\text{NO}_x} = 2.05 \times 10^{-6} \dot{m}_f \text{NO}_x V_{\text{dg}} \quad (3.14)$$

$$\dot{m}_{\text{CO}} = 1.25 \times 10^{-6} \dot{m}_f \text{CO} V_{\text{dg}} \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_{\text{C}_x\text{H}_y} = 0.71 \times 10^{-6} \dot{m}_f \text{C}_x\text{H}_y V_{\text{dg}} \quad (3.16)$$

ค่า V_{dg} สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.5

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปราย

จากกระบวนการวิจัยในบทที่ 3 ได้แบ่งการวิจัยเป็น 4 กรณีศึกษา ดังนั้นผลการวิจัยและการอภิปรายในบทนี้ถูกแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ คือ ผลการทดลองจาก 1) การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยวิธีปกติ (conventional combustion) 2) การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วม (co-firing) 3) การเผาไหม้ชีวมวลด้วยเทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น (fuel-staging) และ 4) การเผาไหม้ชีวมวลโดยใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบด

4.1 การเผาไหม้แกลบอัดเม็ดด้วยวิธีการเผาไหม้ฟลูอิดไชด์แบบปกติ

4.1.1 สมรรถนะการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไชด์เบด

ในการเผาไหม้ด้วยวิธีปกติเป็นการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียวและมีการอากาศเผาไหม้เพียงแหล่งเดียว ทั้งนี้ ผลที่ได้จากการทดลองจะถูกใช้เพื่อเป็นกรณีเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้ร่วมและการจ่ายอากาศเป็นชั้น เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการลดการปล่อย NO_x ของวิธีการดังกล่าว

ตารางที่ 4.1 แสดงมลพิษหลัก (CO , C_xH_y และ NO) และประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไชด์แบบทรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้แกลบอัดเม็ดที่อากาศส่วนเกินตั้งแต่ 20 ถึง 80% จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าการปล่อย CO และ C_xH_y มีค่าสูงสุดเมื่อใช้อากาศส่วนเกินต่ำสุด เป็นผลมาจากการที่มีปริมาณออกซิเจนไม่มากพอสำหรับการไหม้ที่สมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตาม CO และ C_xH_y สามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ สำหรับการปลดปล่อย NO จากเตาเผา จะเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับ CO และ C_xH_y คือจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ เนื่องจากการลดลงของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนในห้องเผาไหม้ของเตาเผา ทำให้การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของ NO ด้วย CO และ C_xH_y ลดลง ตามกลไกการก่อตัวและสลายตัวของ NO แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการปล่อยมลพิษจากเตาเผาฟลูอิดไชด์เบดยังมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม F ที่กำหนดให้การปล่อย CO ไม่เกิน 740 ppm และ NO ไม่เกิน 205 ppm

ตารางที่ 4.1 สมรรถนะการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไชด์เบดเมื่อแกลบอัดเม็ดด้วยเผาไหม้แบบปกติ

อากาศส่วนเกิน (%)	O_2 ที่ป้อนไอเสีย (%)	คาร์บอนในเถ้าลอย (wt.%)	CO^a (ppm)	C_xH_y^a (ppm)	NO^a (ppm)	ความร้อนสูญเสีย (%) เนื่องจาก:		ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (%)
						คาร์บอนไม่เผาไหม้	เผาไหม้ไม่สมบูรณ์	
21	3.69	3.63	709	290	120	0.81	0.74	98.4
41	6.15	3.15	373	98	161	0.70	0.31	99.0
62	8.05	2.09	184	61	191	0.46	0.17	99.4
77	9.14	1.98	158	46	215	0.44	0.14	99.4

^a ปรับแก้เป็นค่าที่ O_2 6%

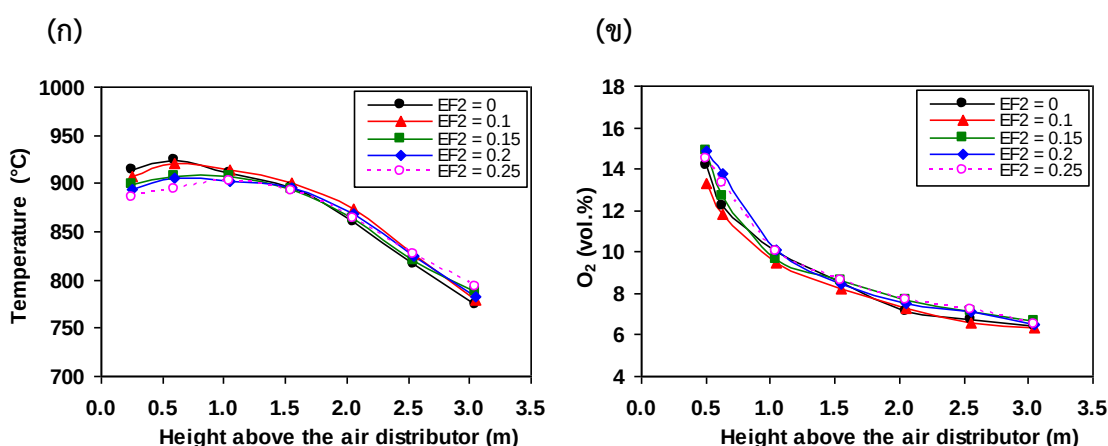
จากตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาในช่วงการทำงานที่กำหนดจะอยู่ในช่วง 98.4–99.4% จากตารางจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้น เมื่ออากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มอากาศส่วนเกินจะทำให้การเผาไหม้ของ CO และ C_xH_y มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4.2 การเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้น

4.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนภายในเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม

ภาพที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนภายในเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นในอัตราส่วนต่างกัน ที่อากาศส่วนเกินคงที่ประมาณ 40% โดยทำการวัด ณ ตำแหน่งแกนกลางของเตาตลอดความสูงของเตา จากกราฟในภาพ 4.1 จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิของการทดลองมีลักษณะคล้ายกัน คือ มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในส่วนทรงกรวยของเตาเผา (ความสูงต่ำกว่า 0.9 m) จากนั้นค่อยๆ ลดลงตามระดับความสูงของเตา ในกรณีการเผาไหม้แบบปกติ ($EF_2 = 0$) อุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเกิดขึ้นที่ระยะความสูงประมาณ 0.6 m ทั้งนี้เนื่องจากแกลบอัดเม็ดที่ใช้มีความหนาแน่นและน้ำหนักค่อนข้างสูงจึงทำให้เชื้อเพลิงส่วนใหญ่เกิดการผสม (mixing) กับเบดที่บริเวณด้านล่างของเตาและการเผาไหม้ก็เกิดขึ้นอย่างรุนแรงที่บริเวณนี้ แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองในเชื้อเพลิงผสมมากขึ้น จะสังเกตได้ว่าค่าสูงสุดของอุณหภูมิเกิดขึ้นที่ระยะความสูงประมาณ 0.9 m ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อเพลิงรอง (แกลบขึ้น) ที่มีความหนาแน่น ขนาด และน้ำหนักต่ำกว่าแกลบอัดเม็ดถูกยกตัวขึ้นมาจากเบด โดยอากาศที่เป่าเข้าเตาจากด้านล่าง และเชื้อเพลิงเหล่านี้ถูกเผาไหม้ที่ระยะสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีการเผาไหม้ร่วมมีค่าต่ำกว่าการเผาไหม้แบบปกติ เนื่องจากแกลบขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาตกลง ในส่วนที่เป็นทรงกระบอกของเตาเผา (ระยะตั้งแต่ 0.9 m ขึ้นไป) มีการลดลงของอุณหภูมิของการทดลองเนื่องจากการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา

การกระจายตัวของออกซิเจนภายในเตามีแนวโน้มลดลงตลอดความสูงของเตาเนื่องจากออกซิเจน

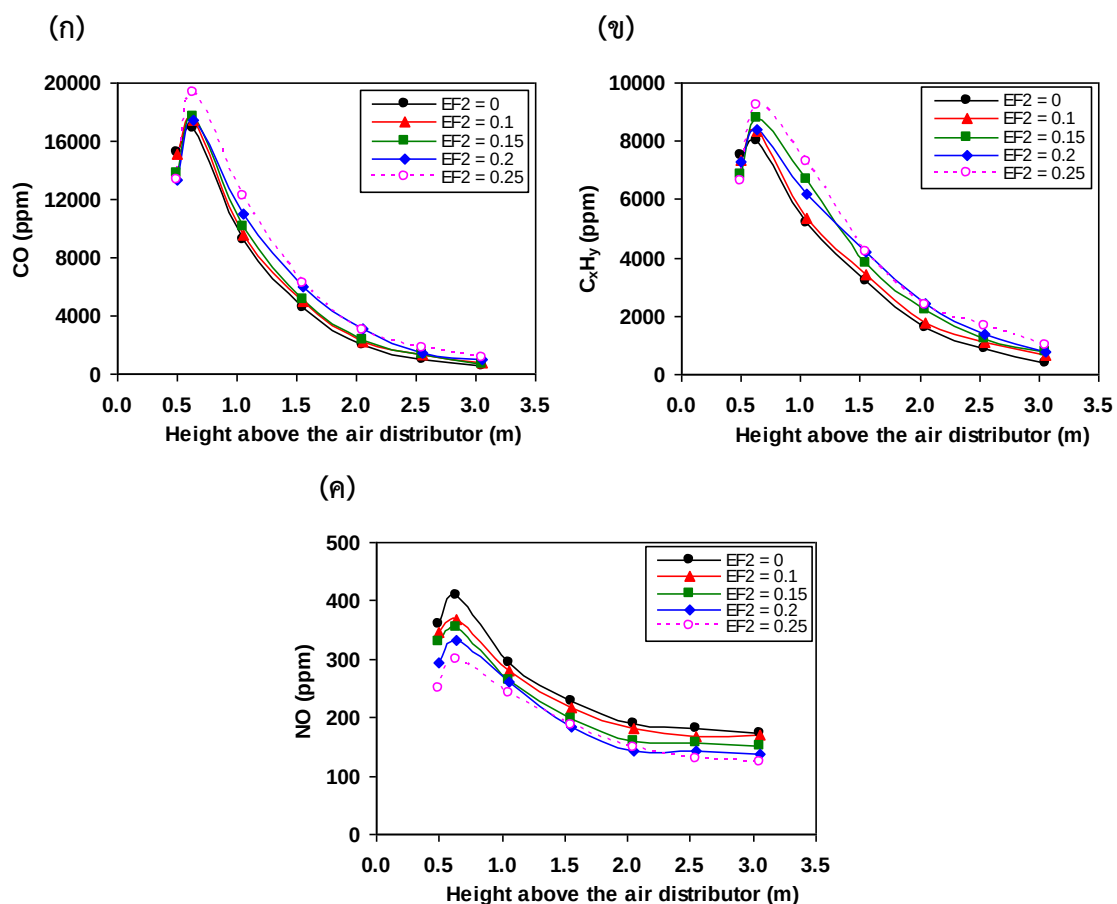


ภาพที่ 4.1 การกระจายตัวของ (ก) อุณหภูมิ และ (ข) ออกซิเจนวัดตามระดับความสูงที่ตำแหน่งแกนกลางเตาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) ในเชื้อเพลิงผสมต่างกันโดยใช้อากาศส่วนเกินประมาณ 40%

ถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะสังเกตได้ว่า การลดลงของออกซิเจนในส่วนทรงกรวยเกิดมีอัตราสูงกว่า ส่วนทรงกระบอกของเตา เนื่องจากการเผาไหม้เกิดขึ้นในส่วนทรงกระบอกเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองมากขึ้น ออกซิเจนในส่วนทรงกรวยก็ถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้มากขึ้น ดังสังเกตได้ การลดลงอย่างรวดเร็วของเส้นกราฟเมื่อเทียบกับกรณีปกติ ซึ่งมีความสอดคล้องกับลักษณะการกระจายตัวของ อุณหภูมิ

4.2.2 ความเข้มข้นของ CO C_xH_y และ NO ภายในเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม

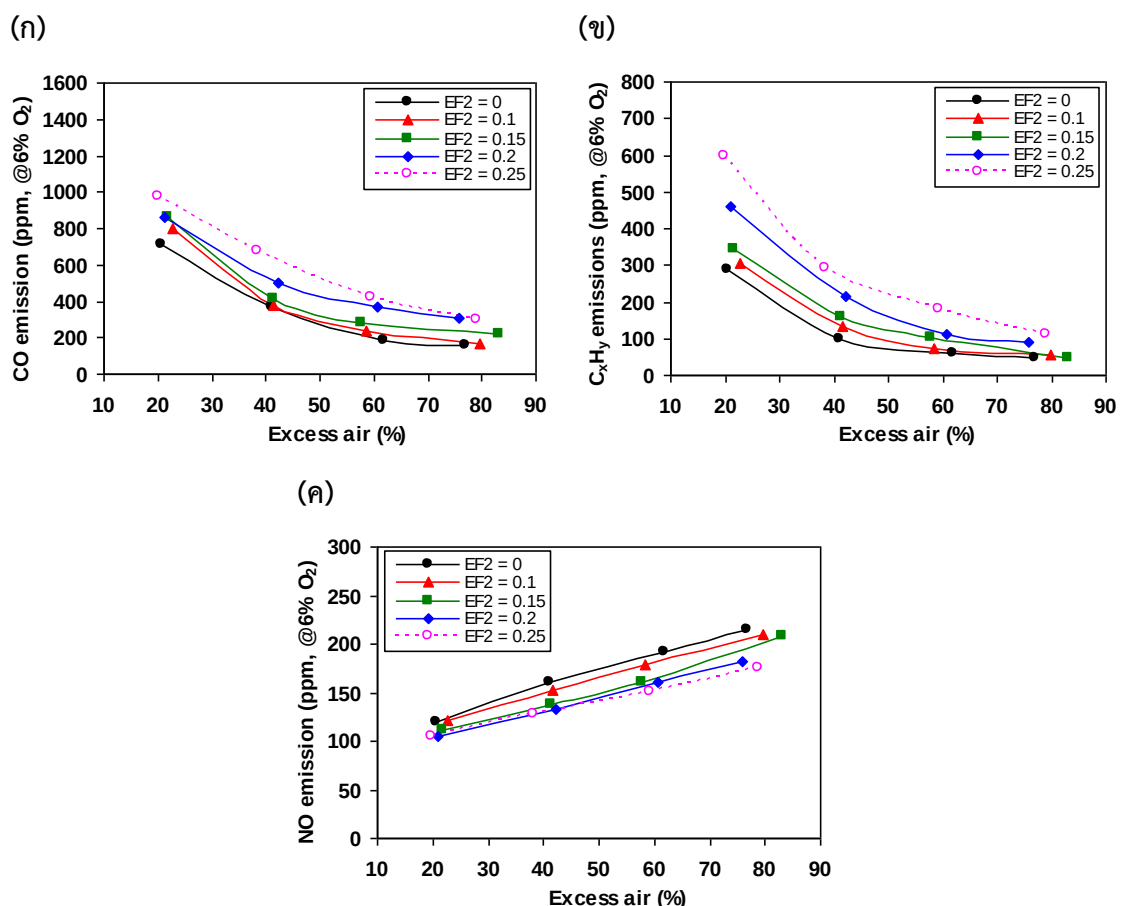
การกระจายตัวของ CO C_xH_y และ NO ภายในเตาเผาตามแนวความสูง เมื่อทำการเผาไหม้ร่วม ระหว่างแก๊สอัดเม็ดและแก๊สชั้นที่สัดส่วนพลังงาน (EF_2) ต่างกันโดยทำการทดลองที่อากาศส่วนเกิน ประมาณ 40% แสดงในภาพที่ 4.2 จากลักษณะการกระจายตัวของมลพิษหลัก CO C_xH_y และ NO ในภาพที่ 4.2 ทำให้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงตามระดับความสูงของเตาเผา บ่งชี้ถึงการก่อตัว (formation) ของแก๊ส มลพิษและการออกซิเดชัน (สำหรับ CO และ C_xH_y) และสลายตัว/ลดลง (reduction ของ NO) (Turns, 2006)



ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของ (ก) CO (ข) C_xH_y และ (ค) NO วัดตามระดับความสูงที่ตำแหน่งแกนกลางเตา เมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแก๊สอัดเม็ดและแก๊สชั้นที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) ในเชื้อเพลิงต่างกัน โดยใช้อากาศส่วนเกินประมาณ 40%

ในช่วงแรก (ความสูงน้อยกว่า 0.6 m) เป็นช่วงที่อยู่ต่ำกว่าตำแหน่งการป้อนเชื้อเพลิง ความเข้มข้นของ CO ในภาพที่ 4.2ก มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงสุดที่ 0.6 m เนื่องจากการปล่อยสารระเหย (devolatilization) ของเชื้อเพลิงและออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) และคาร์บอนในถ่าน (Char-C) (Turns, 2006) จากภาพที่ 4.2ก เห็นได้ว่า เมื่อสัดส่วนของแกลบขึ้นในเชื้อเพลิงผสมมีมากขึ้น ความเข้มข้นของ CO ที่ตำแหน่ง 0.6 m มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเผาไหม้แบบปกติ เป็นเพราะแกลบขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดลง (ดังแสดงในภาพที่ 4.1ก) ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ในช่วงที่สอง (ความสูงมากกว่า 0.6 m) ความเข้มข้นของ CO มีการลดลงอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความสูงระหว่าง 0.6 ถึง 0.8 m การลดลงของ CO สามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง CO กับ O และไอน้ำ (Turns, 2006)

จากภาพที่ 4.2ข แนวโน้มของ C_xH_y ทุกตำแหน่งความสูงของเตามีลักษณะคล้ายกับ CO โดยปกติแล้วแหล่งกำเนิดของ C_xH_y จะมาจากสารระเหยในเชื้อเพลิงและการลดลงของ C_xH_y เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีต่อเนื่อง คือปฏิกิริยาออกซิเดชันของ C_xH_y เป็น CO จากนั้น CO จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็น CO_2 (Turns, 2006) การเพิ่มสัดส่วนแกลบขึ้นทำให้ความเข้มข้นของ C_xH_y ทุกตำแหน่งความสูงมีมากขึ้น เนื่องจากการเผาไหม้



ภาพที่ 4.3 การปล่อยมลพิษ (ก) คาร์บอนมอนอกไซด์ (ข) ไฮโดรคาร์บอน (ค) ไนตริกออกไซด์จากเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดทรงกรวยที่ทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) ในเชื้อเพลิงผสมและอากาศส่วนเกินต่างกัน

ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมสำหรับการลดความเข้มข้นของ NO (อภิปรายในหัวข้อถัดไป)

เช่นเดียวกันกับ CO และ C_xH_y ความเข้มข้นของ NO มีการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเนื่องจาก การปล่อยสารระเหยของชีวมวลและการออกซิเดชันของสารระเหยที่มีไนโตรเจน N เป็นส่วนประกอบ เช่น HCN NH_3 และกลายเป็น NO ในที่สุด (Werther et al., 2000; Winter et al., 1999) แต่อย่างไรก็ตาม NO ที่เกิดขึ้นบางส่วนก็ถูกสลายพันธะเนื่องจากปฏิกิริยาคาตาไลติก (catalytic) ระหว่าง NO กับ CO C_xH_y ถ่าน และ เถ้า เพราะฉะนั้น จึงเป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของ NO ในกรณีผสมกลับขึ้นในเชื้อเพลิงผสมที่ $EF_2 = 0.25$ มีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ เนื่องจากมีความเข้มข้น CO และ C_xH_y สูงที่สุด

4.2.3 มลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ร่วม

ภาพที่ 4.3 แสดงผลของอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองและอากาศส่วนเกินต่อความเข้มข้นของแก๊สมลพิษ CO C_xH_y และ NO (ปรับเทียบที่ 6% O_2) ที่ถูกปล่อยเตาเผาฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้น จากภาพจะเห็นได้ว่าอากาศส่วนเกินและสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองมีผลกระทบต่อการปล่อยมลพิษเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกิน (ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองคงที่) ความเข้มข้นของ CO และ C_xH_y ลดลงอย่างเป็นอย่างมาก ในทางตรงกันข้าม NO มีการเพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงรองในเชื้อเพลิงรวมที่อากาศส่วนเกินคงที่จะทำให้เกิดมีการปล่อย CO และ C_xH_y มีค่ามากขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ แต่ NO มีการลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของ CO และ C_xH_y ภายในเตามีค่าสูงขึ้น ช่วยให้ปฏิกิริยาสลายตัวของ NO เป็นไปได้ดีขึ้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการปล่อยมลพิษเหล่านี้มีแนวโน้มเป็นไปตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา

ดังนั้นการควบคุม NO สามารถทำได้โดยลดอากาศส่วนเกินและ/หรือ เพิ่มสัดส่วนเชื้อเพลิงรองในเชื้อเพลิงรวม แต่อย่างไรก็ตามควรพิจารณาถึงการปลดปล่อย CO และ C_xH_y รวมถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาด้วย

4.2.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม

ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองโดยทำการทดสอบที่อัตราอากาศส่วนเกินตั้งแต่ประมาณ 20% ถึง 40% จากตารางพบว่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนไม่เผาไหม้และการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความร้อนสูญเสียจากคาร์บอนไม่เผาไหม้เนื่องจากแกลบมีส่วนประกอบของเถ้าในเชื้อเพลิงค่อนข้างสูง (ดูตารางที่ 3.1) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของการเผาไหม้ร่วมมีค่าใกล้เคียงกับการเผาไหม้ด้วยวิธีปกติประมาณ 99% การเพิ่มอากาศส่วนเกินสามารถลดการสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้ แต่ไม่มีผลต่อความร้อนสูญเสียจากคาร์บอนไม่เผาไหม้ การเพิ่มสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเล็กน้อย

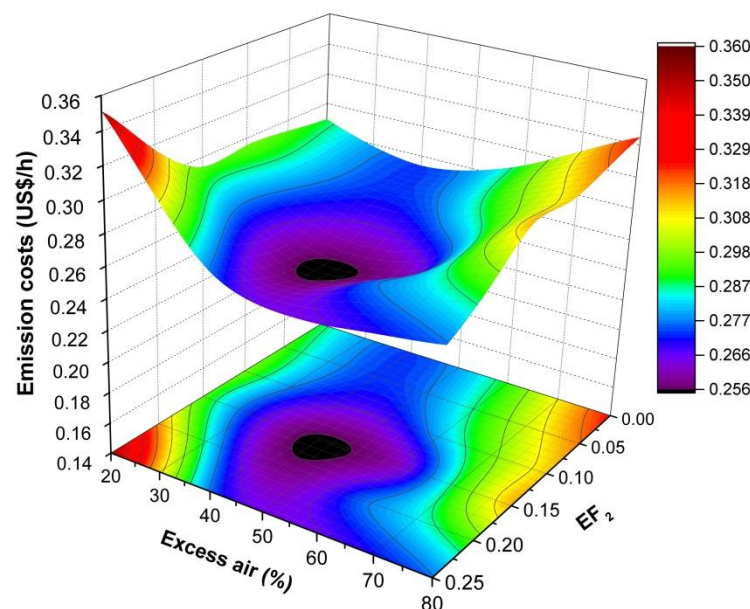
ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นที่อากาศส่วนเกินต่างกัน

อากาศ ส่วนเกิน (%)	O ₂ ที่ปล่อยไอเสีย (vol.%)	คาร์บอนใน เถ้าลอย (wt.%)	CO ^a (ppm)	C _x H _y ^a (ppm)	ความร้อนสูญเสีย (%) เนื่องจาก:		ประสิทธิภาพ การเผาไหม้ (%)
					คาร์บอนไม่เผาไหม้	เผาไหม้ไม่สมบูรณ์	
การเผาไหม้ด้วยวิธีปกติ (EF2 = 0)							
21	3.7	3.63	709	290	0.81	0.74	98.4
41	6.2	3.15	373	98	0.70	0.31	99.0
62	8.1	2.09	184	61	0.46	0.17	99.4
77	9.1	1.98	158	46	0.44	0.14	99.4
การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรอง EF2 = 0.1							
23	4.0	1.97	803	305	0.48	0.80	98.7
42	6.2	1.96	379	133	0.48	0.36	99.2
58	7.8	2.07	236	74	0.50	0.22	99.3
80	9.3	2.71	168	55	0.66	0.16	99.2
การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรอง EF2 = 0.15							
22	3.9	1.62	885	342	0.41	0.89	98.7
41	6.2	1.59	452	160	0.40	0.43	99.2
58	7.7	1.77	283	104	0.45	0.28	99.3
83	9.6	1.52	220	48	0.38	0.17	99.4
การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรอง EF2 = 0.2							
21	3.8	1.62	1044	461	0.43	1.13	98.4
42	6.3	1.35	503	213	0.36	0.53	99.1
61	8.0	1.00	365	113	0.26	0.33	99.4
76	9.1	1.35	306	89	0.36	0.27	99.4
การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรอง EF2 = 0.25							
20	3.7	1.28	1323	596	0.35	1.41	98.2
38	5.9	1.55	674	291	0.43	0.70	98.9
59	7.9	1.09	423	179	0.30	0.43	99.3
79	9.3	1.07	297	110	0.29	0.28	99.4

^aปรับแก้เป็นค่าที่ O₂ 6%

4.2.5 จุดเหมาะสมการทำงานของเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม

ภาพที่ 4.4 แสดงราคาของการปล่อยมลพิษ (emission costs, US\$/h) ของการเผาไหม้แกลบอัดเม็ดและแกลบขึ้นในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบทรงกรวยโดยคำนวณจากค่าการปล่อยมลพิษ CO C_xH_y และ NO ตามวิธีการในบทที่ 3



ภาพที่ 4.4 ผลของอากาศส่วนเกินและสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองต่อราคาการปล่อยมลพิษของการเผาไหม้
แก๊สอัดเม็ดและแก๊สขึ้นในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบทรงกรวย

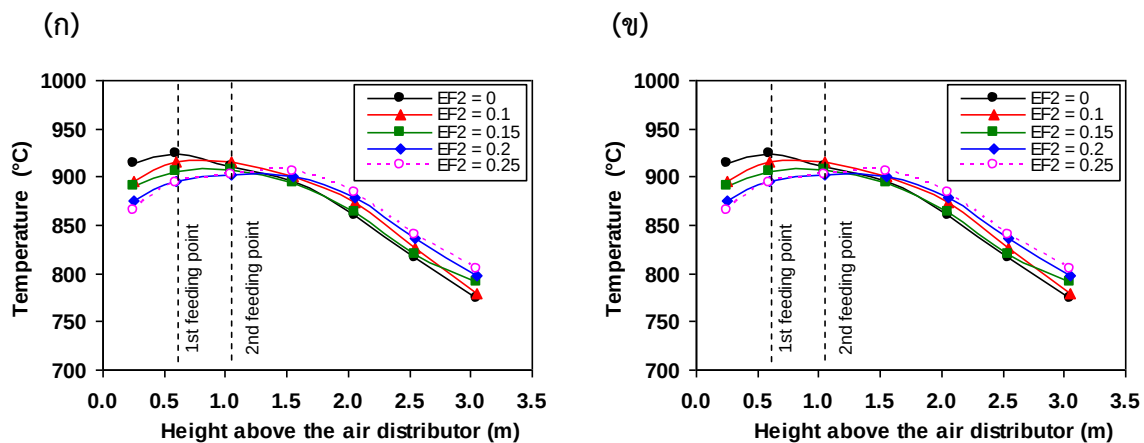
จากภาพที่ 4.4 จะเห็นว่าอากาศส่วนเกินและอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองส่งผลกระทบต่อราคาการปล่อยมลพิษเป็นอย่างมาก เมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมที่มีสัดส่วนพลังงานของแก๊สขึ้นสูงที่อากาศส่วนเกินต่ำ ส่งผลให้ราคาการปล่อยมลพิษมีค่าสูง เป็นผลมาจากความเข้มข้นที่มากของ CO และ C_xH_y ในไอเสีย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินและลดสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองลง ค่าการปล่อยมลพิษก็สูงเช่นกัน เนื่องจากผลกระทบของ NO ต่อราคาการปล่อยมลพิษ

จากภาพที่ 4.4 พบว่าค่าต่ำสุดของราคาการปล่อยมลพิษจะต่ำสุดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมโดยใช้อัตราส่วนพลังงานของแก๊สขึ้นที่ 0.15 และใช้อากาศส่วนเกินในช่วง 40% ถึง 50% ภายใต้สภาวะนี้เตาเผามีประสิทธิภาพการเผาไหม้ 99% และมีการปลดปล่อย CO ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด และสามารถลดการปล่อย NO ได้ประมาณ 15%

4.3 การเผาไหม้ร่วมระหว่างแก๊สอัดเม็ดและแก๊สขึ้นโดยใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นขั้น

4.3.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนภายในเตาเผาเมื่อใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นขั้น

ภาพที่ 4.5 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนภายในเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแก๊สอัดเม็ดและแก๊สขึ้นที่สัดส่วนพลังงานตั้งแต่ 0 (กรณีการเผาไหม้แบบปกติ) จนถึง 0.25 ด้วยวิธีการเผาป้อนเชื้อเพลิงเป็นขั้น โดยใช้อากาศเกินคงที่ประมาณ 40% โดยทำการวัด ณ ตำแหน่งแกนกลางของเตาตลอดความสูงของเตา จากกราฟในภาพ 4.6 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการเผาไหม้ร่วม (ดูภาพที่ 4.1) คือ มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในส่วนทรงกรวย



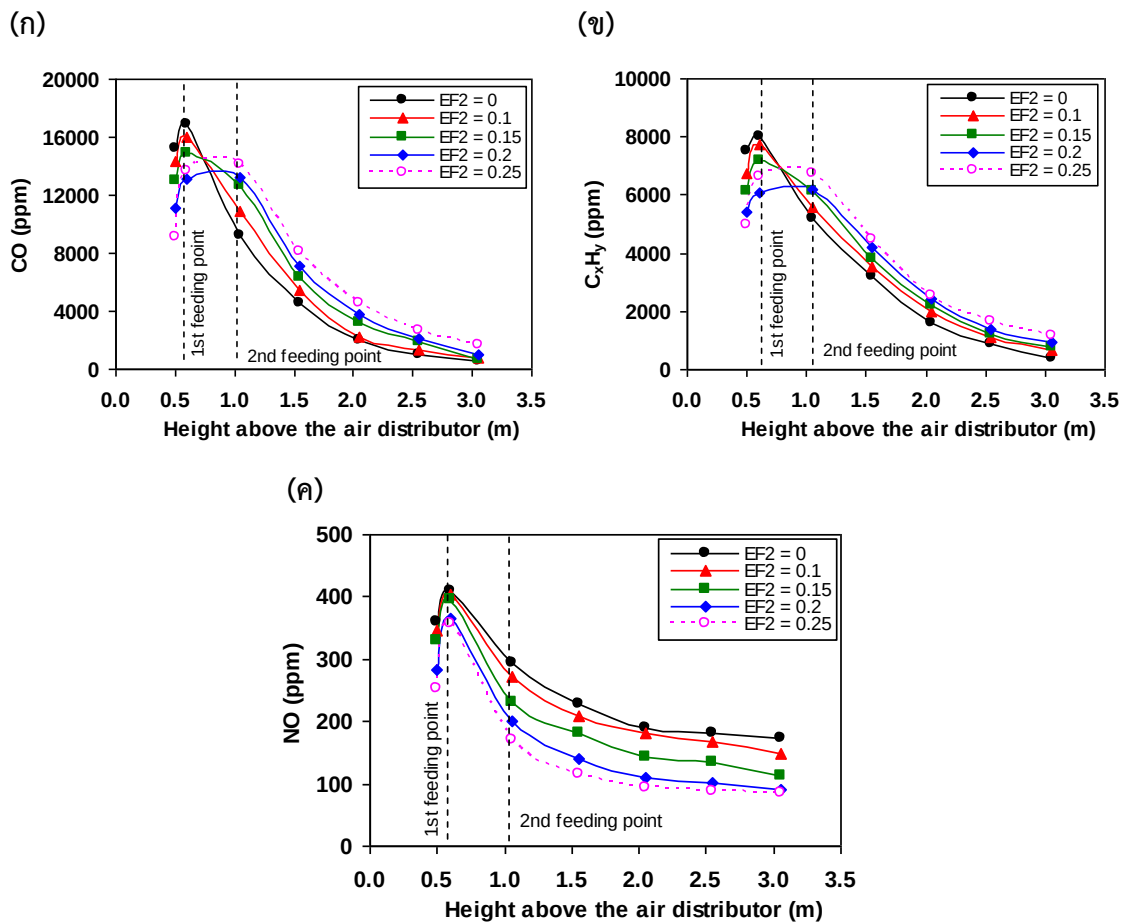
ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของ (ก) อุณหภูมิ และ (ข) ออกซิเจนวัดตามระดับความสูงที่ตำแหน่งแกนกลางของเตาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบชื้นด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) ในเชื้อเพลิงผสมต่างกันโดยใช้อากาศส่วนเกินประมาณ 40%

ของเตาเผา (ความสูงต่ำกว่า 0.9 m) จากนั้นค่อยๆ ลดลงตามระดับความสูงของเตา แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการแบ่งการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในส่วนทรงกรวยของเตาเผามีค่าต่ำกว่ากรณีการเผาไหม้แบบปกติและเผาไหม้ร่วม เนื่องจากเชื้อเพลิง (พลังงาน) บางส่วนถูกป้อนเข้าแต่ที่ตำแหน่ง 1.15 m ซึ่งเป็นส่วนทรงกระบอก จึงทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในการทดลองแบบป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นเกิดขึ้นที่ตำแหน่งการป้อนเชื้อเพลิงรอง (1.15 m) และมีแนวโน้มจะเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดสูงขึ้นไปตามการเพิ่มสัดส่วนพลังงานจากเชื้อเพลิงรองเนื่องจากการลอยตัวของเชื้อเพลิงไปเผาไหม้ที่ระดับความสูงที่มากขึ้น ในส่วนทรงกระบอกของเตา อุณหภูมิในส่วนนี้มีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา

การกระจายตัวของออกซิเจนภายในเตามีแนวโน้มลดลงตลอดความสูงของเตาเนื่องจากออกซิเจนถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะสังเกตได้ว่า การลดลงของออกซิเจนในส่วนทรงกรวยเกิดมีอัตราสูงกว่าส่วนทรงกระบอกของเตา เนื่องจากการเผาไหม้เกิดขึ้นในส่วนทรงกระบอกเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น การลดลงของออกซิเจนในช่วงความสูง 1.15 m ถึง 1.65 มีอัตราค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับกรณีการเผาไหม้แบบปกติ และจะมีการลดลงมากยิ่งขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรอง แนวโน้มของออกซิเจนในภาพที่ 4.5ข มีความสอดคล้องกับลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ ภาพที่ 4.5ก

4.3.2 ความเข้มข้นของ CO C_xH_y และ NO ในเตาเผาไหม้ที่ใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น

ภาพที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวของ CO C_xH_y และ NO ภายในเตาเผาตามแนวความสูง เมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบชื้นที่สัดส่วนพลังงานต่างกันด้วยวิธีการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นทำการทดลองที่อากาศส่วนเกินประมาณ 40% นอกจากนี้ในภาพที่ 4.6 ยังแสดงถึงตำแหน่งของการป้อนเชื้อเพลิงหลัก (ที่ 0.6 m) และเชื้อเพลิงรอง (ที่ 1.15 m) เพื่อช่วยในการอธิบายให้ง่ายขึ้น จากลักษณะการกระจายตัวของมลพิษหลัก CO C_xH_y และ NO ในภาพที่ 4.6 ทำให้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงตามระดับความสูงของเตาเผา บ่งชี้ถึงการก่อตัว (formation) ของแก๊สมลพิษและการออกซิเดชัน (สำหรับ CO และ C_xH_y) และสลายตัว/ลดลง ของ NO (Turns, 2006) เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟการกระจายตัวในภาพที่ 4.2 จะมี



ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวของ (ก) CO (ข) C_xH_y และ (ค) NO วัดตามระดับความสูงที่ตำแหน่งแกนกลางของเตาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอลัดเม็ดและแกลบอลขึ้นด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น ที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF_2) ในเชื้อเพลิงผสมต่างกัน โดยใช้อากาศส่วนเกินประมาณ 40%

ลักษณะแตกต่างกันเล็กน้อย การก่อตัวและการลดลงของแก๊ส CO C_xH_y และ NO เป็นไปตามกลไกและปฏิกิริยาเคมีดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.2

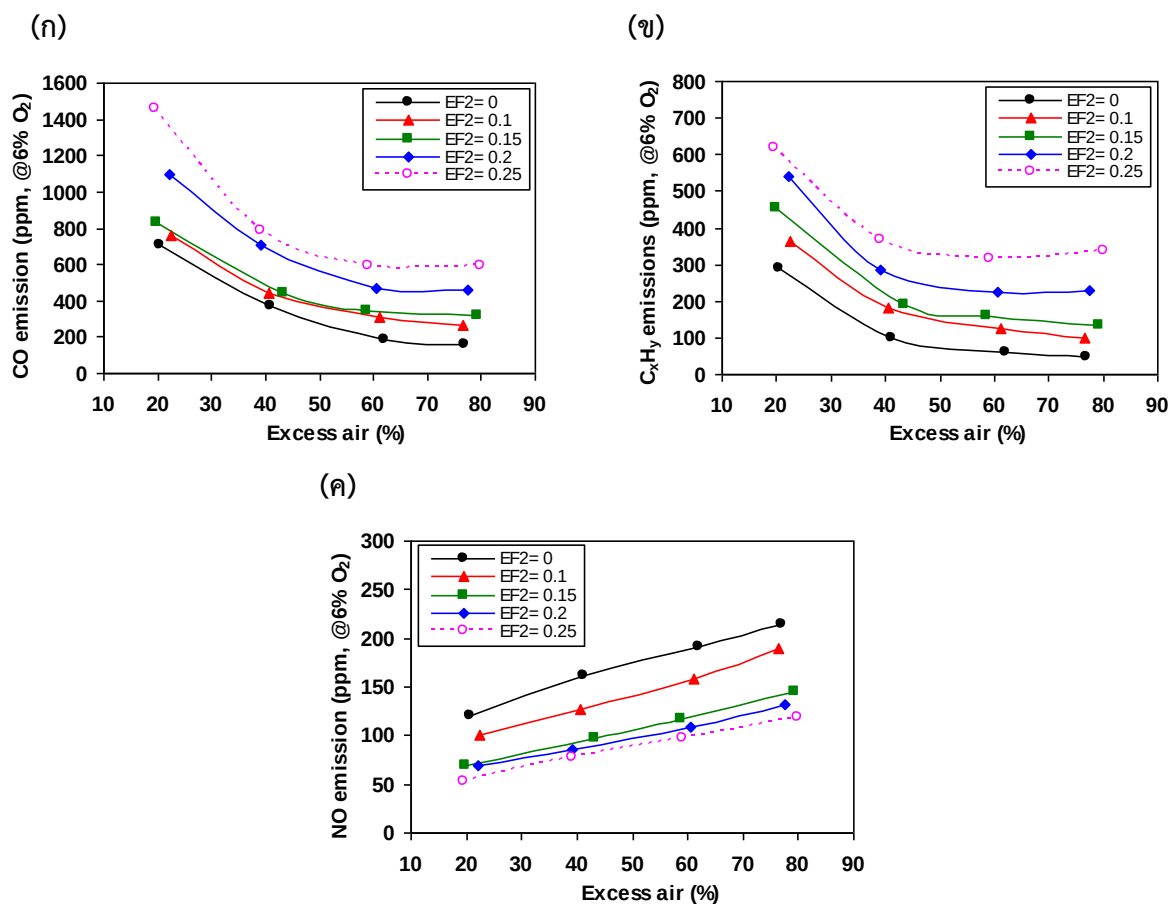
เมื่อมีการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นจะสังเกตเห็นได้ภาพที่ 4.6 ก ว่าความเข้มข้นของ CO บริเวณฐานของส่วนทรงกรวยมีค่าต่ำลงเนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิง (ความร้อน) ที่ถูกป้อนเข้าด้วยเครื่องป้อนเชื้อเพลิงตัวหนึ่งลดลง ทำให้อัตราการปล่อยสารระเหยของเชื้อเพลิงและออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) และคาร์บอนในถ่าน (Char-C) (Turns, 2006) ลดลง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มสัดส่วนพลังงานแกลบอลขึ้นมากขึ้น (มีการป้อนเชื้อเพลิงรองมากขึ้นที่ระยะ 1.15 m) ความเข้มข้นสูงสุดของ CO จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเชื้อป้อนเชื้อเพลิงรองเนื่องแกลบอลขึ้นจะเกิดการเผาไหม้ในบริเวณนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของการก่อตัวของ CO อีกครั้ง การลดลงของ CO ตามระยะความสูงของเตา CO สามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง CO กับ O และไอน้ำ (Turns, 2006) เมื่อเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้ปกติและการเผาไหม้ร่วม ความเข้มข้นของ CO ที่วัดได้ทุกระยะความสูงของเตาเมื่อมีการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นจะสูงกว่าเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

จากภาพที่ 4.6 ข แนวโน้มของ C_xH_y ทุกตำแหน่งความสูงของเตามีลักษณะคล้ายกับ CO แต่จะมีความเข้มข้นต่ำกว่า สามารถอธิบายได้ตามกลไกการก่อตัวและการออกซิเดชันของ C_xH_y (Turns, 2006)

ความเข้มข้นของ NO ในภาพที่ 4.6ค มีแนวโน้มคล้ายกันในทุกการทดลองคือมีการก่อตัวในช่วงแรก (ต่ำกว่า 0.6 m) และลดลงเมื่อระดับความสูงมากขึ้น จากภาพที่ 4.6ค พบว่าค่าสูงสุดของ NO ที่ตำแหน่งความสูง 0.6 m ของการเผาไหม้แบบป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นจะต่ำกว่าการเผาไหม้แบบปกติและเผาไหม้ร่วม เป็นผลมาจาก 1) การป้อนเชื้อเพลิงที่น้อยลง (มีปริมาณ N ในเชื้อเพลิงน้อยลง) และ 2) อุณหภูมิที่บริเวณนี้ต่ำลง ทำให้อัตราการก่อตัวของ NO ลดลง ในช่วงระยะความสูง 0.6 m ถึง 1.15 m มีการลดลงอย่างรวดเร็วของ NO เนื่องจากปฏิกิริยาคาตาไลติกรีดักชัน (catalytic reduction) ของ NO โดย CO C_xH_y ถ่าน และ แก๊ส และอัตราการลดลงของ NO จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนพลังงานของแอลบขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของ CO C_xH_y ในบริเวณนี้มีค่าสูงสามารถช่วยให้เกิดปฏิกิริยาคาตาไลติกรีดักชันได้ดีขึ้น

4.3.3 ผลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ที่ใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น

ภาพที่ 4.7 แสดงผลของอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองและอากาศส่วนเกินต่อความเข้มข้นของแก๊สมลพิษ CO C_xH_y และ NO (ปรับเทียบที่ 6% O₂) ที่ถูกปล่อยเตาเผาฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแอลบอัดเม็ดและแอลบขึ้นด้วยวิธีการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น จากภาพจะเห็นได้ว่าอากาศส่วนเกินและสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองมีผลกระทบต่อการปล่อยมลพิษเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกิน (ที่



ภาพที่ 4.7 การปล่อยมลพิษ (ก) คาร์บอนมอนอกไซด์ (ข) ไฮโดรคาร์บอน (ค) ไนตริกออกไซด์ จากเตาเผาฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยที่ทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแอลบอัดเม็ดและแอลบขึ้นด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานรอง (EF₂) และอากาศส่วนเกินต่างกัน

สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองคงที่) ความเข้มข้นของ CO และ C_xH_y ลดลงอย่างเป็นอย่างมาก ในทางตรงกันข้าม NO มีการเพิ่มขึ้น

การสัดส่วนพลังงานของแก๊สขึ้นที่อากาศส่วนเกินคงที่ทำให้มีการปล่อย CO และ C_xH_y มีสูงขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ แต่ NO มีการลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของ CO และ C_xH_y ภายในเตา

ตารางที่ 4.3 ค่าความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาฟลูอิดซ์เบดแบบทรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างแก๊สอัดเม็ดและแก๊สขึ้นด้วยวิธีการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อากาศส่วนเกินต่างกัน

อากาศ ส่วนเกิน (%)	O ₂ ที่ปล่อยไอเสีย (%)	คาร์บอนใน เถ้าลอย (wt.%)	CO ^a (ppm)	C _x H _y ^a (ppm)	ความร้อนสูญเสีย (%) เนื่องจาก:		ประสิทธิภาพ การเผาไหม้ (%)
					คาร์บอนไม่เผาไหม้	เผาไหม้ไม่สมบูรณ์	
การเผาไหม้ด้วยวิธีปกติ (EF2 = 0)							
21	3.7	3.63	709	290	0.81	0.74	98.4
41	6.2	3.15	373	98	0.70	0.31	99.0
62	8.1	2.09	184	61	0.46	0.17	99.4
77	9.1	1.98	158	46	0.44	0.14	99.4
การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรอง EF2 = 0.1							
22	4.0	1.47	759	364	0.36	0.86	98.8
41	6.1	2.89	440	180	0.71	0.45	98.8
61	8.0	3.02	311	125	0.74	0.32	98.9
77	9.1	2.89	265	101	0.71	0.26	99.0
การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรอง EF2 = 0.15							
20	3.7	2.12	835	455	0.54	1.03	98.4
43	6.4	2.50	440	192	0.64	0.48	98.9
59	7.8	2.51	347	160	0.64	0.39	99.0
79	9.3	2.30	317	134	0.59	0.34	99.1
การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรอง EF2 = 0.20							
22	4.0	2.93	1099	542	0.78	1.24	98.0
39	6.0	2.36	704	285	0.63	0.71	98.7
61	8.0	2.45	473	225	0.65	0.52	98.8
77	9.2	2.29	460	228	0.61	0.52	98.9
การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่อัตราส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรอง EF2 = 0.25							
20	3.7	2.09	1463	618	0.58	1.51	97.9
39	6.0	1.96	783	368	0.54	0.86	98.6
59	7.9	2.13	595	317	0.59	0.70	98.7
80	9.4	2.33	593	337	0.65	0.73	98.6

^a ปรับแก้เป็นค่าที่ O_2 6%

ค่าสูงขึ้น ช่วยให้ปฏิกิริยาสลายตัวของ NO เป็นไปได้ดีขึ้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการปล่อยมลพิษเหล่านี้มีแนวโน้มเป็นไปตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา

ดังนั้นการควบคุม NO สามารถทำได้โดยลดอากาศส่วนเกินและ/หรือ เพิ่มสัดส่วนเชื้อเพลิงรองในเชื้อเพลิงรวม แต่อย่างไรก็ตามควรพิจารณาถึงการปลดปล่อย CO และ C_xH_y รวมถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาด้วย

4.3.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเมื่อใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นขั้น

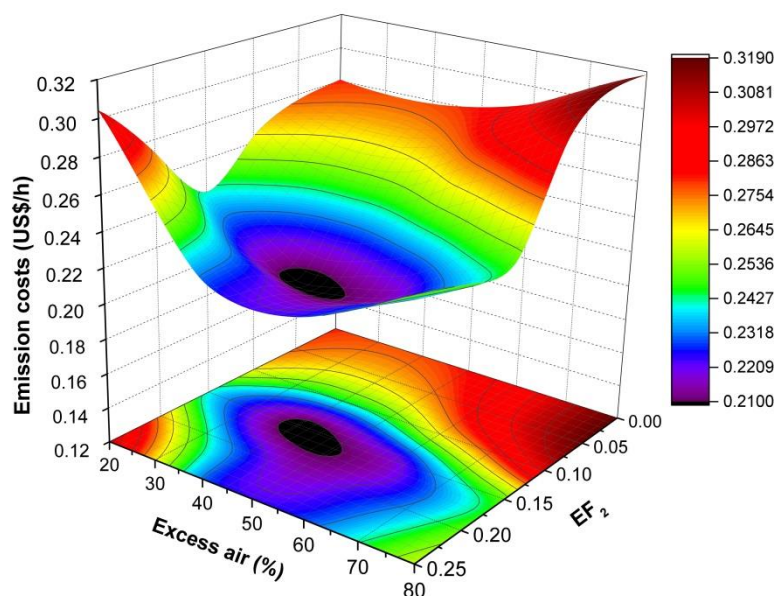
ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างเกลบอัดเม็ดและเกลบชั้นที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองโดยทำการทดสอบที่อัตราอากาศส่วนเกินตั้งแต่ประมาณ 20% ถึง 40% จากตารางพบว่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนไม่เผาไหม้และการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความร้อนสูญเสียจากคาร์บอนไม่เผาไหม้เนื่องจากเกลบมีส่วนประกอบของเถ้าในเชื้อเพลิงค่อนข้างสูง (ดูตารางที่ 3.1) จากตารางที่ 4.3 พบว่า ประสิทธิภาพการเผาของเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมด้วยวิธีการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นขั้นต่ำกว่าการเผาไหม้แบบปกติเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มอากาศส่วนเกินสามารถลดการสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้ แต่มีผลค่อนข้างน้อยต่อความร้อนสูญเสียจากคาร์บอนไม่เผาไหม้

4.3.5 จุดเหมาะสมการทำงานของเตาเผาเมื่อใช้เทคนิคการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นขั้น

ภาพที่ 4.4 แสดงราคาของการปล่อยมลพิษ (emission costs, USD/h) ของการเผาไหม้ร่วมเกลบอัดเม็ดและเกลบชั้นด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นขั้นในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบทรงกรวยโดยคำนวณจากค่าการปล่อยมลพิษ CO C_xH_y และ NO ตามวิธีการในบทที่ 3

จากภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าอากาศส่วนเกินและสัดส่วนพลังงานของเกลบชั้นส่งผลกระทบต่อราคาการปล่อยมลพิษเป็นอย่างมาก การเผาไหม้ร่วมที่มีการใช้สัดส่วนพลังงานของเกลบชั้นสูงโดยใช้อากาศส่วนเกินต่ำ ทำให้ราคาการปล่อยมลพิษมีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องจากจากความเข้มข้นที่มากของ CO และ C_xH_y ในไอเสีย เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินและลดสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองลงก็ทำให้ราคาการปล่อยมลพิษสูงขึ้นเช่นกัน เป็นเพราะผลกระทบของ NO ต่อราคาการปล่อยมลพิษ

จากภาพที่ 4.4 พบว่าค่าต่ำสุดของราคาการปล่อยมลพิษจะต่ำสุดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมโดยใช้อัตราส่วนพลังงานของเกลบชั้นที่ 0.15 และใช้อากาศส่วนเกินในช่วง 40% ถึง 50% ภายใต้สภาวะนี้เตาเผามีประสิทธิภาพการเผาไหม้ 99% และมีการปลดปล่อย CO ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดและสามารถลดการปล่อย NO ได้ประมาณ 43%



ภาพที่ 4.8 ผลของอากาศส่วนเกินและสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองต่อราคาการปล่อยมลพิษของการเผาไหม้
แก๊สอัดเม็ดและแก๊สขึ้นด้วยวิธีการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบทรงกรวย

4.4 การเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบทรงกรวยที่ใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบด

4.4.1 การจับตัวกันของวัสดุเบดเมื่อทำการเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด

ในตอนเริ่มต้นของงานวิจัยนี้ ได้มีการใช้ทรายซิลิกาขนาดอนุภาค 300–500 ไมครอน เป็นวัสดุเบด อย่างไรก็ตาม หลังจากการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า เกิดความผิดปกติระหว่างการดำเนินงาน คือ อุณหภูมิเบดมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากประมาณ 850 °C เป็น 1100 °C และเกิดการแบ่งชั้นของอุณหภูมิในแต่ละช่วงความสูงของเตาเผาอย่างชัดเจน และพบว่าความดันตกคร่อมเบดเกิดการลดลงจนหยุดนิ่ง นอกจากนั้น ยังพบว่าเกิดกลุ่มควันดำออกมาจากปล่องไอเสียเป็นอย่างมาก เป็นสัญญาณบ่งบอกถึงความผิดปกติของการเกิดฟลูอิดไธซ์เซชัน (การเคลื่อนไหว) ของเบดและการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น จึงได้หยุดการทำงานของเตาเผาด้วยการหยุดป้อนเชื้อเพลิงแล้วทำการเพิ่มอากาศเข้าเตาให้มากที่สุดโดยการปรับเครื่องจ่ายอากาศ

หลังจากที่เตาเผาเย็นลง มีการเปิดเตาแล้วตรวจสอบสิ่งที่เกิดขึ้นและพบว่า เกิดการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุเบดดังแสดงในภาพที่ 4.9 จากภาพจะเห็นได้ว่าวัสดุเบด (ทราย) จับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่มากกว่า 12 cm และจากการตรวจสอบทางเคมีของตัวอย่างทรายที่จับตัวกันพบว่า มีส่วนประกอบของยูเทคติก พวก $K_2O-CaO-SiO_2$ ซึ่งจากเฟสไดอะแกรมแล้วยูเทคติกนี้ มีจุดหลอมเหลวต่ำ (ประมาณ 700–900 °C) ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด

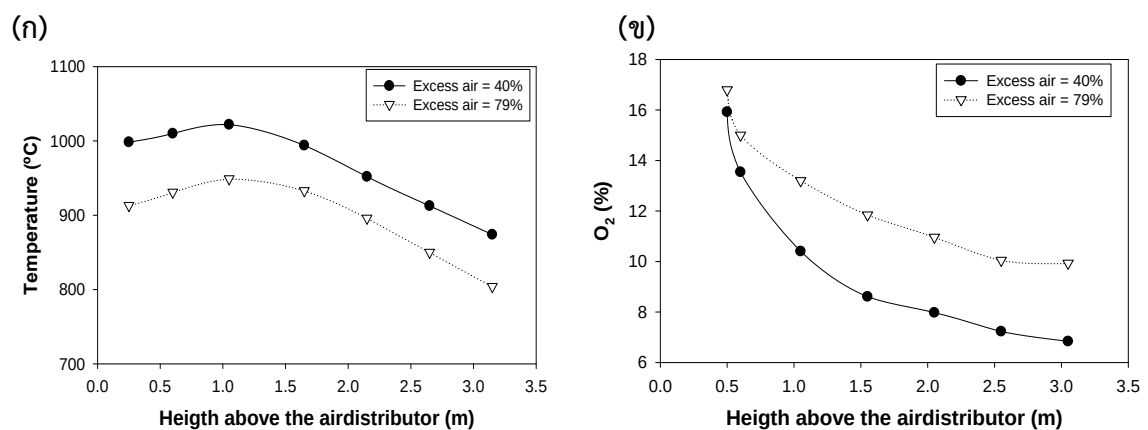


ภาพที่ 4.9 ตัวอย่างเบด (ทราย) ที่จับตัวกันระหว่างการเผาไหม้กะลาปาล์ม

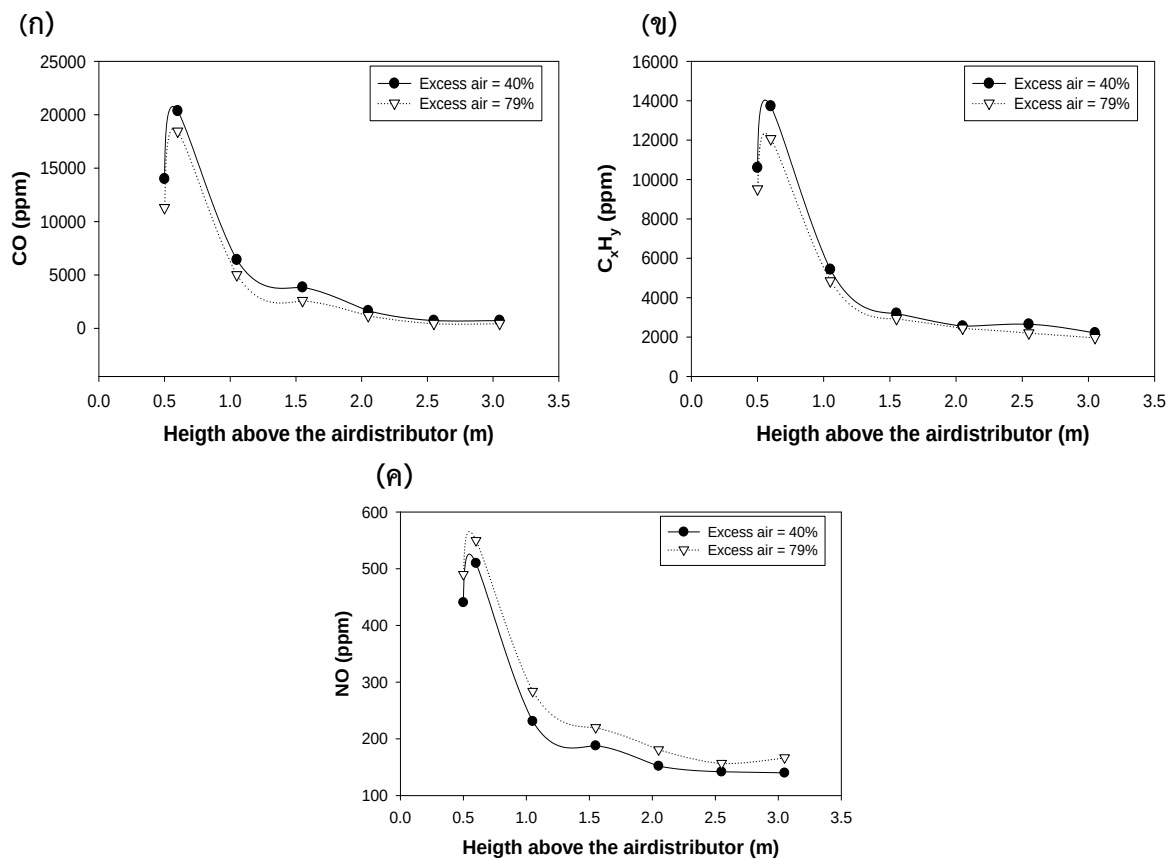
4.4.2 การเผาไหม้โดยใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบด

ภาพที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดวัดในแนวกึ่งกลางหน้าตัดเตาไล่ไปตามระดับความสูงของเตาระหว่างการเผาไหม้กะลาปาล์มที่อากาศส่วนเกินประมาณ 40% และ 80% จากการกระจายตัวของอุณหภูมิพบว่า ในช่วงความสูงต่ำกว่า 1 m (ส่วนกรวยของเตาเผา) มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างช้าๆ และสูงสุดที่ความสูง 0.9 m เนื่องจากในส่วนกรวยนี้ มีอนุภาคของแข็งจากเบดและเชื้อเพลิง และก๊าซต่างๆ อยู่มาก และจะเกิดการถ่ายเทมวลและการผสมกันของสารที่เผาไหม้อย่างรุนแรง (intensive) ทำให้เกิดการเผาไหม้เกิดขึ้นในส่วนนี้ แต่หลังจากนั้น (ที่ความสูงมากกว่า 0.9 m) อุณหภูมิภายในเตาเผาจะค่อยๆ ลดลงตามระดับความสูงของเตาเผาเนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา เมื่อทำการเพิ่มอากาศส่วนเกินจาก 40% เป็น 80% พบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของเตาเผาลดลงประมาณ 50–100 °C เนื่องจากอากาศส่วนเกินที่มากขึ้นจะทำให้สูญเสียความร้อนจากเตาเพิ่มมากขึ้น

จากรูป 4.10(ข) พบว่าปริมาณออกซิเจนในส่วนทรงกรวยมีการลดลงตลอดความสูงของเตาเผา โดยในส่วนทรงกรวย (ต่ำกว่า 0.9 เมตร) ของเตาเผาจะมีการลดลงของออกซิเจนอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับส่วนทรงกระบอก ทั้งนี้เป็นเพราะออกซิเจนส่วนใหญ่ถูกใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงในส่วนทรงกรวย แต่



ภาพที่ 4.10 (ก) การกระจายตัวของอุณหภูมิและ (ข) ความเข้มข้นของออกซิเจนวัดในแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดที่ทำการเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ที่อากาศส่วนเกิน 40% และ 80%



ภาพที่ 4.11 (ก) ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ (ข) ไฮโดรคาร์บอน และ (ค) ไนตริกออกไซด์ วัดในแนวแกน (กึ่งกลางหน้าตัด) ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่ทำการเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ที่อากาศส่วนเกิน 40% และ 80%

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอากาศส่วนเกิน 40% และ 80% พบว่าพฤติกรรมของออกซิเจนในส่วนทรงกรวยแตกต่างกัน เมื่อใช้อากาศส่วนเกิน 40% พบว่าจะมีอัตราการลดลงของออกซิเจนมีมากกว่าการใช้ที่อากาศส่วนเกิน 80% เนื่องจากเมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกิน (หมายความว่าเพิ่มปริมาณอากาศและความเร็วของการไหล) จะทำให้เวลาของการเกิดปฏิกิริยาภายในเตา (residence time) ลดลง

ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบการกระจายตัวของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) และไนตริกออกไซด์ (NO) วัด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัดตามระดับความสูงต่างๆ ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ที่อากาศส่วนเกิน 40% และ 80% จากรูปจะเห็นว่า กราฟทุกการทดลองสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนตามความสูงคือ (1) ส่วนล่างของเตา (ต่ำกว่า 0.6 เมตร) และ (2) ส่วนบน (ตั้งแต่ 0.6 เมตร เป็นต้นไป) ซึ่งพฤติกรรมที่เห็นในกราฟบ่งชี้ให้เห็นถึงการก่อตัว (formation) และลดลงเนื่องจากการออกซิเดชัน (oxidation) ของ CO C_xH_y หรือ รีดักชัน (reduction) ของ NO และเนื่องจากการเพิ่มขึ้นและลดลงนี้ทำให้จุดสูงสุด (peak) ณ ตำแหน่งความสูง 0.6 เมตร

จากภาพที่ 4.11 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นว่า ในส่วนล่างของเตา ความเข้มข้นของ CO และ C_xH_y มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการระเหยของสารระเหย (devolatilization) ที่อยู่ในชีวมวลและการเผาไหม้ถ่านที่เกิดขึ้น (char oxidation) ในขณะเดียวกันก็มีการออกซิเดชันของก๊าซ CO และ C_xH_y ที่เกิดขึ้น

ในช่วงนี้เช่นกันแต่มีอัตราที่ต่ำกว่าการก่อตัว โดยปกติแล้ว CO จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็น CO₂ ด้วย O และ OH ขณะที่การออกซิเดชันของ C_xH_y จะเกิดขึ้นสองขั้นตอนคือ (1) การแตกตัวของ C_xH_y เป็น CO และ (2) การออกซิเดชันของ CO เป็น CO₂ (Turns, 2006) เมื่อทำการเพิ่มอากาศส่วนเกินจะเห็นได้ค่าความเข้มข้น CO และ C_xH_y ที่ทุกตำแหน่งความสูงของเตาจะน้อยกว่าอากาศส่วนเกินที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะมีปริมาณออกซิไดเซอร์ (ออกซิเจน) เข้าไปในระบบเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์เพิ่มมากยิ่งขึ้น

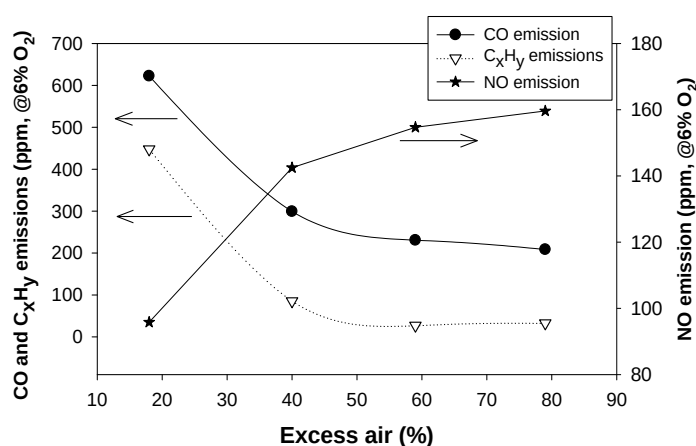
สำหรับส่วนบนของเตา อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าการก่อตัวทำให้มีการลดลงของ C_xH_y และ CO ตามความสูงเขาเตาดังแสดงในรูป 4.11 (ก) และ (ข)

โดยพื้นฐานแล้วการก่อตัวของ NO ในระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลจะเกิดขึ้นเนื่องจากสารระเหยที่มีอยู่ในชีวมวล (ส่วนใหญ่ NH₃) ตามกลไกการก่อตัวของ NO (NO-formation mechanism) (Werther et al., 2000; Winter et al., 1999) แต่ในขณะเดียวกันในระหว่างการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบดก็มีปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยา คาคะไลติกรีดักชันของ NO โดย CO ที่มีอยู่บนพื้นผิวของถ่าน/เถ้า/วัสดุเบด และปฏิกิริยาระหว่าง NO กับสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน โดยปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้เกิดการลดลงของ NO และนอกจากนี้ เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบดซึ่งมีความสามารถในการทำให้เกิดปฏิกิริยาคาคะไลติกรีดักชันของ NO อีกด้วย

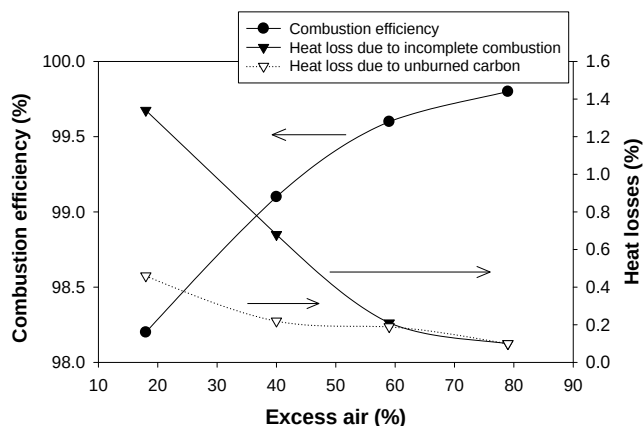
จากกราฟการกระจายตัวของ NO ในรูป 4.11 (ค) พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกันกับ CO และ C_xH_y โดยมีการก่อตัวและการลดตามกลไกที่กล่าวมาข้างต้น

4.4.3 สมรรถนะการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดเมื่อเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบด

ภาพที่ 4.12 แสดงปริมาณของแก๊สมลพิษที่ถูกปล่อยจากเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดที่ทำการเผาไหม้กะลาปาล์มที่อากาศส่วนเกินต่างกัน จากกราฟจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของ CO และ C_xH_y มีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการเพิ่มอากาศส่วนเกิน เนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการปรับอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นพบว่า การปล่อย NO มีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกลไกการก่อตัวของ NO ดังนั้นจึง



รูปที่ 4.12 มลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดแบบทรงกรวยที่อากาศส่วนเกินต่างกัน



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเมื่อเผาไหม้กะลาปาล์มที่อากาศส่วนเกินต่างกัน

สามารถสรุปได้ว่า มลพิษที่เกิดขึ้นสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับอากาศส่วนเกิน

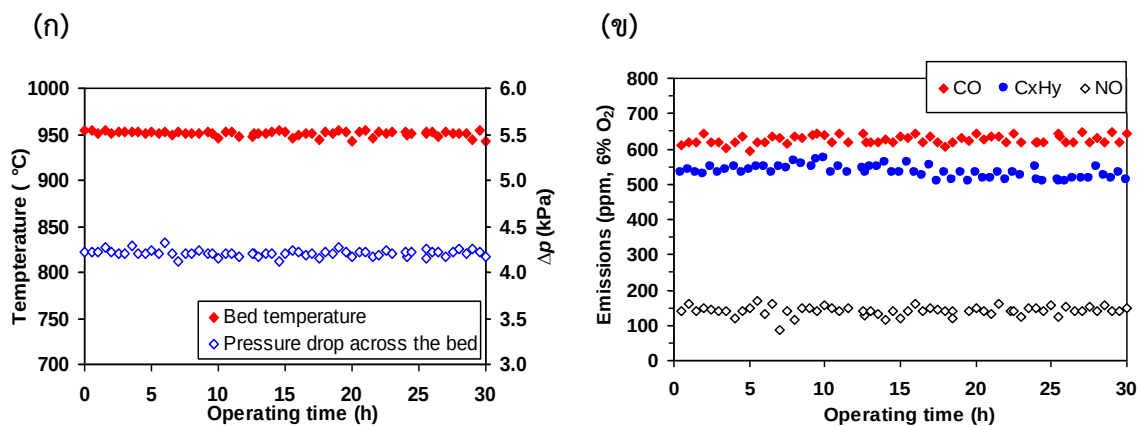
กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2558) ได้ทำการกำหนดมาตรฐานอากาศเสียที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยจำกัดให้มีการปล่อย CO และ NO ไม่เกินกว่า 740 ppm และ 205 ppm (คิดที่ 6 %O₂) ตามลำดับ แต่สำหรับ C_xH_y ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานที่แน่นอน (แต่ต้องควบคุมเนื่องจากมีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้) จากข้อมูลนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่ามลพิษ CO และ NO ที่ถูกปล่อยจากเตาเผา นี้ จะเห็นได้ว่า ทุกย่านการทำงาน (อากาศส่วนเกิน) การปลดปล่อยมลพิษดังกล่าวไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด

ภาพที่ 4.13 แสดงความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ที่ใช้สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น ความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ พบว่า ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเถ้าของกะลาปาล์มมีปริมาณน้อย (4.7%) แต่อย่างไรก็ตามเตาเผาฟลูอิดเบดทรงกรวยนี้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้มากกว่า 98%

4.4.4 ลักษณะของวัสดุเบดหลังจากการเผาไหม้ในระยะยาว

เพื่อทำการทดสอบความสามารถในการป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของทรายอลูมินาที่ใช้เป็นวัสดุเบดในระยะยาว ได้มีการทำการทดสอบการเผาไหม้เป็นเวลา 30 ชั่วโมง โดยใช้อากาศส่วนเกินคงที่ 40% และทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ความดันตกคร่อมเบด และการปล่อยมลพิษจากเตาเผาตลอดการเผาไหม้ จากการทดสอบนี้พบว่า อุณหภูมิเบด ความดันตกคร่อมเบด และการปล่อยมลพิษมีความสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการทดสอบ 30 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.14 ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่า เตาเผาฟลูอิดเบดแบบทรงกรวยที่ใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบดมีการทำงานเป็นปกติและไม่มีการเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนของวัสดุเบด

หลังจากการทดสอบ 30 ชั่วโมง ได้มีการตรวจสอบลักษณะทั่วไปของวัสดุเบด ภาพที่ 4.15 แสดงลักษณะของทรายอลูมินาหลังจากการเผาไหม้ 10 ชั่วโมง 20 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับ จากรูปจะ



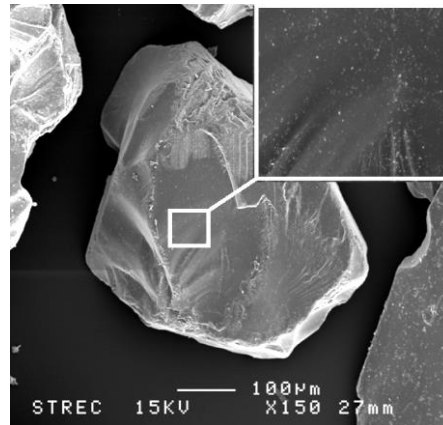
ภาพที่ 4.14 (ก) อุณหภูมิเบดและความดันตกคร่อมเบด (ข) และการปล่อยมลพิษของเตาเผาตลอดระยะเวลาการทำงาน 30 ชั่วโมง

เห็นได้ว่า วัสดุเบดเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีน้ำตาล แต่อย่างไรก็ตามทรายอลูมินาไม่มีการจับตัวเป็นก้อน และมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับทรายก่อนทำการทดสอบเผาไหม้ นอกจากนี้ ทรายอลูมินายังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

นอกจากนี้ยังมีการนำตัวอย่างทรายหลังการทดสอบในแต่ละช่วงการทดลองไปทำการตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope) ภาพที่ 4.16 แสดงโครงสร้างสัณฐานของวัสดุเบดก่อนทำการทดลองเผาไหม้ จากภาพจะเห็นได้ว่าพื้นผิวของทรายค่อนข้างเรียบ ภาพที่ 4.17 แสดงโครงสร้างสัณฐานของวัสดุเบดหลังจากการเผาไหม้กะลาปาล์ม 10 ชั่วโมง 20 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 100 (ภาพ 4.16ก) และ 3700 เท่า (ภาพ 4.16ข) จากภาพจะเห็นได้ว่าพื้นผิวของวัสดุเบดมีลักษณะขรุขระและจะขรุขระเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง อาจเป็นเพราะมีการเกาะของเศษเถ้าหรือเศษวัสดุเบด (ฝุ่น) ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ในเตาฟลูอิดซ์เบด จากภาพที่กำลังขยายสูงขึ้นพบว่า พื้นผิวของวัสดุเบดถูกเกาะจับด้วยวัสดุขนาดเล็กที่มีลักษณะคล้ายกับการหลอมเหลว

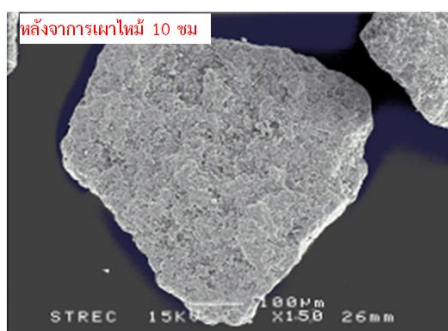


ภาพที่ 4.15 ตัวอย่างทรายอลูมินา (ก) หลังการทดสอบ 10 ชั่วโมง (ข) หลังจากการทดสอบ 20 ชั่วโมง (ค) หลังจากการทดสอบ 30 ชั่วโมง

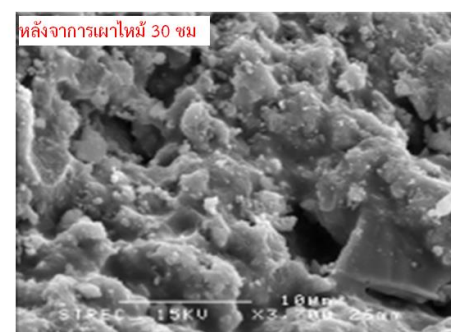
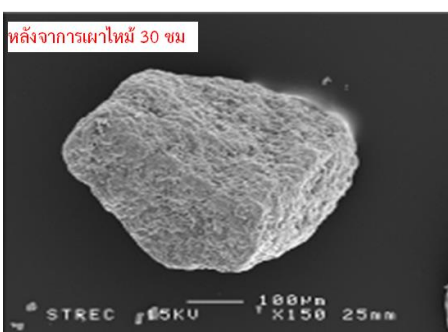
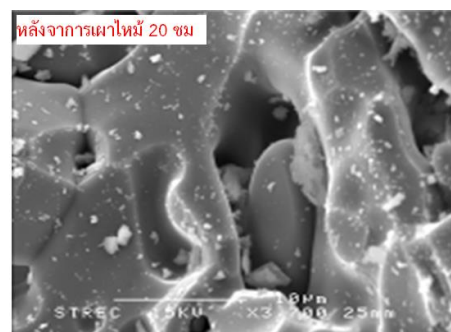
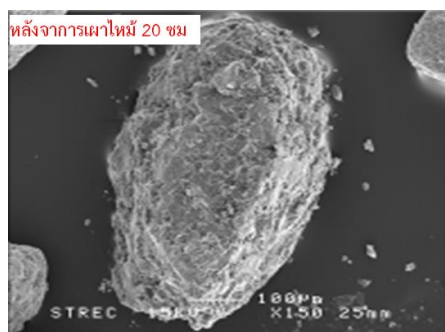
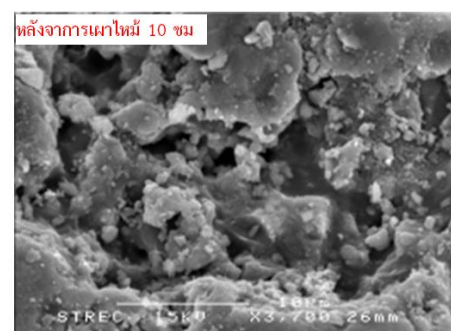


ภาพที่ 4.16 โครงสร้างสัณฐานของทรายอลูมินาก่อนทำการเผาไหม้

(ก)



(ข)

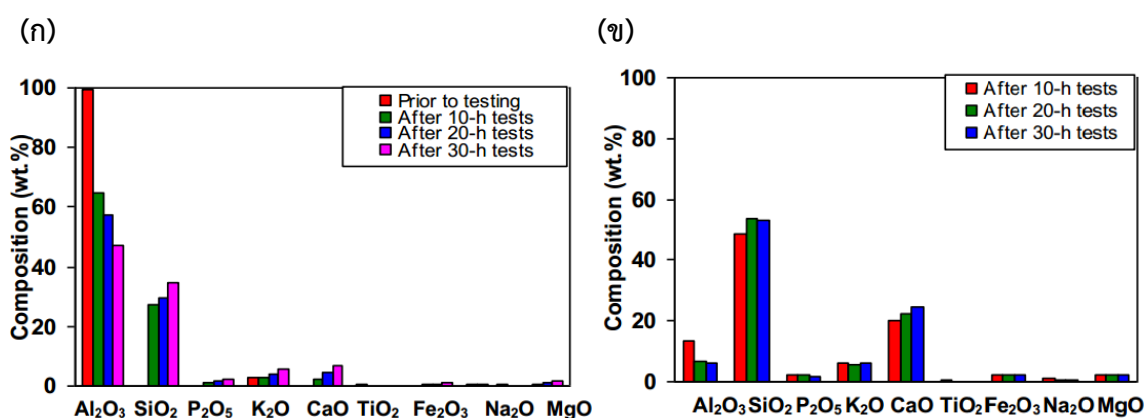


ภาพที่ 4.17 โครงสร้างสัณฐานบริเวณพื้นผิวของอลูมินาที่หลังการทดสอบที่ 10 ชั่วโมง 20 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย (ก) 150 เท่า และ (ข) 3700 เท่า

4.4.5 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวัสดุเบตและเถ้าลอยหลังการเผาไหม้กะลาปาล์ม

เพื่อเป็นการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุเบตและเถ้า ตัวอย่างวัสดุเบตและเถ้าหลังการทดสอบแต่ละช่วงเวลา (10 20 และ 30 ชั่วโมง) ได้ถูกทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ X-ray fluorescence spectrometer (XRF) ภาพที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์แบบ XRF ของวัสดุเบตและเถ้าหลังการทดสอบแต่ละช่วงเวลา จากภาพที่ 4.17(ก) เห็นได้ว่าองค์ประกอบของ Al_2O_3 ลดลงตามระยะเวลาการทดลองเนื่องจากการเกาะของวัสดุเช่นพวกเถ้าหรือเศษวัสดุเช่นสารประกอบยูเทคติกของสะเก็ดทรายและเถ้า ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ดังจะเห็นจากมีปริมาณ SiO_2 เพิ่มขึ้นตามระยะการทดลอง ซึ่งมาจากเถ้าของเชื้อเพลิงที่ส่วนประกอบของ SiO_2 ค่อนข้างสูง

จากภาพที่ 4.17(ข) จะสังเกตได้ว่าปริมาณของ Al_2O_3 เพิ่มมากขึ้นในช่วงเวลาเริ่มต้น (10 ชั่วโมงแรก) ของการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าของเชื้อเพลิงก่อนทำการเผาไหม้ ทั้งนี้เนื่องจากมีเศษของทรายที่แตกเนื่องจากการชนของอนุภาคของแข็งภายในเบตและลอยออกจากเตาพร้อมกับเถ้า



ภาพที่ 4.17 องค์ประกอบทางเคมีของ (ก) ทรายอลูมินาก่อนการเผาไหม้และช่วงเวลาต่างๆ (ข) เถ้าลอยจากการเผาไหม้ที่เวลาต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

ในการวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีการเผาไหม้ร่วม 2 วิธี คือ 1) การเผาไหม้ร่วมด้วยการผสมเชื้อเพลิงและ 2) การเผาไหม้ร่วมด้วยวิธีการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น เพื่อลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด โดยการใช้แกลบอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงหลักและแกลบขึ้นเป็นเชื้อเพลิงรอง

จากผลการทดลองพบว่า วิธีการเผาไหม้ร่วมช่วยสร้างแก๊ส CO และ C_xH_y ในภายเตาเผามากขึ้นกว่าปกติ ซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมต่อการลดการเกิดของ NO_x ภายในเตาเผาจึงส่งผลให้การปล่อย NO_x จากเตาเผาลดลง วิธีการเผาไหม้ร่วมทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการปล่อย CO และ C_xH_y มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม CO และ C_xH_y สามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการเพิ่มอากาศส่วนเกินหรือการลดอัตราส่วนเชื้อเพลิงรอง

อากาศส่วนเกินประมาณ 40–50% และอัตราส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองที่ 0.15 เป็นสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ ที่สภาวะการทำงานนี้ การเผาไหม้ร่วมแบบผสมเชื้อเพลิงสามารถลดการปล่อย NO_x ได้ประมาณ 15% มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ประมาณ 99%

การเผาไหม้ร่วมด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นสามารถลดการปล่อย NO_x ได้ 43% และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ประมาณ 99% และสามารถควบคุมการปล่อย CO และ C_xH_y ให้ต่ำกว่ามาตรฐานการปล่อยมลพิษของประเทศไทยได้

5.1.2 การป้องกันการจับตัวกันของวัสดุเบตระหว่างกาเผาไหม้ชีวมวลที่มีส่วนประกอบของโพแทสเซียมในเถ้าสูง

ในการทดสอบการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบตทรงกรวยที่ใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบตเพื่อป้องกันการจับตัวกันเป็นก้อนของวัสดุเบต จากผลการทดลองพบว่า อากาศส่วนเกินมีผลต่อการปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามมลพิษที่เกิดขึ้นสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับอากาศส่วนเกินให้เหมาะสม เตาเผานี้สามารถทำการเผาไหม้กะลาปาล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า 98% จากการทดสอบ 30 ชั่วโมง ไม่พบสัญญาณบ่งชี้ถึงการเกิดการเกาะตัวเป็นก้อนเชื้อวัสดุเบต แต่อย่างไรก็ตามวัสดุเบตมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติกายภาพและเคมี ซึ่งมีผลต่อการใช้ต่อเนื่องในระยะยาว

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรทำการศึกษาวิธีการเผาไหม้แบบอื่น เช่น การเผาไหม้แบบการจ่ายอากาศเป็นชั้น และการเผาไหม้ช้า เพื่อลดการปล่อย NO_x ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด
- ควรมีการใช้เชื้อเพลิงรองหลากหลายชนิดเพื่อเป็นการศึกษาผลของเชื้อเพลิงรองต่อการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผา
- ควรมีการใช้วัสดุเบดชนิดอื่นเช่น หินปูน โดโลไมท์ เพื่อป้องกันการจับตัวของวัสดุเบด

เอกสารอ้างอิง

- Akputat, O., Varol, M., Atimtay, A.T. 2010. Effect of freeboard extension on co-combustion of coal and olive cake in a fluidized bed combustor. *Bioresource Technology*, **101**(15), 6177-6184.
- Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., Cabanillas, A., Otero, J. 2002. Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. *Biomass and Bioenergy*, **23**(3), 171–179.
- Arvelakis, S., Vourliotis, P., Kakaras, E., Koukios, E.G. 2001. Effect of leaching on the ash behavior of wheat straw and olive residue during fluidized bed combustion. *Biomass and Bioenergy*, **20**(6), 459–470.
- Ballester, J., Ichaso, R., Pina, A., González, M.A., Jiménez, S. 2008. Experimental evaluation and detailed characterisation of biomass reburning. *Biomass and Bioenergy*, **32**(10), 959–970.
- Basu P., Cen K, F., Jestin, L. 2000. *Boilers and Burners*. Springer, New York.
- Casaca, C., Costa, M. 2009. NO_x control through reburning using biomass in a laboratory furnace: Effect of particle size. *Proceedings of the Combustion Institute*, **32**(2), 2641–2648.
- Chaivatamaset, P., Sricharoon, P., Tia, S. 2011. Bed agglomeration characteristics of palm shell and corncob combustion in fluidized bed. *Applied Thermal Engineering*, **31**(14–15), 2916–2927.
- Chyang, C.-S., Qian, F.-P., Lin, Y.-C., Yang, S.-H. 2008. NO and N₂O Emission Characteristics from a Pilot Scale Vortexing Fluidized Bed Combustor Firing Different Fuels. *Energy & Fuels*, **22**(2), 1004-1011.
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), Ministry of Energy, Thailand. (2012). The Renewable and Alternative Energy Development Plan for 25 Percent in 10 Years (AEDP 2012–2021). Retrieved December 8, 2015, from
- Fang, M., Yang, L., Chen, G., Shi, Z., Luo, Z., Cen, K. 2004. Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, **85**(11), 1273–1282.
- Geldart, D. 1973. Types of gas fluidization. *Powder Technology*, **7**(5), 285–292.
- Kaynak, B., Topal, H., Atimtay, A.T. 2005. Peach and apricot stone combustion in a bubbling fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, **86**(11), 1175-1193.

- Khan, A.A., de Jong, W., Jansens, P.J., Spliethoff, H. 2009. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, **90**(1), 21–50.
- Kicherer, A., Spliethoff, H., Maier, H., Hein, K.R.G. 1994. The effect of different reburning fuels on NO_x-reduction. *Fuel*, **73**(9), 1443–1446.
- Kunii, D., Levenspiel, O. 1991. *Fluidization engineering*. 2nd ed. Wiley, Massachusetts.
- Kuprianov, V.I. 2005. Applications of a cost-based method of excess air optimization for the improvement of thermal efficiency and environmental performance of steam boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **9**(5), 474–498.
- Kuprianov, V.I., Kaewklum, R., Chakritthakul, S. 2011. Effects of operating conditions and fuel properties on emission performance and combustion efficiency of a swirling fluidized-bed combustor fired with a biomass fuel. *Energy*, **36**(4), 2038–2048.
- Löffler, G., Wargadalam, V.J., Winter, F. 2002. Catalytic effect of biomass ash on CO, CH₄ and HCN oxidation under fluidised bed combustor conditions. *Fuel*, **81**(6), 711–717.
- Madhiyanon, T., Lapirottanakun, A., Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S. 2006. A novel cyclonic fluidized-bed combustor (Ψ -FBC): Combustion and thermal efficiency, temperature distributions, combustion intensity, and emission of pollutants. *Combustion and Flame*, **146**(1–2), 232–245.
- McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, **83**(1), 37–46.
- Natarajan, E., Nordin, A., Rao, A.N. 1998. Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors. *Biomass and Bioenergy*, **14**(5–6), 533–546.
- Nussbaumer, T. 2003. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction†. *Energy & Fuels*, **17**(6), 1510–1521.
- Permchart, W., Kouprianov, V.I. 2004. Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels. *Bioresource Technology*, **92**(1), 83–91.
- Qian, F.P., Chyang, C.S., Huang, K.S., Tso, J. 2011. Combustion and NO emission of high nitrogen content biomass in a pilot-scale vortexing fluidized bed combustor. *Bioresource Technology*, **102**(2), 1892–1898.
- Saenger, M., Hartge, E.U., Werther, J., Ogada, T., Siagi, Z. 2001. Combustion of coffee husks. *Renewable Energy*, **23**(1), 103–121.

- Salzmann, R., Nussbaumer, T. 2001. Fuel Staging for NO_x Reduction in Biomass Combustion: Experiments and Modeling. *Energy & Fuels*, **15**(3), 575-582.
- Shimizu, T., Han, J., Choi, S., Kim, L., Kim, H. 2006. Fluidized-bed combustion characteristics of cedar pellets by using an alternative bed material. *Energy & Fuels*, **20**(6), 2737–2742.
- Shu, Y., Zhang, F., Wang, H., Zhu, J., Tian, G., Zhang, C., Cui, Y., Huang, J. 2015. An experimental study of NO reduction by biomass reburning and the characterization of its pyrolysis gases. *Fuel*, **139**, 321-327.
- Splithoff, H., Greul, U., Rüdiger, H., Hein, K.R.G. 1996. Basic effects on NO_x emissions in air staging and reburning at a bench-scale test facility. *Fuel*, **75**(5), 560-564.
- Su, S., Xiang, J., Sun, L., Hu, S., Zhang, Z., Zhu, J. 2009. Application of gaseous fuel reburning for controlling nitric oxide emissions in boilers. *Fuel Processing Technology*, **90**(3), 396-402.
- Sun, Z.-A., Jin, B.-S., Zhang, M.-Y., Liu, R.-P., Zhang, Y. 2008a. Experimental study on cotton stalk combustion in a circulating fluidized bed. *Applied Energy*, **85**(11), 1027–1040.
- Sun, Z., Jin, B., Zhang, M., Liu, R., Zhang, Y. 2008b. Experimental studies on cotton stalk combustion in a fluidized bed. *Energy*, **33**(8), 1224–1232.
- Tarelho, L.A.C., Neves, D.S.F., Matos, M.A.A. 2011. Forest biomass waste combustion in a pilot-scale bubbling fluidised bed combustor. *Biomass and Bioenergy*, **35**(4), 1511–1523.
- Tillman, D.A., Rossi, A.J., Kitto, W.D. 1981. *Wood Combustion*. Academic Press, New York.
- Topal, H., Atimtay, A.T., Durmaz, A. 2003. Olive cake combustion in a circulating fluidized bed. *Fuel*, **82**(9), 1049–1056.
- Turns, S. 2006. *An Introduction to Combustion*. McGraw-Hill, Boston.
- Varol, M., Atimtay, A.T. 2007. Combustion of olive cake and coal in a bubbling fluidized bed with secondary air injection. *Fuel*, **86**(10-11), 1430–1438.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.U., Ogada, T., Siagi, Z. 2000. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, **26**(1), 1–27.
- Winter, F., Wartha, C., Hofbauer, H. 1999. NO and N₂O formation during the combustion of wood, straw, malt waste and peat. *Bioresource Technology*, **70**(1), 39-49.
- Youssef, M.A., Wahid, S.S., Mohamed, M.A., Askalany, A.A. 2009. Experimental study on Egyptian biomass combustion in circulating fluidized bed. *Applied Energy*, **86**(12), 2644-2650.

Yu, C., Qin, J., Nie, H., Fang, M., Luo, Z. 2011. Experimental research on agglomeration in straw-fired fluidized beds. *Applied Energy*, **88**(12), 4534–4543.

กัญจนา บุญเกียรติ. (2544). เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาคผนวก

ภาคผนวก (ก) การเผยแพร่งานวิจัย

พิเชฐ นิลดวงดี (2559) การศึกษาเชิงทดลองเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดที่ใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบด ในวารสารสืบเนื่องการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 1 มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี วันที่ 26 พฤษภาคม 2559 ณ จังหวัดกาญจนบุรี หน้า 627-637



ห้อง 311 : สาขาประวัติศาสตร์ท้องถิ่น สาขาการท่องเที่ยว และสาขาสัตว์เลี้ยง	
Chairperson : รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรนภา พรหมมา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนิดา ตรัสสวัสดิ์	
เวลา	เรื่อง
12.30 – 13.00 น.	การใช้ยาแผนโบราณจากตำรายาศิลาจารย์กวดพระเชตุพนวิมลมังคลาราม (วัดโพธิ์) โดย วัฒนา ชยธวัช
13.00 – 13.30 น.	การวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วมการจัดรูปแบบการท่องเที่ยวเชิงนิเวศในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา อำเภอกระแสดินธุ์ จังหวัดสงขลา โดย ป้องศักดิ์ ทองเนื้อแข็ง
13.30 – 14.00 น.	การคัดเลือกและศึกษาคุณสมบัติของเอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อแอคติโนมัยซีท โดย จีราวรรณ ศิลภัย และคณะ
14.00 – 14.30 น.	การพัฒนาสร้างวัสดุไม้ไฟเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ OTOP จังหวัดเพชรบูรณ์ โดย ขุนแผน ตุ่มทองคำ, น้ำผึ้ง พูนวิวัฒน์ และนภาพร ตุ่มทองคำ
14.30 – 15.00 น.	การศึกษาเชิงทดลองเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบด โดย พิเชฐ นิลดวงดี

การศึกษาเชิงทดลองเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบด
Experimental Study on Firing of Palm Kernel Shell in A Fluidized Bed of Alumina
Sand

พิเชฐ นิลดวงดี

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

Pichet Ninduangdee

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Phetchaburi Rajabhat University,

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกรวยที่ใช้สำหรับการเผาไหม้กะลาปาล์ม จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า การใช้ทรายซิลิกาสำหรับการเผาไหม้กะลาปาล์มเกิดปัญหาการเกาะตัวของเบด ดังนั้น ทรายอะลูมินาจึงถูกใช้เป็นวัสดุเบดเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุเบดในเตาเผาแทนทรายซิลิกา โดยในระหว่างการเผาไหม้มีการป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตราคงที่ 45 กิโลกรัมต่อชั่วโมงเพื่อควบคุมปริมาณความร้อนป้อนเข้าเตาเผาที่ประมาณ 200 กิโลวัตต์ความร้อน และมีการควบคุมอากาศส่วนเกินในช่วง 20–80 เปอร์เซ็นต์ ในทุกๆ การทดลอง มีการวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซมลพิษในแนวแกนกลางของเตาเผาและที่ปลายปล่องไอเสีย จากการทดลองพบว่า อากาศส่วนเกินมีผลกระทบต่ออัตราการปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเป็นอย่างมาก การปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถทำได้โดยการเพิ่มอากาศส่วนเกิน ในทางตรงกันข้าม ไนตริกออกไซด์สามารถควบคุมโดยการลดอากาศส่วนเกิน ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาอยู่ที่ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่า ไม่เกิดการจับตัวเป็นก้อนของทรายอะลูมินาตลอดการทดลอง 30 ชั่วโมง

คำสำคัญ : กะลาปาล์ม, การเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด, มลพิษ, การเกาะตัวของวัสดุเบด

ABSTRACT

This work aimed at investigation of combustion and emission characteristics of a cone-shaped fluidized-bed combustor firing palm kernel shell. The use of silica as bed material in a preliminary tests caused serious bed agglomeration. Alumina sand was therefore used as bed material in the combustor to prevent the bed agglomeration. During the combustion tests, palm kernel shell was burned at constant fuel feed rate of 45 kg/h ensuring 200 kW_{th} heat input to the combustor, while excess air was controlled within 20–80%. Temperature and gaseous (CO, C_xH_y, and NO) concentration were measured in axial direction of the combustor, as well as at stack. The finding revealed substantial effects of excess air on combustion and emission performance of the combustor. High (about 99%) combustion efficiency was achievable. No bed agglomeration was found during 30-h tests.

Keywords : palm kernel shell, fluidized-bed combustion, emissions, bed agglomeration

บทนำ

อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อประเทศไทย ความต้องการใช้น้ำมันปาล์มในประเทศ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 0.13 ต่อปี ในปี 2553 ความต้องการใช้น้ำมันเพื่อการบริโภค 924,000 ตัน เพิ่มขึ้นจาก 910,700 ตัน ในปีเดียวกันความต้องการใช้เพื่อเป็นวัตถุดิบผลิตไบโอดีเซลมีประมาณ 470,000 ตัน เพิ่มขึ้นจาก 380,000 ตัน คิดเป็นร้อยละ 23.68 ทั้งนี้ เนื่องจากนโยบายของรัฐบาลที่มีการสนับสนุนให้มีการผลิตและใช้น้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) แต่อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มจะมีวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตในปริมาณมาก ซึ่งได้แก่ ทะลายปาล์ม (48%) ทะลายปาล์มตัวผู้ (28%) ใบปาล์ม (12%) และกะลาปาล์ม (8%) (Prasertsan และ Prasertsan, 1996)

เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized-Bed Combustion) เป็นวิธีการเผาไหม้ชนิดหนึ่งที่นิยมและแพร่หลายสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หลากหลาย เช่น เชื้อเพลิงเกรดต่ำที่มีค่าความร้อนต่ำ ปริมาณขี้เถ้าสูงและความชื้นสูง นอกจากนี้ เตาฟลูอิดไคซ์ยังมีหลากหลายรูปร่างและขนาด ซึ่งการฟลูอิดไคซ์ขึ้นภายในเตาชนิดต่างๆ สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของความร้อน รวมถึง การผสมกันที่ดีของเชื้อเพลิงและอากาศจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้ที่สูงและมีมลพิษเนื่องจากการเผาไหม้ต่ำ อีกด้วย (Werther et al., 2000; Permchart and Kuprianov, 2004) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการเผาไหม้ชีวมวลจะถูกพิจารณาว่ามีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นศูนย์ (CO_2 -neutral) ในระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล พบว่า ยังมีการปลดปล่อยมลภาวะหลักอื่นๆ เช่น ไนตริกออกไซด์ (NO), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) ออกมาระหว่างการเผาไหม้

นอกจากนี้ ปัญหาหลักอีกอย่างหนึ่งที่พบระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic) จำพวกอัลคาไล (alkali) เช่น โพแทสเซียม (Potassium, K) และโซเดียม (Sodium, Na) เป็นส่วนประกอบในเถ้าสูงจะทำให้เกิดปัญหา อาทิเช่น Fouling Slagging และ bed agglomeration "การจับตัวกันของวัสดุเบด" (bed agglomeration) เป็นหาที่พบมากในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด เนื่องจากซิลิกาที่มีอยู่ในทรายจะทำปฏิกิริยากับอัลคาไล (สถานะแก๊ส) ที่ถูกปลดปล่อยออกมาในระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลทำให้เกิดสารประกอบยูเทคติก (eutectics) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เป็นผลทำให้พื้นผิวของอนุภาคทรายมีความเหนียวเหนียว เนื่องจากอนุภาคของแข็งในระบบฟลูอิดไคซ์เบดมีการเคลื่อนที่ จึงทำให้เกิดการชนกันของอนุภาคทรายที่มีความเหนียวอย่างต่อเนื่อง หากไม่มีการยับยั้งกระบวนการนี้ จะทำให้อนุภาคทรายจับตัวกันจนเป็นก้อนขนาดใหญ่ ส่งผลให้การทำงานของระบบฟลูอิดไคซ์เบดผิดปกติ และจำเป็นต้องมีการหยุด (shutdown) การทำงานของระบบเพื่อทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าว (Werther et al., 2000; Chaivatamaset et al., 2011)

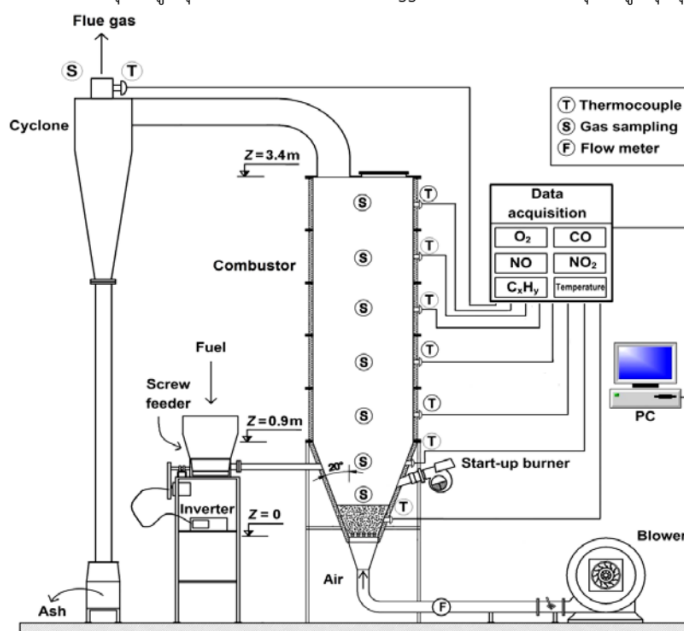
ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันการจับตัวของเบดโดยการเลือกใช้วัสดุเบดทางเลือก (alternative bed materials) เช่น ทรายอะลูมินา (alumina sand) โดโลไมท์ (dolomite) หินปูน (limestone) และเหล็กออกไซด์ (ferric oxide) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า วัสดุเบดเหล่านี้สามารถป้องกันการเกิดการจับตัวกันของวัสดุเบดได้เป็นอย่างดี แม้จะใช้กับเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของโพแทสเซียมสูงก็ตาม (Sun et al., 2010; Shimizu et al., 2006; Llorente et al., 2006) อย่างไรก็ตามวัสดุเบดทางเลือกที่กล่าวมาส่วนใหญ่จะมีราคาค่อนข้างสูง ทำให้การนำมาใช้ในระบบจริงยังไม่เป็นที่นิยม ดังนั้น เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกรวย (conical fluidized-bed combustor) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการใช้วัสดุเบดที่มีราคาสูงในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีส่วนประกอบของโพแทสเซียมสูง เนื่องจากทำให้สามารถลดปริมาณการใช้ของวัสดุเบดได้อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอื่น (Arromdee and Kuprianov, 2012)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษระหว่างการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรวงกรวยที่ใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบดเพื่อป้องกันการจับตัวกันของวัสดุเบด

วิธีดำเนินการวิจัย

ชุดการทดลอง : เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรวงกรวย

ชุดการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในภาพที่ 1 โดยรูปที่ 1 แสดงแผนภาพของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรวงกรวยที่ใช้สำหรับการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้จากการผลิตปาล์มน้ำมัน (กะลาปาล์ม) โดยเตาเผาประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ (1) ส่วนทรวงกรวยมุม 40° (เป็นมุมที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการออกแบบ) ความสูง 1 เมตร ติดตั้งอยู่ด้านล่างของเตา (2) ส่วนทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.9 เมตร ความสูง 2.5 เมตร ซึ่งประกอบมาจาก ทรงกระบอก 5 ชิ้น แต่ละชิ้นสูง 0.5 เมตร เตาเผาสร้างมาจากเหล็กเคลือบกันสนิม (galvanized steel) หนา 4.5 มิลลิเมตร และถูกหุ้มฉนวนภายในด้วยปูนซีเมนต์ นอกจากตัวเตาเผาแล้ว มีการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ 8 ตัว (thermocouple of type K ความแม่นยำในการวัด $\pm 0.5^\circ\text{C}$) ตลอดความสูงของเตาและที่ปลายปล่องไอเสียเพื่อทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาระหว่างการเผาไหม้ โดยหัววัดอุณหภูมิทุกตัวเชื่อมต่อกับ data logger ซึ่งสามารถแสดงอุณหภูมิทุกจุดได้พร้อมกัน



ภาพที่ 1 เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดทรวงกรวย

เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าเตาเผาโดยใช้เครื่องป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรูที่ถูกต่อเข้ากับส่วนกรวยของเตาเผา อากาศที่ใช้เผาไหม้ถูกป้อนเข้าเตาโดยเครื่องจ่ายอากาศขนาด 25 แรงม้า ผ่านท่อขนาด 10 เซนติเมตร หัวกระจายอากาศถูกใช้เพื่อการกระจายอากาศและการสร้างฟลูอิดไคซ์เซชันภายในเตาให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัดของเตาเผา

ในระหว่างกระบวนการเริ่มต้นเตา หัวเผาน้ำมันดีเซลถูกใช้สำหรับการอุ่นวัสดุเบด เมื่อทรายอะลูมินาเริ่มมีอุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงเพียงพอต่อการติดไฟของชีวมวล ก็จะหยุดการจ่ายน้ำมัน จากนั้นจะเริ่มการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงและวัสดุเบด

ในงานวิจัยนี้ กะลาปาล์ม ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทดลอง ตารางที่ 1 แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติของกะลาปาล์มที่ใช้ในการวิจัยนี้ จากตารางที่ 1 พบว่าเชื้อเพลิงนี้มีความเหมาะสมกับการที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้เนื่องจากมีค่าความร้อนที่ค่อนข้างสูง สามารถเปรียบเทียบได้กับ ถ่านหินเกรดต่ำ นอกจากนี้ความชื้นและเถ้าของเชื้อเพลิงนี้ยังมีปริมาณต่ำด้วย แต่อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าพบว่า เชื้อเพลิงชนิดนี้มี ซิลิกอน แคลเซียม และโปแทสเซียม ในปริมาณที่อาจจะทำให้เกิดการหลอมตัวของเถ้าและเกิดการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุเบด หากว่าทรายซิลิกาถูกใช้เป็นวัสดุเบด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกะลาปาล์มที่ใช้ในการทดสอบ

องค์ประกอบธาตุในเชื้อเพลิง (wt.%, as-received basis)					การวิเคราะห์แบบประมาณ (wt.%, as-received basis)				
คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน	ไนโตรเจน	กำมะถัน	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)
48.06	6.98	38.69	1.27	0.09	5.4	4.7	71.7	18.8	16,300
องค์ประกอบสารอนินทรีย์ในเถ้าของกะลาปาล์ม (%wt.)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Cl	

ดังนั้น ทรายอะลูมินาที่มีขนาดอนุภาค 300–500 ไมครอน จึงถูกใช้เป็นวัสดุเบดแทนทรายซิลิกาเพื่อป้องกันการจับตัวกันของวัสดุเบด ทรายอะลูมินาที่ใช้มีส่วนประกอบหลักคือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ประมาณ 87 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกอนออกไซด์ (SiO₂) ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ ความสูงของเบดที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ 30 เซนติเมตร

วิธีการทดลอง

ในระหว่างการทดลองเผาไหม้ กะลาปาล์มถูกป้อนเข้าเตาเผาด้วยอัตรา 45 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เพื่อควบคุมปริมาณความร้อนเข้าเตาให้คงที่ 200 kW_m แต่สำหรับการทดสอบ มีการปรับอากาศส่วนเกิน (excess air) ที่ใช้เผาไหม้ 4 ค่า คือ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตัวแปรที่ทำการวัดในขณะทำการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วย อุณหภูมิ ความเข้มข้นของก๊าซ (O₂, CO, C_xH_y และ NO) ภายในเตาเผาและที่ทางออกของไซโคลน (ปล่องไอเสีย) เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาฟลูอิดเบด อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซ คือ เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Testo-350 (Testo Germany)

ปริมาณอากาศตามทฤษฎี (the theoretical volume of air, m³/kg, at 0 °C and 1 atm) ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม ภายใต้สภาวะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (stoichiometric conditions) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 โดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง

$$V^0 = 0.0889(C + 0.375S) + 0.265H - 0.0333O \quad \text{สมการที่ 1}$$

ปริมาณไอเสียแห้ง (volume of dry flue gas, V_{dg}, m³/kg, under standard conditions), ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม สามารถคำนวณจากสมการที่ 2

$$V_{dg} = V_{RO_2} + V^0_{N_2} + (\alpha - 1)V^0 \quad \text{สมการที่ 2}$$

โดยที่ V_{RO₂} และ V⁰_{N₂}, สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

$$V_{RO_2} = 0.01866(C + 0.375S) \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$V^0_{N_2} = 0.79V^0 + 0.08N \quad \text{สมการที่ 4}$$

ในการทดสอบการเผาไหม้ พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวกำหนดสภาวะการทำงานคือ อากาศส่วนเกิน (excess air, EA) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (excess air ratio, α) โดยใช้ข้อมูลของปริมาณออกซิเจน (O_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ (C_xH_y เทียบเป็น CH_4) ที่วัดได้ ณ ทางออกของปล่องไอเสีย อัตราส่วนอากาศส่วนเกินคำนวณจากสมการที่ 5

$$\alpha = \frac{21}{21 - (O_2 - 0.5CO - 2CH_4)} \quad \text{สมการที่ 5}$$

ปริมาณเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (EA, %) คำนวณจากสมการที่ 6

$$EA = 100(\alpha - 1) \quad \text{สมการที่ 6}$$

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาสามารถคำนวณได้โดยวิธีความร้อนสูญเสีย (the heat-loss method) (Basu, 2000) ซึ่งรวมผลของความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (incomplete combustion) และความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ ตามสมการที่ 7

$$\eta_c = 100 - (q_{ic} + q_{uc}) \quad \text{สมการที่ 7}$$

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ความร้อนที่สูญเสียจากคาร์บอนส่วนที่ไม่เผาไหม้จำเป็นต้องหาจากถ้ำลอยที่เกินออกมาจากกระบวนการเผาไหม้ โดยค่าการสูญเสียความร้อนเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ในเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการที่ 8

$$q_{uc} = 32,866 \left(\frac{C_c}{100 - C_c} \right) A \frac{(100)}{LHV} \quad \text{สมการที่ 8}$$

โดย C_c คือ คาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ที่อยู่ในเชื้อเพลิง (คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก)
 A คือ ปริมาณเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิง (คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก)
 LHV คือ ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)

ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์สามารถคำนวณได้จาก ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ก๊าซไฮโดรเจน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่วัดได้ ณ ทางออกของปล่องไอเสียของเตาเผา ปริมาณความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9

$$q_{ic} = (126.4CO + 358CH_4) \times V_{dg} \frac{(100)}{LHV} \quad \text{สมการที่ 9}$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด

โดยปกติแล้วในเตาเผาแบบฟลูอิดไชด์เบดจะมีการใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบดเนื่องจากหาได้ง่ายและมีราคาถูก ดังนั้น ในตอนเริ่มต้นของงานวิจัยนี้ จึงได้ใช้ทรายซิลิกาขนาดอนุภาค 300-500 ไมครอน เป็นวัสดุเบด อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบการเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด พบว่า หลังจากการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผู้ทดสอบสังเกตเห็นถึงความผิดปกติระหว่างการดำเนินงาน คือ อุณหภูมิเบดมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากประมาณ 850 °C เป็น 1100 °C และเกิดการแบ่งชั้นของอุณหภูมิในแต่ละช่วงความสูงของเตาเผาอย่างชัดเจน และ

พบว่าความดันตกคร่อมเบตเกิดการลดลงจนหยุดนิ่ง นอกจากนั้น ยังพบว่าเกิดกลุ่มควันดำออกมาจากปล่องไอเสียเป็นอย่างมาก โดยสิ่งเหล่านี้ เป็นสัญญาณบ่งบอกถึงความผิดปกติของการเกิดฟลูอิดซ์เซชัน (การเคลื่อนไหว) ของเบตและการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น จึงได้หยุดการทำงานของเตาเผาด้วยการหยุดป้อนเชื้อเพลิงแล้วทำการเพิ่มอากาศเข้าเตาให้มากที่สุดโดยการปรับเครื่องจ่ายอากาศ

หลังจากที่เตาเผาเย็นลง มีการเปิดเตาแล้วตรวจสอบสิ่งที่เกิดขึ้นและพบว่า เกิดการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุเบต ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุเบต (ทราย) จับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่มากกว่า 8 นิ้ว และจากการตรวจสอบทางเคมีของตัวอย่างทรายที่จับตัวกัน พบว่า มีส่วนประกอบของยูเทคติก พวก $K_2O-CaO-SiO_2$ ซึ่งจากเฟสไดอะแกรมแล้วยูเทคติกนี้ มีจุดหลอมเหลวต่ำ (ประมาณ $700-900\text{ }^{\circ}\text{C}$) ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิการทำงานของเตาเผาฟลูอิดซ์เบต

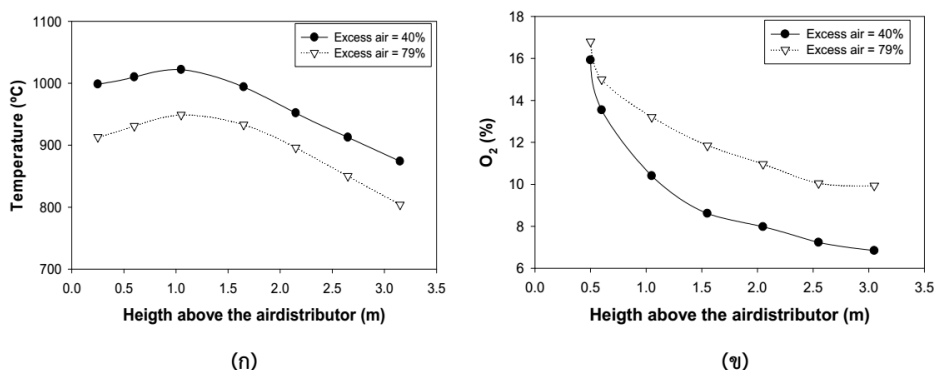


ภาพที่ 2 ตัวอย่างของเบตที่เกิดการจับตัวกันระหว่างการเผาไหม้กะลาปาล์ม

การเผาไหม้โดยใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบต

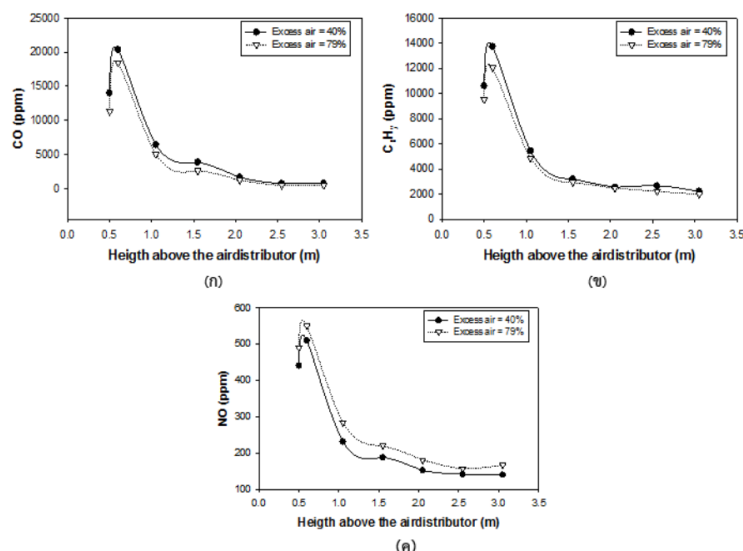
การกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนในเตาเผาฟลูอิดซ์เบต

ภาพที่ 3 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนในเตาเผาฟลูอิดซ์เบตวัดในแนวกึ่งกลางหน้าตัดเตาไล่ไปตามระดับความสูงของเตาระหว่างการเผาไหม้กะลาปาล์มที่อากาศส่วนเกินประมาณ 40% และ 80% จากการกระจายตัวของอุณหภูมิพบว่า ในช่วงความสูงต่ำกว่า 1 เมตร (ส่วนกรวยของเตาเผา) มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างช้าๆ และสูงสุดที่ความสูง 0.9 เมตร เนื่องจากในส่วนกรวยนี้ มีอนุภาคของแข็งจากเบตและเชื้อเพลิง และก๊าซต่างๆ อยู่มาก และจะเกิดการถ่ายเทมวลและการผสมกันของสารที่เผาไหม้อย่างรุนแรง (intensive) ทำให้เกิดการเผาไหม้เกิดขึ้นในส่วนนี้ แต่หลังจากนั้น (ที่ความสูงมากกว่า 0.9 เมตร) อุณหภูมิภายในเตาเผาจะค่อยๆ ลดลงตามระดับความสูงของเตาเผา เนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา เมื่อทำการเพิ่มอากาศส่วนเกินจาก 40% เป็น 80% พบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของเตาเผาลดลงประมาณ $50-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากอากาศส่วนเกินที่มากขึ้นจะทำให้สูญเสียความร้อนจากเตาเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 3 (ก) การกระจายตัวของอุณหภูมิและ (ข) ความเข้มข้นของออกซิเจนวัดในแนวแกน (กึ่งกลางหน้าตัด) ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่ทำการเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ที่อากาศส่วนเกิน 40% และ 80%

จากภาพที่ 3 (ข) พบว่า ปริมาณออกซิเจนในส่วนทรงกรวยมีการลดลงตลอดความสูงของเตาเผา โดยในส่วนทรงกรวย (ต่ำกว่า 0.9 เมตร) ของเตาเผาจะมีการลดลงของออกซิเจนอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับส่วนทรงกระบอก ทั้งนี้เป็นเพราะออกซิเจนส่วนใหญ่ถูกใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงในส่วนทรงกรวย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอากาศส่วนเกิน 40% และ 80% พบว่าพฤติกรรมของออกซิเจนในส่วนทรงกรวยแตกต่างกัน เมื่อใช้อากาศส่วนเกิน 40% พบว่ามีอัตราการลดลงของออกซิเจนมีมากกว่าการใช้อากาศส่วนเกิน 80% เนื่องจากเมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกิน (หมายความว่าเพิ่มปริมาณอากาศและความเร็วของการไหล) จะทำให้เวลาของการเกิดปฏิกิริยาภายในเตา (residence time) ลดลง



ภาพที่ 4 (ก) ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ (ข) ไฮโดรคาร์บอน และ (ค) ไนตริกออกไซด์ วัดในแนวแกน (กึ่งกลางหน้าตัด) ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่ทำการเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้ที่อากาศส่วนเกิน 40% และ 80%

การกระจายตัวของคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน และไนตริกออกไซด์ในเตาเผาฟลูอิดซ์เบด

ภาพที่ 4 เปรียบเทียบการกระจายตัวของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) และไนตริกออกไซด์ (NO) วัด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัดตามระดับความสูงต่างๆ ของเตาเผาฟลูอิดซ์เบด เมื่อทำการเผาไหม้กะลาปาล์มโดยใช้อากาศส่วนเกิน 40% และ 80% จากรูปจะเห็นได้ว่า กราฟทุกการทดลองสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนตามความสูง คือ (1) ส่วนล่างของเตา (ต่ำกว่า 0.6 เมตร) และ (2) ส่วนบน (ตั้งแต่ 0.6 เมตร เป็นต้นไป) ซึ่งพฤติกรรมที่เห็นในกราฟบ่งชี้ให้เห็นถึงการก่อตัว (formation) และลดลงเนื่องจากการออกซิเดชัน (oxidation) ของ CO C_xH_y หรือ รีดักชัน (reduction) ของ NO และเนื่องจากการเพิ่มขึ้นและลดลงนี้ทำให้จุดสูงสุด (peak) ณ ตำแหน่งความสูง 0.6 เมตร

จากภาพที่ 4 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นว่า ในส่วนล่างของเตา ความเข้มข้นของ CO และ C_xH_y มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการระเหยของสารระเหย (devolatilization) ที่อยู่ในชีวมวลและการเผาไหม้ถ่านที่เกิดขึ้น (char oxidation) ในขณะเดียวกันก็มีการออกซิเดชันของก๊าซ CO และ C_xH_y ที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เช่นกัน แต่มีอัตราที่ต่ำกว่าการก่อตัวโดยปกติแล้ว CO จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็น CO_2 ด้วย O และ OH ขณะที่การออกซิเดชันของ C_xH_y จะเกิดขึ้นสองขั้นตอน คือ (1) การแตกตัวของ C_xH_y เป็น CO และ (2) การออกซิเดชันของ CO เป็น CO_2 (Turns, 2006) เมื่อทำการเพิ่มอากาศส่วนเกินจะเห็นได้ค่าความเข้มข้น CO และ C_xH_y ที่ทุกตำแหน่งความสูงของเตาจะมีน้อยกว่าอากาศส่วนเกินที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะมีปริมาณออกซิไดเซอร์ (ออกซิเจน) เข้าไปในระบบเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์เพิ่มมากยิ่งขึ้น

สำหรับส่วนบนของเตา อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าการก่อตัวทำให้มีการลดลงของ C_xH_y และ CO ตามความสูงเตา ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) และ (ข)

โดยพื้นฐานแล้วการก่อตัวของ NO ในระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลจะเกิดขึ้นเนื่องจากสารระเหยที่มีอยู่ในชีวมวล (ส่วนใหญ่ NH_3) ตามกลไกการก่อตัวของ NO (NO-formation mechanism) (Werther et al., 2000; Winter et al., 1999) แต่ในขณะเดียวกันในระหว่างการเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบดก็มีปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยา คาทะไลติกรีดักชันของ NO โดย CO ที่มีอยู่บนพื้นผิวของถ่าน/เถ้า/วัสดุเบด และปฏิกิริยาระหว่าง NO กับสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน โดยปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้เกิดการลดลงของ NO และนอกจากนี้ เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบดซึ่งมีความสามารถในการทำให้เกิดปฏิกิริยาคาทะไลติกรีดักชันของ NO อีกด้วย

จากกราฟการกระจายตัวของ NO ในภาพที่ 4 (ค) พบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกันกับ CO และ C_xH_y โดยมีการก่อตัวและการลดตามกลไกที่กล่าวมาข้างต้น

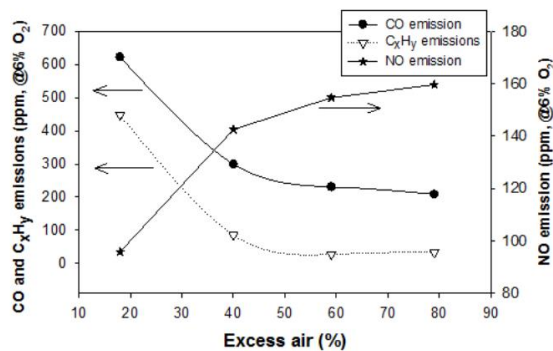
สมรรถนะการทำงานของเตาเผาฟลูอิดซ์เบด

การปล่อยมลพิษ

ภาพที่ 5 แสดงปริมาณของก๊าซมลพิษที่ถูกปล่อยจากเตาเผาฟลูอิดซ์เบดที่ทำการเผาไหม้กะลาปาล์มที่อากาศส่วนเกินต่างกัน จากกราฟจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของ CO และ C_xH_y มีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการเพิ่มอากาศส่วนเกินเนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการปรับอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น พบว่า การปล่อย NO มีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกลไกการก่อตัวของ NO ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า มลพิษที่เกิดขึ้นสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับอากาศส่วนเกิน

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2558) ได้ทำการกำหนดมาตรฐานอากาศเสียที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยจำกัดให้มีการปล่อย CO และ NO ไม่เกินกว่า 740 ppm และ 205 ppm (คิดที่ 6 % O_2) ตามลำดับ แต่สำหรับ C_xH_y ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานที่แน่นอน (แต่ต้องควบคุม

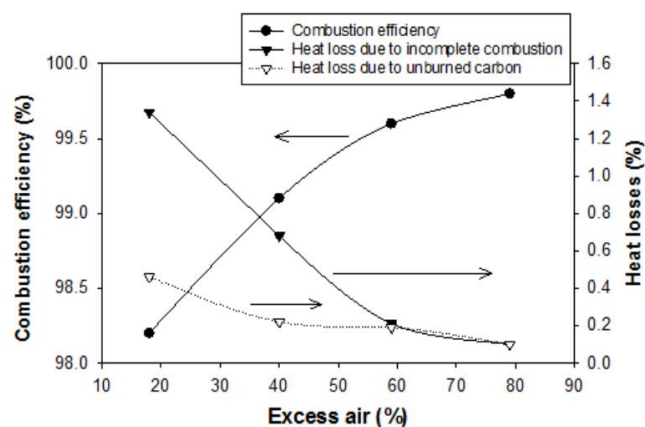
เนื่องจากมีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้) จากข้อมูลนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่ามลพิษ CO และ NO ที่ถูกปล่อยจากเตาเผาไหม้ จะเห็นได้ว่า ทุกย่านการทำงาน (อากาศส่วนเกิน) การปลดปล่อยมลพิษดังกล่าวไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 5 มลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบทรงกรวยที่อากาศส่วนเกินต่างกัน

ประสิทธิภาพการเผาไหม้

ภาพที่ 6 แสดงความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ที่ใช้สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ พบว่า ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้มากกว่า ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณเถ้าของกะลาปาล์มมีปริมาณน้อย (4.7%) แต่อย่างไรก็ตามเตาเผาฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยนี้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้มากกว่า 98%



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเมื่อเผาไหม้กะลาปาล์มที่อากาศส่วนเกินต่างกัน

ลักษณะของวัสดุเบตหลังจากการเผาไหม้ในระยะยาว

เพื่อทำการทดสอบความสามารถในการป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของทรายอะลูมินาที่ใช้เป็นวัสดุเบตในระยะยาว ได้มีการทำการทดสอบการเผาไหม้เป็นเวลา 30 ชั่วโมง โดยใช้อากาศส่วนเกินคงที่ 40% และทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ความดันตกคร่อมเบต และการปล่อยมลพิษจากเตาเผาตลอดการเผาไหม้ จากการทดสอบนี้พบว่า อุณหภูมิเบต ความดันตกคร่อมเบต และการปล่อยมลพิษมีความสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการทดสอบ 30 ชั่วโมง ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าเตาเผาฟลูอิดซ์เบตแบบทรงกรวยที่ใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบต มีการทำงานเป็นปกติไม่มีการเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนของวัสดุเบต

หลังจากการทดสอบ 30 ชั่วโมง ได้มีการตรวจสอบลักษณะทั่วไปของวัสดุเบต ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างทรายอะลูมินาก่อนและหลังการเผาไหม้ จากรูปจะเห็นได้ว่า วัสดุเบตเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีน้ำตาล แต่อย่างไรก็ตามทรายอะลูมินาไม่มีการจับตัวเป็นก้อน และมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับทรายก่อนทำการทดสอบเผาไหม้ นอกจากนี้ทรายอะลูมินายังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก



ภาพที่ 7 ตัวอย่างทรายอะลูมินา (ก) ก่อนทำการทดสอบการเผาไหม้ และ (ข) หลังจากการทดสอบ 30 ชั่วโมง

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการเผาไหม้กะลาปาล์มซึ่งเป็นชีวมวลที่มีมากในประเทศไทยในเตาเผาฟลูอิดซ์เบตแบบทรงกรวยที่ใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบตเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุเบต จากผลการทดลองพบว่า อากาศส่วนเกินมีผลต่อการปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามมลพิษที่เกิดขึ้นสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับอากาศส่วนเกินให้เหมาะสม เตาเผานี้สามารถทำการเผาไหม้กะลาปาล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า 98% จากการทดสอบ 30 ชั่วโมง ไม่พบสัญญาณบ่งชี้ถึงการเกิดการเกาะตัวเป็นก้อนเชื้อวัสดุเบต แต่อย่างไรก็ตาม ควรมีการทดสอบให้เป็นระยะเวลานานขึ้น เพื่อตรวจสอบความสามารถในการด้านการเกาะตัวของทรายอะลูมินา และควรมีการทดลองใช้หรือทดสอบจริงในเตาเผาหรือหม้อไอน้ำที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ควรมีการทดสอบวัสดุเบตทางเลือกอื่นๆ เช่น หินปูน โดโลไมท์ เพื่อเป็นการเพิ่มทางเลือกในการใช้วัสดุเบตและลดต้นทุนของวัสดุเบตและการแนะนำการใช้ที่หลากหลายมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- การเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2555) จาก http://122.154.14.16/oe_report/stat_agri/main.php?lang=en
- Arromdee, P., Kuprianov, V.I. (2012). **Combustion of peanut shells in a cone-shaped bubbling fluidized-bed combustor using alumina as the bed material**. Applied Energy, 97, 470–482.
- Basu, P., Cen K, F., Jestin, L. (2000). **Boilers and Burners**. New York: Springer.
- Chaivatamaset, P., Sricharoon, S., and Tia, S. (2011). **Bed agglomeration characteristics of palm shell and corncob combustion in fluidized bed**. Applied Thermal Engineering, 31: 2916–2927.
- Llorente, M. J. F., Cuadrado, R, E., Laplaza, J.M. and Carcia, J. E. C. (2006). **Combustion in bubbling fluidised bed with bed material of limestone to reduce the biomass ash agglomeration and sintering**. Fuel, 85: 2081–2092.
- Permchart, W. and Kouprianov, V.I. (2004). **Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels**. Bioresource Technology, vol. 92, pp. 83–91.
- Prasertsan, S. and Prasertsan, P. (1996). **Biomass residues from palm oil mills in Thailand: an overview on quantity and potential usage**. Biomass and Bioenergy, 11 (5): 387–395.
- Shimizu, T., Han, J., Choi, S., Kim, L. and Kim, H. (2006) **Fluidized-Bed Combustion Characteristics of Cedar Pellets by Using an Alternative Bed Material**. Energy & Fuels, 20: 2737-2742.
- Sun, Z., Shen, J., Jin, B. and Wei, L. (2010). **Combustion characteristics of cotton stalk in FBC**. Biomass and bioenergy, 34: 761–770.
- Turns, S. (2006). **An Introduction to Combustion**. Boston: McGraw-Hill.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.-U., Ogada T. and Siagi, Z. (2000). **Combustion of agricultural residues**. Progress in Energy and Combustion Science, vol. 26, pp. 1–27.
- Winter, L., Wartha, C., Hofbauer, H. (1999). **NO and N₂O formation during the combustion of wood, straw, malt waste and peat**. Bioresource Technology, 70(1): 39–49. สำนักงานเศรษฐกิจ

ภาคผนวก (ข) ประวัติคณะวิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นายพิเชฐ นิลดวงดี
(English) Mr. Pichet Ninduangdee
2. เกิดวันที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2529
3. หมายเลขบัตรประชาชน 1-4510-00084-13-7
4. ตำแหน่งทางวิชาการปัจจุบัน พนักงานมหาวิทยาลัยสายวิชาการ ตำแหน่ง อาจารย์
เวลาที่ใช้ทำวิจัย (30 ชั่วโมง : สัปดาห์)
5. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี โทรศัพท์ 083-364-2438.
E-mail: ninduangdee.p@gmail.com

6. ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา ที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อ ปริญญา/วิชา	สาขา	ชื่อสถาบัน การศึกษา	ประเทศ
2551	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1)	วศ.บ. (เครื่องกล)	วิศวกรรม เครื่องกล	มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี	ไทย
2553	Master of Engineering	M.Eng	Energy	AIT	ไทย
2559	Doctor of Philosophy	Ph.D.	Mechanical Engineering	SIIT-TU	ไทย

7. ประวัติการทำงาน

- ปี พ.ศ. 2549 : ฝึกงานที่ บริษัท ไคกินอินดัสทรีส์ ประเทศไทย จำกัด หน้าที่รับผิดชอบ
ออกแบบระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายในตัวระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศขนาด
ใหญ่ (VRV II Air conditioner) ระยะเวลา 45 วัน
- ปี พ.ศ. 2553- ปัจจุบัน อาจารย์ ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

8. สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ

- Fluidized-bed combustion of biomass fuels (agricultural residues)
- Energy conservation and management
- Renewable energy
- Thermal system design

9. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

ชื่อโครงการ	สถานภาพ	แหล่งทุน	ปีงบประมาณ	การดำเนินงาน
1. การศึกษาวิธีการลดก๊าซมลพิษและหลีกเลี่ยงปัญหาการจับตัวกันของวัสดุเบดที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด	Principal Investigator	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)	2558	ดำเนินการ
2. การศึกษาโครงสร้างสัญญาณคุณสมบัติทางความร้อน และการเผาไหม้ของวัสดุเหลือใช้จากปาล์ม น้ำมันเพื่อการเผาไหม้อย่างน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพสูงในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด	ผู้ร่วมโครงการ	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย	2556	เสร็จสิ้น
3. Development and Study of Measures for Minimizing Emissions from the Fluidized-Bed Combustion of Oil Palm Shells	ผู้ร่วมโครงการ	บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)	2555	เสร็จสิ้น
4. อุปกรณ์เสริมด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดใหญ่เพื่อประหยัดเชื้อเพลิง	หัวหน้าโครงการ	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	2555	เสร็จสิ้น
5. เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารทะเลพลังงานชีวมวล	หัวหน้าโครงการ	งบประมาณอุดหนุนทุนวิจัยเงินรายได้มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี	2554	เสร็จสิ้น
6. อุปกรณ์เสริมภายนอกของรถกระบะเพื่อประหยัดน้ำมัน	ผู้ร่วมโครงการ	งบประมาณอุดหนุนทุนวิจัยเงินรายได้มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี	2554	เสร็จสิ้น

10. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์วารสาร และนำเสนอประชุมวิชาการ:

- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2016). A study on combustion of oil palm empty fruit bunch in a fluidized bed using alternative bed materials: Performance, emissions, and time-domain changes in the bed condition. *Applied Energy*. Vol. 176, August 2016, pp. 34–48.
- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2015). Combustion of an oil palm residue with elevated potassium content in a fluidized-bed combustor using alternative bed materials for preventing bed agglomeration, *Bioresource Technology*. Vol. 182, April, pp. 272–281.
- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2015). Combustion of oil palm empty fruit bunch in fluidized bed using alternative bed materials: performance, emissions, and time-domain changes in the bed condition. In *Proceedings of the 23rd European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE 2015)*, 1-4 June 2015, Vienna, Austria, pp. 529–539.
- Ninduangdee, P., Kuprianov, V.I., Cha, E.Y., Kaewrath, R., Atthawethworawuth, W., and Youngyuen, P. (2015). Thermogravimetric studies on oil palm empty fruit bunch and palm kernel shell: TG/DTC analysis and modeling. In *Proceedings of 2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies (2015 AEDCEE) [CD-ROM]*, 28-29 May 2015, Bangkok, Thailand, pp. 357–358.
- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2015). A study on physical and chemical changes in the bed material during long-term combustion of oil palm residues in a fluidized bed of alumina sand. In *Proceedings of 2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies (2015 AEDCEE) [CD-ROM]*, 28-29 May 2015, Bangkok, Thailand, pp. 217–218.
- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2014). Fluidized-bed combustion of biomass with elevated alkali content: a comparative study between two alternative bed materials, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index (International Conference on Energy and Environment (ICEE 2014), 17-18 April 2014, Lisbon, Portugal)*, Vol. 8, No. 4, pp. 660-667.

- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2014). Combustion of palm kernel shell in a fluidized bed: Optimization of biomass particle size and operating conditions. *Energy Conversion and Management*, Vol. 85, September 2014, pp. 800-808.
- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2013). Pilot studies on combustion of oil palm residues in a conical fluidized-bed combustor. In Proceedings of the 12th International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET 2013) [CD-ROM], 26-29 August 2013, Hong Kong, China, Paper ID: SET2013-216, 11 p.
- Kuprianov, V.I. and Ninduangdee, P. Combustion of Oil Palm Shells in a Fluidized Bed: Optimization of Biomass Particle Size and Excess Air, In Proceedings of ECOS 2013 - The 26th international conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, July 16-19, 2013, Guilin, China. 10 p.
- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2013). Study on burning oil palm kernel shell in a conical fluidized-bed combustor using alumina as the bed material. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. Vol. 140, July 2013, pp. 199-210.
- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2013). Combustion of oil palm shells in a cone-shaped fluidized-bed combustor using dolomite as the bed material, In Proceedings of the 2013 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies (2013 AEDCEE) [CD-ROM], 30-31 May 2013, Bangkok, Thailand, pp. 21-26.
- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2013). Experimental study on combustion of oil palm shells in a conical fluidized-bed combustor using an alternative bed material. In Proceedings of the 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives [CD-ROM], 13-17 May 2013, Istanbul, Turkey, 6 p.
- Kuprianov, V.I., Arromdee, P., and Ninduangdee, P. (2012). Study on burning of peanut, tamarind and oil palm shells in a fluidized-bed combustor using alumina as the bed material. In Proceedings of the 3rd Asian Conference on Innovative Energy & Environmental Chemical Engineering (ASCON-IEEChE 2012), 11-14 November 2012, Hualien, Taiwan, pp. 91-96.
- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2012). Measures for reliable and effective operation of a conical fluidized-bed combustor fired with oil palm shells: a cold-state hydrodynamic study. In Proceedings of the Third TSME International Conference on Mechanical Engineering [CD-ROM], 24-27 October 2012, Chiang Rai, Thailand, 8 p.

Ninduangdee, P. and Kuprianov, V.I. (2012). Measures for reliable and effective operation of a conical fluidized-bed combustor fired with oil palm shells: a combustion study. In Proceedings of the Third TSME International Conference on Mechanical Engineering [CD-ROM], 24-27 October 2012, Chiang Rai, Thailand, 9 p.

พิเชฐ นิลดวงดี ช่วงชัย ชูปวา กิตตินันท์ บุญรอด บัญญัติพงษ์ ศรีอำนวย เวียงชัย นิลดวงดี (2556) การออกแบบถังปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานชีวมวล ในรายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 29 ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556 มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย

พิเชฐ นิลดวงดี ช่วงชัย ชูปวา กิตตินันท์ บุญรอด (2556) การออกแบบถังหมักด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานชีวมวล ในรายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏเพชรบุรีวิจัยเพื่อแผ่นดินไทยยั่งยืนครั้งที่ 3 “สร้างมูลค่าภูมิปัญญาพัฒนาสู่อาเซียน” วันที่ 3 สิงหาคม 2556 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

กิตตินันท์ บุญรอด **พิเชฐ นิลดวงดี** ช่วงชัย ชูปวา (2556) พฤติกรรมการจัดการขยะอินทรีย์ของครัวเรือนเขตเทศบาลเมืองเพชรบุรีจังหวัดเพชรบุรี รายงานสืบเนื่อง การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏเพชรบุรีวิจัยเพื่อแผ่นดินไทยยั่งยืนครั้งที่ 3 “สร้างมูลค่าภูมิปัญญาพัฒนาสู่อาเซียน” วันที่ 3 สิงหาคม 2556 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

ช่วงชัย ชูปวา **พิเชฐ นิลดวงดี** อภิรักษ์ แสงภาค กิตตินันท์ บุญรอด (2556) การพัฒนาเตาเผาชีวมวลทรงกระบอก รายงานสืบเนื่อง การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏเพชรบุรีวิจัยเพื่อแผ่นดินไทยยั่งยืนครั้งที่ 3 “สร้างมูลค่าภูมิปัญญาพัฒนาสู่อาเซียน” วันที่ 3 สิงหาคม 2556 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

ช่วงชัย ชูปวา, **พิเชฐ นิลดวงดี**, ขวลิศ ถิ่นวงศ์พิทักษ์ (2555) อิทธิพลของความดันในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเสียดทานภายใต้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอื่นๆ ในรายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 วันที่ 24 – 27 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

ปรัชญา มุขดา **พิเชฐ นิลดวงดี** อาทิตย์ ทับทิมหอม อุทัย ผ่องศรีมี และกุลเชษฐ์ เพียรทอง (2555) อุปกรณ์ด้านอากาศพลศาสตร์ ที่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุก ในรายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2555 จังหวัดมหาสารคาม 8 หน้า

ปรัชญา มุขดา **พิเชฐ นิลดวงดี** อนุชา สายสร้อย อุทัย ผ่องศรีมี กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวีระพันธ์ สีหานาม (2553) การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันในการติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก ในรายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี 10 หน้า

ประวัติผู้ร่วมวิจัยคนที่ 1

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นาย ปรัชญา มุกดา
(English) Mr. Prachya Mukda
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 5-3621-00007-57-1
3. ตำแหน่งทางวิชาการปัจจุบัน พนักงานมหาวิทยาลัยสายวิชาการ ตำแหน่ง อาจารย์
เวลาที่ใช้ทำวิจัย (10 ชั่วโมง : สัปดาห์)
4. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี โทรศัพท์ โทรศัพท์ 032-414455
แฟกซ์ 032-414455 มือถือ 087-9597828
E-mail: mukdaen@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา ที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อ ปริญญา/วิชา	สาขา	ชื่อสถาบัน การศึกษา	ประเทศ
2547	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วศ.บ. (เครื่องกล)	วิศวกรรม เครื่องกล	มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี	ไทย
2551	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วศ.ม. (เครื่องกล)	วิศวกรรม เครื่องกล	มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี	ไทย
*2554	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	ปร.ด. (เครื่องกล)	วิศวกรรม เครื่องกล	มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี	ไทย

* กำลังศึกษา

6. ประวัติการทำงาน

- ปี พ.ศ. 2546 : ฝึกงานที่ บริษัท กุลธรคอร์ป จำกัด แผนกออกแบบชิ้นส่วนคอมเพรสเซอร์
ระยะเวลา 45 วัน

- ปี พ.ศ. 2548-2551 ผู้ช่วยนักวิจัย และวิศวกรในโครงการศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สังกัดกระทรวงพลังงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ผู้ช่วยนักวิจัย โครงการวิจัยการศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก ทุน
สนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
2. ผู้ช่วยนักวิจัย โครงการวิจัยการพัฒนาประสิทธิภาพของเตาเผาครกแบบอุโมงค์ โดยใช้
CFD เทคนิค
3. วิศวกรโครงการส่งเสริมการผลิตและการใช้งานไบโอดีเซล กระทรวงพลังงาน

- ปี พ.ศ. 2551- ปัจจุบัน อาจารย์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

7. สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ

1. Computational Fluid Dynamics (CFD)
2. Mechanism Design
3. พลังงานทดแทน

8. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

ชื่อโครงการ	สถานภาพ	แหล่งทุน	ปีงบประมาณ	การดำเนินงาน
1. อุปกรณ์เสริมด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกทุกขนาดใหญ่เพื่อประหยัดเชื้อเพลิง	ผู้ร่วมโครงการ	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	2554	เสร็จสิ้น
2. อุปกรณ์เสริมภายนอกของรถกระบะเพื่อประหยัดน้ำมัน	หัวหน้าโครงการ	งบประมาณอุดหนุนทุนวิจัยเงินรายได้มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี	2554	เสร็จสิ้น
3. การศึกษาสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กที่ติดอุปกรณ์เสริมด้านอากาศพลศาสตร์เพื่อการประหยัดพลังงาน	หัวหน้าโครงการ	งบประมาณอุดหนุนทุนวิจัยเงินรายได้มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี	2552	เสร็จสิ้น
4. การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กที่ติดอุปกรณ์เสริมและแนวทางการประหยัดพลังงาน	ผู้ร่วมโครงการ	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	2551	เสร็จสิ้น

9. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์วารสาร และนำเสนอประชุมวิชาการ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์วารสาร

ปรัชญา मुखดา และกุลเชษฐ์ เพียรทอง. “การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์บรรทุกเล็กโดยการจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. น.129-137. ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค, 2550.

- ปรัชญา มุขตา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “อากาศพลศาสตร์เพื่อการประหยัดพลังงานสำหรับรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. น.231-237. โรงเรียนนายเรืออากาศ, 2550.
- ปรัชญา มุขตา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “อากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 1. น. 87-95. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2551.
- ปรัชญา มุขตา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “อากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเพื่อการประหยัดพลังงานโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4. น.543-553. มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2551.
- ปรัชญา มุขตา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านกรณีวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. น.225-237. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- ปรัชญา มุขตา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กที่ติดอุปกรณ์เสริมและแนวทางการประหยัดพลังงาน,” ใน งานการนำเสนอผลงานวิจัยแห่งชาติ 2552 (Thailand Research Expo 2009) 26-30 สิงหาคม 2552.
- ปรัชญา มุขตา, อนุชา สายสร้อย กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. . “การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของท้ายกระบะรถบรรทุกเล็ก,” ใน การประชุมวิชาการคณบดีเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ตุลาคม 2552.
- ปรัชญา มุขตา, อุทัย ผ่องรัศมี, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการเปิดกระจกข้างและติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 4-7 พฤศจิกายน 2552.
- ปรัชญา มุขตา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “การลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถกระบะจากการติดตั้งอุปกรณ์เสริมโดย CFD,” ใน งานการนำเสนอผลงานวิจัยแห่งชาติ 2552 (Thailand Research Expo 2010) 26-30 สิงหาคม 2553.
- ปรัชญา มุขตา, อนุชา สายสร้อย อุทัย ผ่องรัศมี, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันในการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 20-22 ตุลาคม 2553.
- ปรัชญา มุขตา, พิเชฐ นิลดวงดี, อาทิตย์ ทับทิมหอม, อุทัย ผ่องรัศมี และกุลเชษฐ์ เพียรทอง. “อุปกรณ์ด้านอากาศพลศาสตร์ ที่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุก,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2-4 พฤษภาคม 2555.

ปรัชญา มุขตา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหนาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการเปิดกระจกข้างและติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2551.

ปรัชญา มุขตา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหนาม. “การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กกรณีวิ่งตามกัน,” วารสาร ม. อบ. ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 : มกราคม-เมษายน, 2552.

ปรัชญา มุขตา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหนาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการเปิดกระจกข้างและติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” วารสารราชภัฏเพชรบุรี ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 : มกราคม-มิถุนายน 2552.

ปรัชญา มุขตา และอนุชา สายสร้อย. “อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันกับลักษณะอากาศพลศาสตร์ของรถกระบะที่ติดตั้งอุปกรณ์เสริมแบบต่าง ๆ,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 13 ฉบับที่ 4 ตุลาคม – ธันวาคม 2554

ประวัติผู้ร่วมวิจัยคนที่ 2

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นายช่วงชัย ชูปวา
(English) Mr. Chuangchai Chooppava
2. หมายเลขบัตรประชาชน 3-4511-00763-25-3
3. ตำแหน่งทางวิชาการปัจจุบัน พนักงานมหาวิทยาลัยสายวิชาการ ตำแหน่ง อาจารย์
เวลาที่ใช้ทำวิจัย (10 ชั่วโมง : สัปดาห์)
4. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี โทรศัพท์ 032-414455
แฟกซ์ 032-414455 มือถือ 089-4245150
E-mail: pui2006me@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา ที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อ ปริญญา/วิชา	สาขา	ชื่อสถาบัน การศึกษา	ประเทศ
2548	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วศ.บ. (เครื่องกล)	วิศวกรรม เครื่องกล	มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี	ไทย
2554	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วศ.บ. (เครื่องกล)	วิศวกรรม เครื่องกล	มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี	ไทย

6. ประวัติการทำงาน

1. พ.ศ. 2550 ถึง ปัจจุบัน ผู้ช่วยวิจัย การเชื่อมความเสียดทาน, เตาชีวมวล
2. ผู้ช่วยสอน Lab ทดสอบความแข็งแรงของโลหะ และ Lab ทดสอบความแข็งแรงของโลหะ
3. ผู้ช่วยวิศวกรโครงการ โครงการพึ่งพาตนเองด้านพลังงานด้วย ไบโอดีเซลชุมชน 15 จังหวัด ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, โครงการการประยุกต์ใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์ในการสูบน้ำเพื่อพื้นที่ทำกินทางการเกษตร และ โครงการประหยัดพลังงานสำหรับโรงงานขนาดเล็ก ที่ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
4. พ.ศ. 2549 ถึง พ.ศ. 2550 ทำงานตำแหน่งวิศวกรใน บริษัท CTE CONSTRUCTION
5. พ.ศ. 2546 ฝึกงานที่ หจก.กุลวิ จังหวัดอุบลราชธานี

7. สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ

- ความแข็งแรงด้านโลหะ
- ด้านพลังงานทดแทน

8. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์วารสาร และนำเสนอประชุมวิชาการ:

พิเชฐ นิลดวงดี ช่วงชัย ชูปวา กิตตินันท์ บุญรอด บัญญัติพงษ์ ศรีอำนวย เวียงชัย นิลดวงดี (2556) การ
ออกแบบปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานชีวมวล ในรายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการเสนอ

ผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 29 ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556 มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย

พิเชฐ นิลดวงดี **ช่วงชัย ขูปวา** กิตตินันท์ บุญรอด (2556) การอบแห้งปลาหมึกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานชีวมวล ในรายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏเพชรบุรีวิจัยเพื่อแผ่นดินไทยยั่งยืนครั้งที่ 3 “สร้างมูลค่าภูมิปัญญาพัฒนาสู่อาเซียน” วันที่ 3 สิงหาคม 2556 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

กิตตินันท์ บุญรอด พิชุ นิลดวงดี **ช่วงชัย ขูปวา** (2556) พฤติกรรมการจัดการขยะอินทรีย์ของครัวเรือนเขตเทศบาลเมืองเพชรบุรีจังหวัดเพชรบุรี รายงานสืบเนื่อง การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏเพชรบุรีวิจัยเพื่อแผ่นดินไทยยั่งยืนครั้งที่ 3 “สร้างมูลค่าภูมิปัญญาพัฒนาสู่อาเซียน” วันที่ 3 สิงหาคม 2556 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

ช่วงชัย ขูปวา พิชุ นิลดวงดี อภิรักษ์ แสงภาค กิตตินันท์ บุญรอด (2556) การพัฒนาเตาเผาชีวมวลทรงกระบอก รายงานสืบเนื่อง การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏเพชรบุรีวิจัยเพื่อแผ่นดินไทยยั่งยืนครั้งที่ 3 “สร้างมูลค่าภูมิปัญญาพัฒนาสู่อาเซียน” วันที่ 3 สิงหาคม 2556 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

ช่วงชัย ขูปวา, พิชุ นิลดวงดี, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ (2555) อิทธิพลของความดันในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเสียดทานภายใต้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอื่นๆ ในรายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 วันที่ 24 – 27 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

ช่วงชัย ขูปวา, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและแรงดันในการอัดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 จังหวัดเชียงใหม่ 2552

ช่วงชัย ขูปวา, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ อิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและความเร็วรอบในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก AISI 1015 ที่เชื่อมเสียดทาน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ม.อบ.ปีที่ 13 ฉบับที่ 1: 75-83, 2554

ช่วงชัย ขูปวา, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ อิทธิพลของเวลาในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก AISI 1015 ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมเสียดทาน. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.ปีที่ 3 ฉบับที่ 2: 17-24, 2553

ช่วงชัย ขูปวา, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ สุริยา โชคสวัสดิ์ อิทธิพลของความเร็วยรอบในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเสียดทานภายใต้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอื่นๆ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 จังหวัดอุบลราชธานี 2553