

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

เทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำเพื่อลดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีส่วนประกอบไนโตรเจนสูงในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

Reburning Technology for the Reduction of Nitrogen Oxides Emissions from a Fluidized-Bed Combustor Firing High Nitrogen Content Biomass

คณะผู้วิจัย

พิเชฐ นิลดวงดี

ปรัชญา มุขดา

ช่วงชัย ชูปวา

สังกัด

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

ประจำปีงบประมาณ 2560

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาศักยภาพของวิธีการเผาไหม้ร่วม 3 วิธี ในการลดการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จากเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด ในโครงการนี้ เหน้้ำมันสำปะหลังอัดเม็ด (PCR) แกลบอัดเม็ด (PRH) ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักและถูกเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงรองได้แก่ เปลือกไม้ยูคา ลิปต์สลับ (EB) และแกลบชื้น (MRH) ในเตาเผาที่ใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด การทดลองแบ่งเป็น 4 กลุ่ม อันได้แก่ (1) การเผาไหม้ด้วยวิธีการปกติ (2) การใช้เทคนิคการเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงผสม (3) การใช้เทคนิคการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นที่มีการจ่ายอากาศแบบปกติ (จ่ายอากาศจากส่วนล่างของเตาเผา) (4) การเผาไหม้ด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ (ผสมผสานระหว่างการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นและการจ่ายอากาศเป็นชั้น) การทดสอบทั้งหมดถูกทดลองที่ความร้อนป้อนเข้าเตาเผาเท่ากับ 200 kW_{th} ซึ่งในแต่ละการทดลอง มีการปรับเปลี่ยนค่าสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลัก (EF_2) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.25 อากาศส่วนเกิน (EA) ตั้งแต่ 20% ถึง 80% สำหรับกรณีการเผาไหม้ซ้ำ ในแต่ละค่าอากาศส่วนเกิน มีการปรับค่าสัดส่วนอากาศรองต่ออากาศหลัก SA/TA) ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.4 ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า EF_2 , EA และ SA/TA ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานและการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาเป็นอย่างมาก

การวิเคราะห์หาจุดเหมาะสมถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อหาค่า EF_2 , EA และ SA/TA ที่ทำให้ราคาของการปลดปล่อยมลพิษของเตามีค่าต่ำสุด จากการวิเคราะห์พบว่า สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลัก $\text{EF}_2 \approx 0.15$ และอากาศส่วนเกิน $\text{EA} = 40\% - 50\%$ มีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ด้วยวิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม และการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น เมื่อทำการเผาไหม้ด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ อากาศส่วนเกิน $\text{EA} \approx 60\%$ และอัตราส่วนอากาศรองต่ออากาศหลัก $\text{SA/TA} = 0.2 - 0.3$ มีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ด้วยวิธีการดังกล่าว ภายใต้สภาวะการทำงานนี้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตามีค่าสูงประมาณ 99% และสามารถลดการปลดปล่อย NO_x ได้ประมาณ 15% เมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม 40% เมื่อทำการเผาไหม้ด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ 55% เมื่อทำการเผาไหม้ด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ นอกจากนี้การปลดปล่อย CO และ C_xH_y ยังมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษที่กำหนดไว้มาก และที่สภาวะการทำงานนี้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตามีค่าประมาณ 99% ดังนั้นวิธีการเผาไหม้ร่วมที่เสนอในโครงการวิจัยนี้ มีศักยภาพในการช่วยลดการปลดปล่อยมลพิษ NO_x ระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนสูงได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวก็ส่งผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพการเผาไหม้ ดังนั้นการหาจุดเหมาะสมของการทำงานจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เตาเผาที่มีสมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุด

คำสำคัญ: ชีวมวล, เตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด, การเผาไหม้ร่วม, การวิเคราะห์ค่าเหมาะสม, การลดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์

Abstract

This research project was aimed to explore the potential of three co-firing methods for the reduction of NO_x in a fluidized-bed combustor. Pelletized cassava rhizome (PCR) and pelletized rice husk (PRH) (as base fuels) was co-fired with eucalyptus bark (EB) and moisturized rice husk (secondary fuels) in this reactor using silica sand as the bed material. Four groups of experiments, for (1) conventional combustion of rice husk pellets (a base case), (2) co-firing pre-mixed fuels (using bottom air injection), (3) co-firing using fuel staging (with bottom air injection), and (4) co-firing using a reburning method (combining fuel staging and air staging), were performed at a $200 \text{ kW}_{\text{th}}$ heat input to the reactor. In each test series, the energy fraction of the secondary fuel in the total fuel supply (EF_2) ranged from 0 to 0.25, with excess air (EA) varying from 20% to 80%. In the tests for reburning, the secondary-to-total air ratio (SA/TA) ranged from 0.1 to 0.4 at each EA. The findings revealed that the effects of EF_2 , EA, and SA/TA on combustion and emission characteristics of the reactor were substantial.

An optimization analysis was performed to determine the optimal EF_2 , EA, and SA/TA leading to minimal emission costs of the applied co-firing methods. $\text{EF}_2 \approx 0.15$ and EA = 40%–50% were found to be optimal for co-firing premixed fuel and fuel staging, whereas EA = 60% and SA/TA = 0.2–0.3 were optimal for co-firing using reburning technique. Under optimum operating conditions, the combustor ensured high ($\sim 99\%$) combustion efficiency, and reduced NO_x emissions: by 15% when co-firing pre-mixed fuels, by 40% for the fuel-staged co-combustion with bottom air injection, and by about 50% when using the reburning technique. In addition, the CO and C_xH_y emissions were controlled under the standard for these emissions. Therefore, the proposed co-combustion methods exhibit a great potential for NO_x emissions reduction. Nevertheless, the methods result in a deterioration of combustion efficiency of the combustor; hence the optimal of operating parameters is required to secure the best performance of the combustor.

Keywords: Biomass, Fluidized-bed combustor, Co-firing techniques, Co-firing optimization, NO emission reduction.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 ตามมติคณะรัฐมนตรี ผ่านมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบการผลิต สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือทดสอบ และสถานที่สำหรับการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา ศิริสมบุญรณ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเมศร์ อารมณดี จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินการวิจัยตลอดมา

พิเชฐ นิลดวงดี และคณะ

กันยายน 2560

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 สมมุติฐานของการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การเผาไหม้	5
2.2 มลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ชีวมวล	5
2.3 กลไกการก่อตัวและการสลายตัวของมลพิษระหว่างการเผาไหม้	6
2.3.1 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide: CO)	6
2.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of Nitrogen: NO _x)	7
2.3.3 มาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษออกจากโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทย	8
2.4 ฟลูอิดไธเซชัน (Fluidization)	9
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของฟลูอิดไธเซชัน	9
2.4.2 การจัดหมวดหมู่สถานะของ Geldart	10
2.5 การเผาไหม้แบบฟลูอิดไธเซชัน (fluidized bed combustion)	11
2.6 วิธีลดการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ชีวมวล	15
2.6.1 เทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำ	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และกระบวนการวิจัย	26
3.1 เต้าเผาฟลูอิดซ์เบดแบบทรงกรวย	26
3.2 เชื้อเพลิง	29
3.3 วัสดุเบด	31
3.4 วิธีดำเนินการ	31
3.4.1 การคำนวณอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลัก	33
3.4.2 การคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้	33
3.4.3 การวัดผลการทดลอง	34
3.4.4 การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้	35
3.4.5 การหาจุดเหมาะสมการทำงานของเต้าเผา	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	37
4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิและความเข้มข้นแก๊สภายในแนวลำตัวเต้าเผาฟลูอิดซ์เบด	37
4.2 พฤติกรรมการเผาไหม้ในเต้าเผาฟลูอิดซ์เบด	42
4.3 การก่อตัวและออกซิเดชันของ CO และ C_xH_y ภายในเต้าเผาฟลูอิดซ์เบด	45
4.4 การก่อตัวและการลดลงของ NO ภายในเต้าเผาฟลูอิดซ์เบด	47
4.5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเต้าเผาฟลูอิดซ์เบด	49
4.6 ผลกระทบของวิธีการเผาไหม้ต่อการปล่อยมลพิษของเต้าเผาฟลูอิดซ์เบด	52
4.6.1 การปลดปล่อย CO	52
4.6.2 การปลดปล่อย C_xH_y	53
4.6.3 การปลดปล่อย NO	53
4.7 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเต้าเผาฟลูอิดซ์เบด	55
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการวิจัย	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	63
ภาคผนวก 1: Co-Combustion of Rice Husk Pellets and Moisturized Rice Husk in a Fluidized-Bed Combustor Using Fuel Staging at a Conventional Air Supply	64
ภาคผนวก 2: Study on Co-Combustion of Pelletized and Moisturized Rice Husks in a Cone Shaped Fluidized-Bed Combustor Using Fuel Staging for Reducing NOx Emissions: Optimization of Operating Variables	96
ภาคผนวก 3: Co-Combustion of Pelletized and Moisturized Rice Husks in a Fluidized-Bed Combustor Using Fuel Staging and Reburning for Reducing NOx Emissions	107

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	กลไกก่อตัวและสลายตัวของไนโตรเจนออกไซด์	7
2.2	พฤติกรรมและการเกิดฟลูออโรไฮโดรคาร์บอน	9
2.3	การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart	10
2.4	รูปแบบการเผาไหม้ระหว่างกาบ่อกอากาศทุติยภูมิและการบ่อกเชื้อเพลิงทุติยภูมิ	15
2.5	ส่วนประกอบ ของเตา Understoker ที่ใช้ในการทดลองการเผาไหม้เป็นชั้น	16
2.6	ผลของอัตราส่วน stoichiometric ต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากวิธีการเผาไหม้แบบจ่ายอากาศเป็นชั้นและจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น	18
2.7	หลักการของเทคโนโลยีเผาไหม้ซ้ำเพื่อลดการปลดปล่อย NO _x จากการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกา	20
2.8	ผลกระทบของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำต่อการลด NO _x	22
2.9	ผลกระทบของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำต่อ CO ที่ออกจากช่วงเผาไหม้ซ้ำ	22
2.10	ผลกระทบของเวลาคงอยู่ในช่วงเผาไหม้ซ้ำต่อการปลดปล่อยและประสิทธิภาพการลด NO _x	23
2.11	ผลกระทบของอัตราส่วนสมมูลในช่วง (ก) เผาไหม้ซ้ำและ (ข) ห้องเผาไหม้หลัก ต่อประสิทธิภาพการลด NO _x	23
2.12	ผลกระทบของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำและอัตราส่วนสมมูลในช่วงเผาไหม้ซ้ำต่อประสิทธิภาพการลด NO _x	24
2.13	ผลกระทบของเชื้อเพลิงและความเข้มข้นของ CO ต่อประสิทธิภาพการลด NO _x	25
3.1	เตาเผาฟลูออไรด์แบบทรงกรวยขนาด ก่อนการปรับปรุงเพื่อใช้สำหรับการเผาไหม้ร่วม	26
3.2	เตาเผาฟลูออไรด์แบบทรงกรวยที่มีการติดตั้งระบบการบ่อกเชื้อเพลิงรองและระบบการบ่อกอากาศเผาไหม้ซ้ำสำหรับการทดสอบ	27
3.3	แผนภาพแสดงรายละเอียดของเตาเผาฟลูออไรด์แบบที่ทำการปรับปรุงสำหรับการทดสอบการเผาไหม้ด้วยวิธีการที่เผาไหม้ร่วมแบบต่างๆ	28
3.4	เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง	29
3.5	ทรายซิลิกาที่ใช้เป็นวัสดุเบดในการทดสอบการเผาไหม้	30
3.6	เครื่องวิเคราะห์ที่ไอเสีย Testo-350 (Testo Germany)	34
4.1	ตัวอย่างตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นของแก๊สในแนวรัศมีของเตาเผา	37

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.2 การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมต่างกัน (ก) เชื้อเพลิงผสม (ข) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ (ค) การเผาไหม้ซ้ำ โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ที่ระดับความสูง (Z) ต่างกัน	38
4.3 ความเข้มข้นของ O_2 ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมต่างกัน (ก) เชื้อเพลิงผสม (ข) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ (ค) การเผาไหม้ซ้ำ โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ที่ระดับความสูง (Z) ต่างกัน	38
4.4 ความเข้มข้นของ CO ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมต่างกัน (ก) เชื้อเพลิงผสม (ข) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ (ค) การเผาไหม้ซ้ำ โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ที่ระดับความสูง (Z) ต่างกัน	39
4.5 ความเข้มข้นของ CO ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมต่างกัน (ก) เชื้อเพลิงผสม (ข) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ (ค) การเผาไหม้ซ้ำ โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ที่ระดับความสูง (Z) ต่างกัน	40
4.6 ความเข้มข้นของ NO (แสดงแทน NO_x) ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมต่างกัน (ก) เชื้อเพลิงผสม (ข) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ (ค) การเผาไหม้ซ้ำ โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ที่ระดับความสูง (Z) ต่างกัน	41
4.7 อนุภาคนิวเคลียสในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (วัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดเตา $r_1 = 0$) เมื่อเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ด้วยวิธีการใช้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และ การเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ณ ตำแหน่งความสูง Z ต่างกัน	42
4.8 ปริมาณ O_2 ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (วัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดเตา $r_1 = 0$) เมื่อเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ด้วยวิธีการใช้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และ การเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ณ ตำแหน่งความสูง Z ต่างกัน	44
4.9 ความเข้มข้นของ CO ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (วัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดเตา $r_1 = 0$) เมื่อเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ด้วยวิธีการใช้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และ การเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ณ ตำแหน่งความสูง (Z) ต่างกัน	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
--------	------

- 4.10 ความเข้มข้นของ C_xH_y ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (วัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดเตา $r_1 = 0$) เมื่อเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ด้วยวิธีการใช้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และ การเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ณ ตำแหน่งความสูง Z ต่างกัน 46
- 4.11 ความเข้มข้นของ NO ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (วัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดเตา $r_1 = 0$) เมื่อเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ด้วยวิธีการใช้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และ การเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ณ ตำแหน่งความสูง (Z) ต่างกัน 48
- 4.12 การปล่อย CO จากเตาเผาฟลูอิดไคซ์ระหว่างการเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR กับ EB และ (ข) PRH กับ MRH ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และการเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) 52
- 4.13 การปล่อย C_xH_y จากเตาเผาฟลูอิดไคซ์ระหว่างการเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR กับ EB และ (ข) PRH กับ MRH ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และการเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) 53
- 4.14 การปล่อย NO จากเตาเผาฟลูอิดไคซ์ระหว่างการเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR กับ EB และ (ข) PRH กับ MRH ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และการเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) 54
- 4.15 ผลของสภาวะการทำงานที่มีต่อต้นทุนการปลดปล่อยมลพิษ (emission cost) ที่ปลดปล่อยจากเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR กับ EB และ PRH กับ MRH ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และการเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) 55

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ศักยภาพพลังงานจากชีวมวลของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2556	2
2.1	มลภาวะที่เกิดจากการกระบวนการเผาไหม้ของชีวมวล	6
2.2	มาตรฐานอากาศเสียที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม	8
2.3	ผลวิจัยจากการวิจัยเผาไหม้ของ ฐานิตย์ เมธียนนท์และคณะ	134
2.4	โครงการตัวอย่างที่ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำเพื่อการลดการปลดปล่อย NO _x ในการเผาไหม้ถ่านหินที่ประเทศสหรัฐอเมริกา	21
2.5	คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบของ Shu et al., 2015a	24
3.1	คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง	30
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเบด	30
3.3	กรณีศึกษาและตัวแปรที่ศึกษาและควบคุมและช่วงของการทดสอบ	32
4.1	ความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่เผาไหม้ร่วม PCR กับ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วม 3 วิธี ที่สภาวะการทำงานแตกต่างกัน	50
4.2	ความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่เผาไหม้ร่วม PRH กับ MRH ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วม 3 วิธี ที่สภาวะการทำงานแตกต่างกัน	51
4.3	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ร่วมด้วยวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัย	56

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิง	% wt
C _c	คาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ที่อยู่ในเถ้าลอย	% wt
EA	อากาศส่วนเกิน	%
EB	เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสับ	
EF ₂	สัดส่วนพลังงานจากเชื้อเพลิงรอง	-
FC	คาร์บอนคงตัว	wt %
LHV _{fl}	ค่าความร้อนต่ำสุดของเชื้อเพลิงหลัก	kJ/kg
LHV _{f2}	ค่าความร้อนต่ำสุดของเชื้อเพลิงรอง	kJ/kg
M _d	มวลของน้ำรวมกับเชื้อเพลิง	%db
MF ₂	สัดส่วนของเชื้อเพลิง	-
m _{fl}	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงหลัก	kg/h
m _{f2}	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงรอง	kg/h
MRH	กลับขึ้น	
NO _x	ความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์	ppm
PCR	เหง้ามันสำปะหลังอัดเม็ด	
PRH	กลับอัดเม็ด	
q _{uc,ic}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้	LHV%
q _{ic,cf}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์	LHV%
SA/TA	สัดส่วนอากาศรองต่ออากาศหลัก	-
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 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศมีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศในแต่ละปีจำนวนมาก จากข้อมูลในปี 2554 ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานถึง 60% ของปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมดในกลุ่มอุตสาหกรรมภายในประเทศ ส่งผลทำให้ทุกภาคส่วนของประเทศได้รับผลกระทบจากความผันผวนของราคาพลังงานโลกเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ รัฐบาลจึงได้หาแนวทางในการแก้ปัญหาวิกฤติพลังงานและราคาพลังงานอย่างยั่งยืน โดยได้กำหนดเป้าหมายให้มีการใช้พลังงานทดแทนจากชีวมวลให้ได้ 3600 MW ภายในปี พ.ศ. 2564 ภายใต้ นโยบายที่ชื่อว่า “Renewable and Alternative Energy Development Plan for 25 percent in 10 years หรือ AEDP 2012–2021” (DEDE., 2014)

นโยบายดังกล่าวมีความเป็นไปได้อย่างมากเพราะเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญที่สุดแห่งหนึ่งของโลก ประชากรในประเทศมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม แต่ละปีมีการสร้างผลผลิตทางการเกษตรอย่างมากมายทั้งเพื่อการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก ซึ่งในระหว่างกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรก็มีของเสียและวัสดุเหลือ (residues) จากกระบวนการทางการเกษตรเกิดขึ้นปริมาณมาก โดยวัสดุเหล่านี้สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นพลังงานหมุนเวียนในรูปของพลังงานชีวมวลได้ ตารางที่ 1 แสดงศักยภาพพลังงานชีวมวลของประเทศไทยในปี 2556 จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าของเสียจากกระบวนการผลิตทางการเกษตรสามารถนำมาใช้เพื่อเป็นพลังงานทดแทนได้ถึงประมาณ 42,417 กิโลตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือคิดเป็น 1776 PJ ต่อปี แหล่งพลังงานชีวมวลของประเทศไทยมาจาก แกลบ ฟาง ชานอ้อย กากและซังข้าวโพด ของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ชี้เลี้ยง และอื่นๆ (พพ. 2556) จากศักยภาพพลังงานของชีวมวลดังกล่าว การวิจัย พัฒนา และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งเพื่อเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานของประเทศ อีกทั้งเป็นการลดการปลดปล่อย CO₂ รวมของประเทศอีก นอกจากนี้ การใช้ชีวมวลสำหรับการผลิตความร้อน/ไฟฟ้ายังมีการปลดปล่อย SO₂ ในปริมาณที่ต่ำ เนื่องจากชีวมวลมีส่วนประกอบของกำมะถันอยู่ค่อนข้างต่ำ

เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด เป็นหนึ่งในวิธีการเผาไหม้ตรงที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อการผลิตความร้อนและผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเทคโนโลยีนี้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หลากหลาย เช่น เชื้อเพลิงเกรดต่ำที่มีค่าความร้อนต่ำ ปริมาณชี้เถ้า



และความชื้นสูง มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า 99% นอกจากนี้เตาฟลูอิดไคซ์เบตยังมีรูปร่างและขนาดที่หลากหลาย เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบต (fluidized-bed) จะอาศัยหลักการฟลูอิดไคซ์เซชัน (fluidization) ซึ่งทำให้เกิดการกระจายตัวของความร้อน รวมถึงการผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศเป็นอย่างดี ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบตสูงและมีมลพิษเนื่องจากการเผาไหม้ต่ำ (Chyang et al., 2008; Ninduangdee & Kuprianov, 2016; Permchart & Koupryanov, 2004; Werther et al., 2000)

ตารางที่ 1.1 ศักยภาพพลังงานจากชีวมวลของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2556

ที่มาของชีวมวล	ชนิดชีวมวล	ศักยภาพพลังงาน	
		Ktoe	PJ
อ้อย	ยอดและใบ	7805.8	326.8
	กากอ้อย	5405.7	226.3
ข้าว	แกลบ	2987.9	125.1
	ฟางข้าว	15077.2	631.3
ข้าวโพด	ลำต้น ยอด ใบ	1711.4	71.7
	ซังข้าวโพด	380.1	15.9
มันสำปะหลัง	ลำต้น	1246.8	52.2
	ราก	968.9	40.6
ปาล์มน้ำมัน	กิ่ง ก้านใบ	1048.3	43.9
	ใย	1124.7	47.1
	กะลา	1208.2	50.6
	ทะลาย	1064.1	44.6
มะพร้าว	กะลา	107.8	4.5
	เปลือก	221.7	9.3
	ทางใบ ทะลาย	207.7	8.7
ถั่วลิสง	เปลือก	4.6	0.2
ฝ้าย	ลำต้น	2.3	0.1
ถั่วเหลือง	ลำต้น ยอด ใบ เปลือก	31.9	1.3
ข้าวฟ่าง	ลำต้น ใบ	29.8	1.2
ยางพารา	ถ่านไม้	784.3	32.8
	ไม้พิน	362.6	15.2
	เศษไม้	117.1	4.9
	ขี้เลื่อย	33.8	1.4
สับปะรด	ตอซัง	484.6	20.3
รวม		42,417.2	1775.9

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ. 2556)

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการเผาไหม้ชีวมวลจะถูกพิจารณาว่ามีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นศูนย์ (CO₂-neutral) ในระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลพบว่าการปลดปล่อยมลภาวะหลักอื่นๆ เช่น ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) ออกมาระหว่างการเผาไหม้ อัตราการปลดปล่อยมลภาวะเหล่านี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบของเตา ชนิดหรือคุณสมบัติของเชื้อเพลิง และสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้ (Akpulat et al., 2010; Fang et al., 2004; Ninduangdee &

Kuprianov, 2013; Qian et al., 2011; Sirisomboon et al., 2010) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง NO_x ซึ่งมีความร้ายแรงมากกว่าก๊าซพิษตัวอื่นๆ เพราะเป็นต้นเหตุของฝนกรด สามารถทำลายพืชทั้งทางใบและลดผลผลิต และทำให้เซลล์ของสัตว์เปลี่ยนแปลง สามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง และทำให้ตาระคายเคือง และที่สำคัญ สามารถทำให้เกิดสารมลพิษทางโฟโตเคมี (photochemical pollutant)

จากข้อมูลงานวิจัยพบว่า ในปัจจุบันไม่มีวิธีที่ดีที่สุดในการกำจัด NO_x หลังจากออกจากห้องเผาไหม้ เนื่องจาก NO_x เสถียรมาก จึงนิยมใช้วิธีควบคุมการเผาไหม้ให้เกิด NO_x น้อยที่สุด เช่นการควบคุมปริมาณอากาศส่วนเกิน (excess air) การนำไอเสียกลับมาใช้ (emission gas recirculation, EGR) การเผาไหม้ร่วม (co-firing หรือ co-combustion) และการเผาไหม้แบบขั้น (stage combustion) (Nussbaumer, 2003; Salzmann & Nussbaumer, 2001) แต่วิธีการเหล่านี้ทำให้การปลดปล่อย CO และ C_xH_y เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบลดลง

การเผาไหม้ซ้ำ (reburning method) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการลดการปลดปล่อย NO_x ทั้งในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และในห้องปฏิบัติการ ยกตัวอย่างเช่น มีการใช้วิธีการเผาไหม้ซ้ำผ่านหินบดในหม้อไอน้ำ (boiler) ขนาดใหญ่สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำ จากการใช้เทคโนโลยีนี้ พบว่า สามารถลดการปลดปล่อย NO_x ได้มากถึง 70% หลักการของเทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำคือ มีการป้อนเชื้อเพลิงต่างระดับ โดยมีเชื้อเพลิงหลัก (primary และเชื้อเพลิงรอง (secondary) ทำให้เกิดการเผาไหม้สองส่วนคือ ช่วงการเผาไหม้หลัก (main combustion zone) เกิดการเผาไหม้ด้วยอากาศหลัก (primary air) และช่วงการเผาไหม้ซ้ำ (reburning zone) โดยใช้อากาศรองหรืออากาศเพื่อเผาไหม้ซ้ำ (secondary/burnout air) (Nussbaumer, 2003; Salzmann & Nussbaumer, 200, IEA, 2015) ซึ่งจะทำให้เกิดการลดลงของ NO_x (กลไกของการลด NO_x จะกล่าวถึงในทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง) และมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มาก แต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีนี้ ยังมีปัญหาอยู่บ้าง เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ตำแหน่งการเกิดการเผาไหม้หลักค่อนข้างสูงอาจทำให้เกิดการหลอมของเถ้าของเชื้อเพลิงซึ่งส่งผลต่อการเกิดปัญหาเกิดเกาะตัวของเถ้าบนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ลดลง ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกเชื้อเพลิงที่มีจุดหลอมเหลวของเถ้าที่ค่อนข้างสูงหรือกำหนดสภาวะการเผาไหม้ที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว (Salzmann & Nussbaumer, 2001)

แต่อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ยังไม่มีข้อมูลการวิจัยหรือการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำเพื่อลดการปลดปล่อย NO_x ในระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้น การวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์เทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นในส่งเสริมการใช้พลังงานจากชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีการปลดปล่อยมลพิษต่ำ เพื่อการพัฒนาของประเทศที่ยั่งยืนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

จุดมุ่งหมายของโครงการวิจัยนี้เพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนสูงในเตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบด โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- ศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้วิธีการเผาไหม้ร่วมที่แตกต่างกันในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดที่ใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล
- เพื่อให้ได้องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับวิธีการควบคุมมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด
- ลดการปลดปล่อย NO_x ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนสูงในเตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบด และ ควบคุมให้มีการปลดปล่อย CO C_xH_y ต่ำกว่ามาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษของประเทศไทย
- เพื่อหาประสิทธิภาพของการลด NO_x เมื่อใช้วิธีการเผาไหม้ร่วมในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- การทดลองทั้งหมดถูกทดลองในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดขนาดต้นแบบ (350 kW_{th})
- ใช้เชื้อเพลิงหลักที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนสูง ได้แก่ แกลบอัดเม็ด และเหง้ามันสำหรับอัดเม็ด ใช้ แกลบขึ้นและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงรอง
- ใช้วิธีการเผาไหม้ร่วม 3 วิธี ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม การเผาไหม้แบบจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น และการเผาไหม้ซ้ำ
- ใช้ทรายซิลิกาขนาด 300–500 μm เป็นวัสดุเบด
- อากาศส่วนเกินที่ใช้อยู่ในช่วง 20% ถึง 80%
- ใช้อัตราส่วนเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลัก 0–0.25
- ใช้อัตราส่วนระหว่างอากาศรองต่ออากาศหลัก 0–0.4
- ทำการศึกษาการกระจายตัวของ อุณหภูมิ NO_x CO และ C_xH_y เพื่อศึกษาพฤติกรรมและกลไก (mechanisms) การก่อตัว/เกิดและการลดของก๊าซมลพิษ
- ใช้มาตรฐานการปล่อยมลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทยเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการลดก๊าซมลพิษ

1.4 สมมุติฐานของการวิจัย

ถ้าวิธีการเผาไหม้ร่วมทั้ง 3 วิธีที่เสนอในโครงการวิจัยนี้สามารถสร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดขวาง/สลายปฏิกิริยาก่อตัวของ NO_x โดยการเพิ่มความเข้มข้นของ CO และ C_xH_y ในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด จะสามารถลดการปลดปล่อย NO_x ออกจากเตาเผาสู่สิ่งแวดล้อมได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเผาไหม้

การเผาไหม้ (Combustion) หมายถึง กระบวนการของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (Combustible elements) ทำให้เกิดการปลดปล่อยความร้อน หรือความร้อนและแสงสว่าง ซึ่งแสดงออกมาในรูปของเปลวไฟ (flame) หรือแสงวาบ (glow) แต่ในบางกรณี การเผาไหม้อาจจะมีการปล่อยพลังงานออกมาน้อยมากจนทำให้ไม่เกิดแสงสว่างเกิดขึ้น กระบวนการเผาไหม้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีที่ถูกกักเก็บเชื้อเพลิงให้กลายเป็นพลังงานความร้อน และนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย

ปัจจุบัน กระบวนการเผาไหม้มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรมต่างๆ โดยการเผาไหม้ถูกประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตพลังงานความร้อนสำหรับกระบวนการผลิต เช่น การอบแห้ง การกลั่น และการผลิตไอน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้กระบวนการเผาไหม้ยังสามารถถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานของต้นกำลังของเครื่องจักรต่างๆ เช่น เครื่องยนต์ และโรงไฟฟ้า เป็นต้น

ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ สารที่สามารถเผาไหม้ได้ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง เช่น คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และ กำมะถัน (S) จะทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องกับออกซิเจนโดยอาศัยความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยา ในขณะที่เดียวกันก็จะแปรสภาพไปเป็นสารประกอบออกไซด์หรือผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำ (H_2O) และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

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 (CO₂) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O), ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x), ไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) และพวกฝุ่นละออง (particulate matter)

2. มลพิษที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), น้ำมันดิน (tar), โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (PAH), ไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y), แอมโมเนีย (NH₃) และพวกฝุ่นหรือเขม่า โดยมลพิษเหล่านี้จะเกิดขึ้นมาจากสภาวะการทำงานของระบบที่ไม่เหมาะสม เช่น

- การผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ไม่ทั่วถึง (poor mixing) ทำการเผาไหม้ไม่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
- มีปริมาณอากาศที่ใช้เผาไหม้ไม่เพียงพอ
- อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำเกินไป
- เวลาในการเผาไหม้น้อยเกินไป

ตารางที่ 2.1 มลภาวะที่เกิดจากการกระบวนการเผาไหม้ของชีวมวล

แหล่งที่มา	มลพิษที่เกิดขึ้น
การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (เชื้อเพลิงชีวมวลทุกชนิด)	CO, tar, C _x H _y , PAH, char particle, NH ₃
การเผาไหม้สมบูรณ์ (เชื้อเพลิงชีวมวลทุกชนิด)	CO ₂ , NO _x , N ₂ O
เชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของ Cl and S (urban waste woods, straw, grass)	HCl, SO ₂ , salts, (KCl, K ₂ SO ₄ , NH ₄ Cl
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 อัตราการเกิดหรือการลดลงของ CO จะขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบของการเผาไหม้ ดังนั้น CO จึงถูกใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการเผาไหม้

ในระบบการเผาไหม้ CO จะเกิดขึ้นการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องระหว่าง ถ่านคาร์บอน (char-C) กับ ออกซิเจน (O₂) น้ำ (H₂O) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ตามปฏิกิริยาที่ 2.1-2.5 (Saenger et al., 2001; Tillman et al., 1981) และจะเกิดการลดลงเนื่องจากปฏิกิริยารอง (secondary

reactions) ของการเผาไหม้ CO ให้กลายเป็น CO₂ ด้วย O₂ และ H₂O ดังแสดงในปฏิกิริยา 8 และ 9 โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นบริเวณพรีบอร์ดของเตาปฏิกรณ์ (Löffler et al., 2002; Tillman et al., 1981)

CO Formation

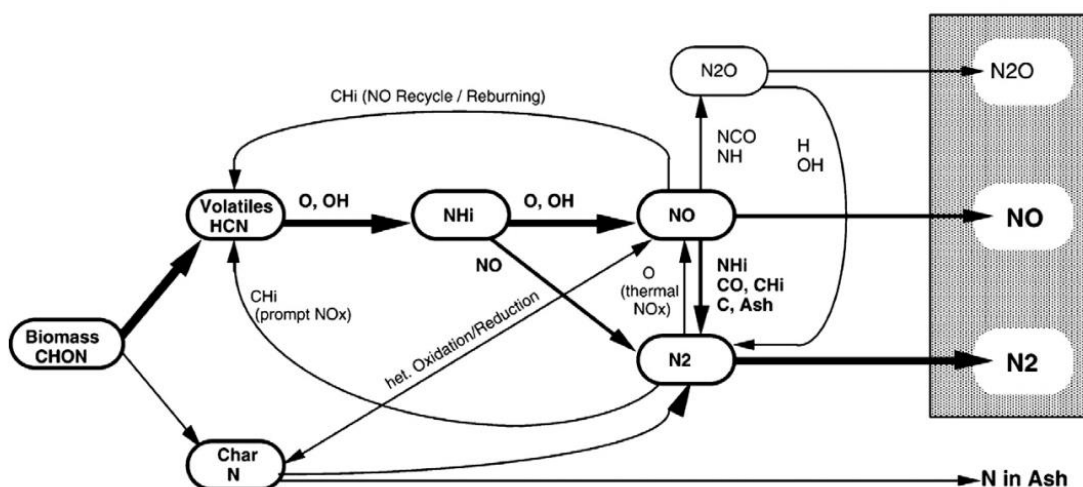


CO Oxidation



2.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of Nitrogen: NO_x)

ก๊าซกลุ่มออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เป็นก๊าซมลพิษ โดยทั่วไปประกอบด้วย ไนตริกออกไซด์ (NO) มากกว่าไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) มีสารมลพิษเริ่มต้นคือ NO ถูกออกซิไดซ์เมื่อพบกับออกซิเจนและโอโซนในอากาศกลายเป็น NO₂ ซึ่งเป็นต้นเหตุของฝนกรด เนื่องจากสามารถละลายน้ำกลายเป็นกรดไนตริก นอกจากนี้ NO₂ สามารถทำลายพืชทั้งทางใบและลดผลผลิต และทำให้เซลล์ของสัตว์เปลี่ยนแปลง ส่วน NO สามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง และทำให้ตาระคายเคือง และที่สำคัญ NO₂ สามารถทำให้เกิดสารมลพิษทางโฟโตเคมี (photochemical pollutant) (Werther et al., 2000)

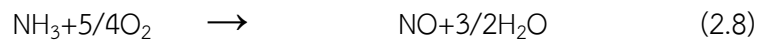


ภาพที่ 2.1 กลไกก่อตัวและสลายตัวของไนโตรเจนออกไซด์ (Khan et al., 2009)

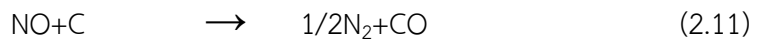
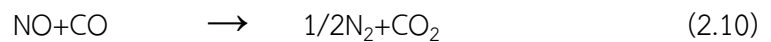
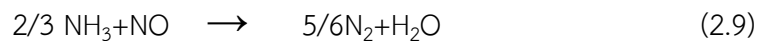
ภาพที่ 2.1 แสดงเส้นทางการก่อตัวและลดลงของไนโตรเจนออกไซด์ จะเห็นได้ว่า ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ ไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนไปเป็น HCN และ NH ก่อนที่จะถูกออกซิไดซ์ด้วย

กลุ่มอนุมูลอิสระ (radicals) ได้แก่ O, H และ OH แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนในระบบ HCN และ NH จะหายไปเป็น N₂ และ H₂O แทน ปฏิกิริยาของการเกิดและลดลงของ NO สามารถสรุปได้ตามปฏิกิริยาที่ 2.6–2.11 (Salzmann & Nussbaumer, 2001)

NO Formations



NO Reduction



2.3.3 มาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษออกจากโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทย

สำหรับปัญหามลพิษที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นหน่วยงานที่ดูแลและรับผิดชอบในด้านอุตสาหกรรม ให้ความสำคัญและเร่งดำเนินการหามาตรการเพื่อควบคุมและแก้ไขสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้ปล่อยมลพิษออกมาสู่บรรยากาศจึงได้มีการกำหนดค่ามลพิษที่โรงงานอุตสาหกรรมสามารถปล่อยออกมาได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานอากาศเสียที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

ชนิดของสารเจือปน	แหล่งที่มาของสาร	ค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศ	
		ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง (ppm)	มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง (ppm)
คาร์บอนมอนนอกไซด์	การผลิตทั่วไป	870	670
กรดกำมะถัน	การผลิตทั่วไป	25	-
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	การผลิตทั่วไป	100	80
ออกไซด์ของไนโตรเจน	หม้อน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงดังนี้		
	1 น้ำมันหรือน้ำมันเตา	-	200
	2 ถ่านหิน	-	400
	3 เชื้อเพลิงชีวมวล	-	200
	4 เชื้อเพลิงอื่นๆ	-	200

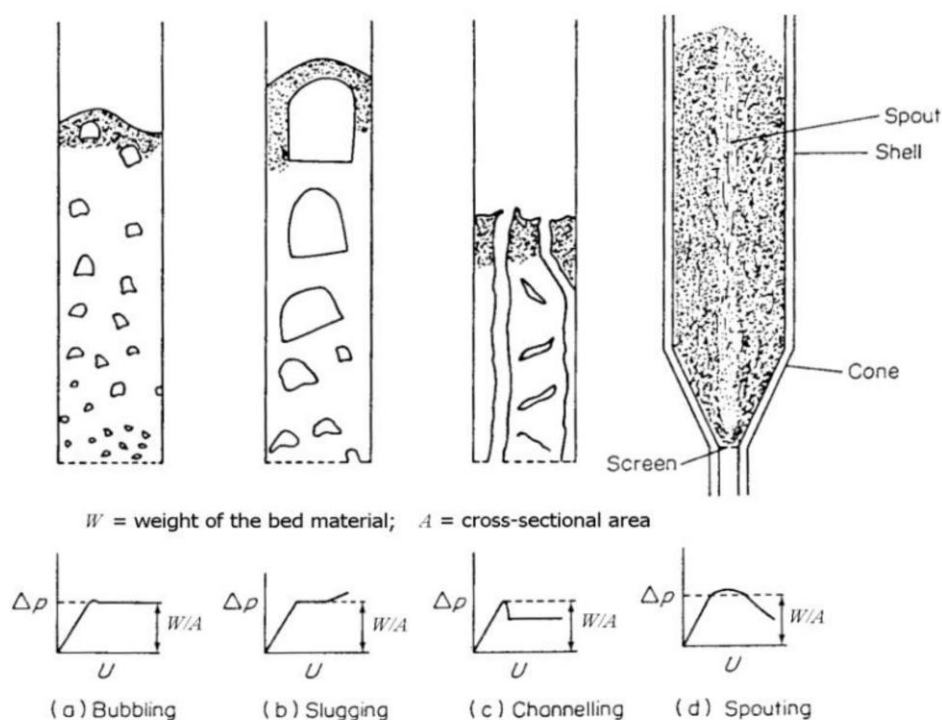
หมายเหตุ ค่าจากที่สภาวะมาตรฐานและสภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยที่ 1 ปริมาตรอากาศเสียที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

2.4 ฟลูอิดเซชัน (Fluidization)

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของฟลูอิดเซชัน

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

ปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวของเมล็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เรียกว่า เบดสม่ำเสมอหรือเบดที่มีเนื้อเดียวกัน ส่วนฟลูอิดเซชันที่ของไหลเป็นลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ของไหลเป็นของเหลวมาก เพราะเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันเบดแล้ว ส่วนหนึ่งจะทำให้เกิดการลอยตัว



ภาพที่ 2.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดเซชัน (Kunii & Levenspiel, 1991)

ของวัสดุเบดของแข็ง แต่ก๊าซอีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นฟองก๊าซลอยขึ้นมา ซึ่งจะทำให้วัสดุเบดของแข็งที่ติดอยู่บนฟองก๊าซไหล จากส่วนบนของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง นอกจากนี้มีบางส่วนของวัสดุเบดของแข็งที่ลอยติดตามฟองก๊าซไปด้วย ลักษณะดังกล่าวทำให้ภายในเบดจะมีการเคลื่อนที่อย่างขุละมุน เบดชนิดนี้เรียกว่า “เบดฟองอากาศ (Bubbling Bed)”

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเม็ดของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และลักษณะของแผ่นกระจายอากาศ โดยลักษณะของฟองอากาศอาจแบ่งได้ดังรูปภาพที่ 2.2

(a) Bubbling ของแข็งในเตาฟลูอิดไชน์เบดจะมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและสม่ำเสมอทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแบบอื่น

(b) Slugging เป็นการเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซจนได้ฟองก๊าซที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดทดลองมีการแยกตัวของเม็ดของแข็งเป็นชั้นๆทำให้การถ่ายเทมวลสารหรือความร้อนเกิดได้ไม่ทั่วถึงเนื่องจากเม็ดของแข็งสัมผัสกับก๊าซเป็นเวลาอันสั้นหรือไม่สัมผัสเลยในบางส่วน

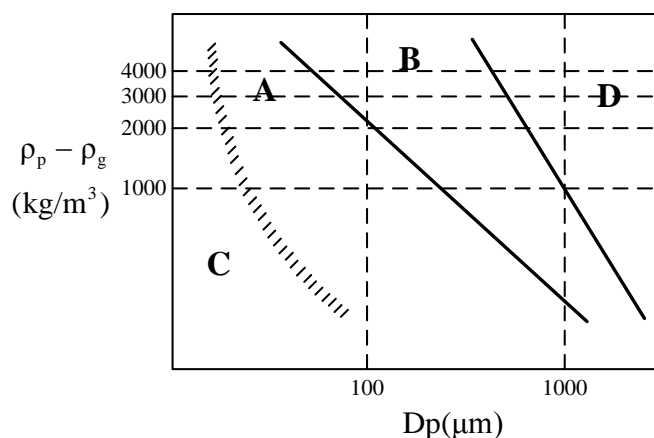
(c) Channeling เป็นการเกิดการผ่านของก๊าซเป็นช่องๆโดยที่เม็ดของแข็งที่อยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่มีการเคลื่อนที่แต่บริเวณข้างเคียงจะไม่มีเคลื่อนที่

(d) Spouted Bed เป็นการที่ก๊าซส่วนใหญ่ไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของเม็ดของแข็งมากกว่าบริเวณรอบข้างด้วยความเร็วสูงมากทำให้บริเวณตรงกลางที่ความหนาแน่น

2.4.2 การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart

ในการจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart สามารถจัดเรียงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคได้แตกต่างกัน 4 กลุ่ม โดยจัดเรียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค จากเล็กสุดไปยังใหญ่สุด ดังที่แสดงตามแผนผังการจัดหมวดหมู่ของ Geldart ในภาพที่ 2.3

ในกลุ่ม A อนุภาคที่มีขนาดเล็กหรืออนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำ (1400 kg/m^3) ซึ่งเป็นกลุ่มที่อากาศสามารถผ่านอนุภาคได้ อนุภาคของแข็งนี้สามารถทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ง่ายที่ความเร็วของก๊าซที่ใช้เป็นของไหลที่มีความเร็วต่ำ อนุภาคของเบดจะมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนของไหลแบบราบเรียบ



ภาพที่ 2.3 การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart (Geldart, 1973)

(Smooth Fluidization) ที่ความเร็วก๊าซสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ (Minimum Bubbling) วัสดุเบดจะเปลี่ยนไปเป็นช่วงของการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ

ในกลุ่ม B เป็นกลุ่มที่มีลักษณะคล้ายกับทราย (Sandlike Particles) โดยปกติแล้วในกลุ่มนี้จะใช้ เป็นวัสดุเบดในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟองอากาศ จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40–500 μm และความหนาแน่นของอนุภาคอยู่ระหว่าง 1400–4000 kg/m^3 อนุภาคในกลุ่มนี้จะเคลื่อนที่ได้ดีในรูปแบบ ฟองอากาศ เมื่อความเร็วของก๊าซที่ใช้เป็นของไหลมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไธซ์

ในกลุ่ม C เป็นกลุ่มที่อนุภาคมีการยึดเกาะได้ดี และมีความละเอียดที่สุด โดยปกติอนุภาคในกลุ่มนี้ จะเกิดการฟลูอิดไธซ์ขึ้นได้ยากเพราะแรงยึดเกาะของอนุภาคมีค่ามากกว่าแรงดันของของไหลอย่างไรก็ตาม ก๊าซของไหลก็ยังหาช่องว่างที่จะผ่านออกไปได้โดยจะมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนในส่วนที่วัสดุเบดมีการยึด เกาะต่ำ

ในกลุ่ม D อนุภาคจะมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นมากสำหรับกลุ่มนี้ฟองอากาศจะเกิดขึ้นได้ ช้ากว่ากลุ่มอื่นและเกิดช่องว่างที่สามารถทำให้ก๊าซของไหลพุ่งผ่านขึ้นมาได้ง่าย ซึ่งสำหรับวัสดุเบดที่ยึดเกาะ กันได้ดีสามารถที่จะเกิดการฟลูอิดไธซ์ขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่แบบน้ำพุ (Spouting Fluidization) จะเกิดขึ้นโดยมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนเนื่องมาจากการจ่ายก๊าซของไหลที่ไม่สม่ำเสมอ

2.5 การเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized bed combustion)

การเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบดทำงานโดยอาศัยหลักการฟลูอิดไธซ์ (fluidization) ซึ่งหลักการ ดังกล่าวเป็นปรากฏการณ์ที่กลุ่มอนุภาคของแข็งถูกระทำให้มีพฤติกรรมคล้ายของไหล ภายใต้กระแสการ พยุงของก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านกลุ่มอนุภาคของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง ดังนั้น ใน เตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบดจึงมีการใส่วัสดุเบด (bed material) โดยปกติจะใช้ทรายซิลิกา หรือหินปูน หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนและการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศเผา ไหม้เกิดขึ้นเป็นอย่างดี ปรากฏการณ์ฟลูอิดไธซ์เกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบบางประการ เช่น ความเร็วของของไหล ชนิดของเม็ดวัสดุที่ประกอบกันเป็นเบด ระบบฟลูอิดไธซ์เบดนี้ได้รับความสนใจ มากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถใช้กับเชื้อเพลิงแข็งได้หลากหลายชนิด เพราะอุณหภูมิภายในเตาจะมีค่า ใกล้เคียงตลอดทั้งเตาเผา ทำให้อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสม่ำเสมอ สามารถเผาเชื้อเพลิงที่มีปริมาณ ความชื้นสูงได้ดี นอกจากนั้นยังทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟคงที่

ข้อดีของระบบฟลูอิดไธซ์เบด คือมีสารเหนียว เช่น ทราย เป็นเบด จึงทำให้เกิดการผสมของ เชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดี เกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว นอกจากนี้ตัวเบดยังช่วยยอมความร้อน ทำให้เตามีความเสถียร ไม่ดับง่าย และเกิดการเผาไหม้ในตัวเตาเผาได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้อุณหภูมิภายใน เตาเผามีค่าเท่ากันและสม่ำเสมอ สามารถใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงในช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำ (ประมาณ 850 $^{\circ}\text{C}$) จึงช่วยแก้ปัญหาด้านมลพิษของอากาศเนื่องจากการเกิดสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ได้ เป็น ระบบเกี่ยวกับลมเกือบทั้งหมด (pneumatic system) ไม่ค่อยมีระบบเครื่องกล (mechanical system) ทำ

ให้การควบคุมระบบทำได้ง่าย เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ในเตาระบบฟลูอิดไดซ์เบด ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้หมดสมบูรณ์ไม่เกิน 5 วินาที ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่เชื้อเพลิงใช้อยู่ในเตาเผา จึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์

ข้อเสียของระบบฟลูอิดไดซ์เบด คือ จะต้องมีการเสริมสำหรับการจุดเตา ระบบการป้อนเชื้อเพลิงจะต้องสอดคล้องกับเชื้อเพลิงที่ใช้ มีการสีกกร่อนของอุปกรณ์ต่างๆ ได้ เนื่องจากมีการปะทะกันอย่าง ต่อเนื่องของอนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในเตา ปัญหาอีกอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดคือ การเกาะตัวกันของวัสดุเบด ซึ่งเกิดขึ้นจากองค์ประกอบพวกอัลคาไลน์ในเถ้าของเชื้อเพลิง

ในทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการให้ความสนใจในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย 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 $1,500 \text{ mg/Nm}^3$ อย่างไรก็ตามในกรณีของเมล็ดพืชพบว่าอัตราการปล่อย CO นั้นเพิ่มขึ้นจาก 6500 mg/Nm^3 เป็น $13,500 \text{ mg/Nm}^3$ ซึ่งเป็นบ่งบอกถึงการผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศในสถานะที่ไม่เหมาะสม เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินสำหรับการเผาไหม้สำหรับการปลดปล่อย 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 สำหรับเมล็ดแอปเปิ้ลคอก และเมล็ดพืช ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของการปล่อย NO จากการเผาเมล็ดแอปเปิ้ลคอกเมื่อเทียบกับเมล็ดพืชนั้นเป็นผลมาจากปริมาณไนโตรเจนในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่มากกว่านั่นเอง อย่างไรก็ตามการปลดปล่อย SO_2 ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีค่าน้อยมาก(เกือบเป็นศูนย์) เนื่องจากมีองค์ประกอบซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงน้อยมาก ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยนี้คือ การจ่ายอากาศชั้นที่สองเข้าไปในเตาเผาแบบฟองอากาศอาจช่วยให้ลดการปล่อยก๊าซมลพิษลงได้ งานวิจัยอื่นๆได้กล่าวถึงการแบ่งระดับการจ่ายอากาศเข้าไปในเตาเผาว่าเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่จะรักษาระดับมลพิษจากการเผาไหม้ไว้ที่ระดับที่น่าพอใจ และเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ (Topal et al., 2003; Varol & Atimtay, 2007)

ในงานวิจัยของ Chyang และคณะ (Chyang et al., 2008) ได้ใช้แกลบ และถั่วเหลืองเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาแบบ vortexing ฟลูอิดไชด์เบตโดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบต อากาศชั้นต้น (primary air) ถูกปรับอัตราการไหลไว้ที่ 1.98 ถึง 3.4 Nm³/min ในขณะที่ อากาศชั้นที่สอง (secondary air) ถูกปรับอัตราการไหลไว้ที่ 0 ถึง 2.07 Nm³/min พบว่าเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยสูงมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิด NO และ N₂O ขึ้นมาก ในเตาเผาบริเวณเหนือพื้นผิวเบต และเห็นได้ชัดว่าอัตราการปลดปล่อย NO นั้นเพิ่มขึ้นเมื่อมีอากาศเหลือจากการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามอัตราการปลดปล่อย NO แทบจะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเบต (ในช่วง 600-760 องศาเซลเซียส) ในขณะเดียวกันในงานวิจัยนี้ก็พบผลกระทบที่เห็นได้ชัดเจนจากการจ่ายอากาศชั้นที่สอง ที่มีต่อการปล่อย NO และ N₂O ส่วนการใส่น้ำเข้าไปที่เบตนั้นเป็นการเพิ่มการเกิด NO และ N₂O ภายในห้องเผาไหม้ อย่างไรก็ตามการปลดปล่อย N₂O พบว่าอยู่ในปริมาณที่น้อยมากสำหรับเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด

Varol และ Atimtay (2007) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการจ่ายอากาศชั้นที่สองเข้าไปในการเผาไหม้เมล็ดมะกอกในเตาเผาแบบพองอากาศโดยใส่เชื้อเพลิงในอัตรา 10 กรัม/นาที่ และให้มีอากาศส่วนเกินสำหรับการเผาไหม้อยู่ที่ 12% ถึง 130% ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างอากาศชั้นที่สองต่ออากาศรวมอยู่ที่ตั้งแต่ 11% ถึง 23% เมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศชั้นที่สอง (เมื่ออากาศรวมคงที่) พบว่าการปลดปล่อย CO และ C_xH_y จากเตาเผาลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากการเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและอากาศในบริเวณเบตของเตาเผา 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., 2008) ประยุกต์การแบ่งระดับการจ่ายอากาศในการเผาไหม้ ต้นฝ้ายในเตาเผาแบบ bubbling ฟลูอิดไชด์เบตที่อัตราการใส่เชื้อเพลิง 35 kg/hr โดยมีอากาศเหลือจากการเผาไหม้ตั้งแต่ 14% ถึง 50% และมีสัดส่วนของอากาศชั้นที่สอง (ต่ออากาศรวมที่ใส่เข้าไปในเตาเผา) ตั้งแต่ 0.38 ถึง 0.61 ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาสามารถเพิ่มขึ้นจนถึง 99.5% ในขณะที่ การปล่อย 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 พองอากาศที่อุณหภูมิเบต 750 ถึง 800 องศาเซลเซียส ทรายซิลิกาได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเบตเพื่อใช้ในการฟลูอิดไชด์เบต ในการทดลองนี้ได้มีการปรับอัตราอากาศส่วนเกินอยู่ที่ 10% ถึง 100% ในขณะที่สัดส่วนการแบ่งระดับอากาศคงที่ (อากาศชั้นแรก 80% และอากาศชั้นที่สอง 20%) จากการ

ทดลองพบว่า 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) ศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดไม้แปรรูปหลายในประเทศอียิปต์บางชนิด เช่น ฟางข้าวสาเลี เมล็ดฝ้าย และซังข้าวโพด ในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนขนาดย่อ 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 ตามที่งานวิจัยนี้ได้สรุปว่าอากาศส่วนเกินมีผลกระทบต่อปล่อย CO และ NO_x จากเตาเผา อย่างไรก็ตามก็ยังขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเชื้อเพลิงด้วย โดยอากาศส่วนเกินที่ดีที่สุดพบว่ามีค่าอยู่ที่ 1.24 สำหรับเชื้อเพลิงทุกชนิดในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีปริมาณซัลเฟอร์อยู่น้อย การปล่อย SO₂ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้จึงน้อยมาก กล่าวคือ น้อยกว่า 20 มิลลิกรัม/นิวตัน.ม.³ อีกทั้งยังไม่ขึ้นอยู่กับอากาศส่วนเกิน

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

ตารางที่ 2.3 ผลวิจัยจากการวิจัยเผาไหม้ของ ฐานิตย 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 (%)

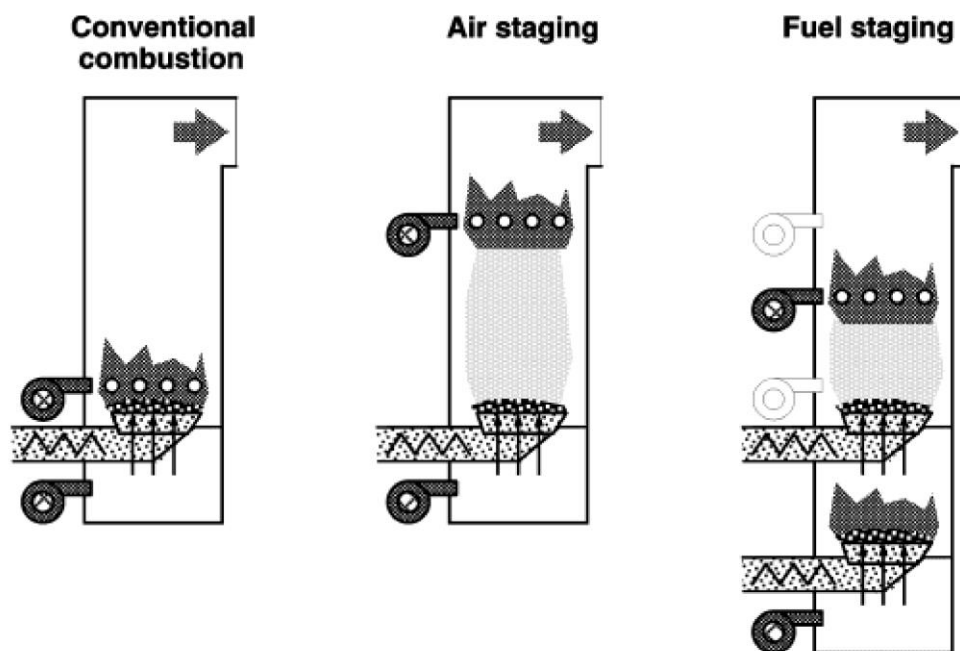
Akputat และคณะ (Akputat et al., 2010) ได้ทำการเผาไหม้เศษของเหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมันมะกอกในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีการปล่อย NO_x ในปริมาณที่สูงมากถึง 1400 mg/Nm^3 ที่ปริมาณ O_2 6%

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และคณะนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยมหานคร ประเทศไทย ได้ทำการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบต่างๆ เช่น แบบที่มีการไหลแบบไซโคลน และ เตาเผาแบบสั้น เพื่อทำการเผาไหม้ ถ่านหิน และเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของงานวิจัยได้ถูกรวบรวมและแสดงในตารางที่ 2.3 จากผลการทดสอบพบว่า เตาเผาที่สร้างขึ้นสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ได้เป็นอย่างดี สามารถให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้สูงถึงประมาณ 99% เนื่องจากมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และมีการปล่อย CO ในปริมาณที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม หากเมื่อพิจารณาถึงการปลดปล่อย NO_x พบว่า มีการปลดปล่อยค่อนข้างสูงอยู่ที่ประมาณ 230–425 ppm (ที่ 6% O_2) ซึ่งหากพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการปลดปล่อย NO_x ของประเทศไทย ซึ่งกำหนดให้การปลดปล่อย NO_x ไม่เกิน 210 ppm ที่ 6% O_2 (กรมควบคุมมลพิษ, 2558)

2.6 วิธีลดการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ชีวมวล

การใช้อากาศทุติยภูมิถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดยการนำมาใช้ควบคุมมลพิษของยานพาหนะโดยเริ่มมีการใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1966 การป้อนอากาศทุติยภูมิ คือ การป้อนอากาศที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มเข้าไปในส่วนของห้องเผาไหม้เพื่อทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

กลไกการปล่อยมลพิษจะถูกควบคุมด้วยวิธีการฉีดของหัวฉีดจุดปล่อยอากาศเข้าสู่ระบบไอเสียจึง

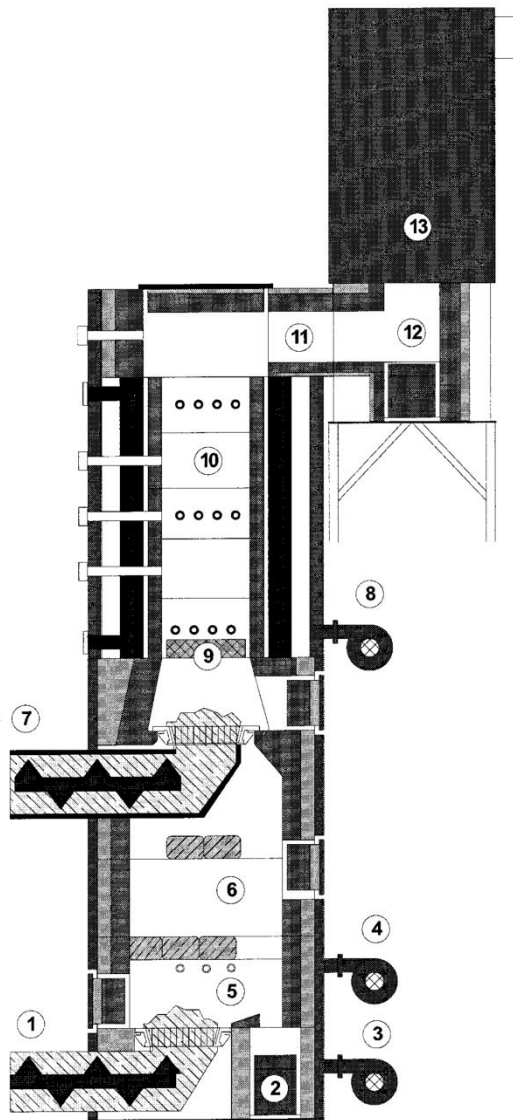


ภาพที่ 2.4 รูปแบบการเผาไหม้ระหว่างการป้อนอากาศทุติยภูมิและการป้อนเชื้อเพลิงทุติยภูมิ

(Nussbaumer, 2003)

ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีดังต่อไปนี้

ระบบฉีดอากาศให้ใกล้ห้องเผาไหม้ โดยสามารถเลือกได้ว่าจะฉีดเข้าบริเวณเหนือห้องเผาไหม้หรือจะฉีดเข้าใกล้ปล่องไอเสีย โดยระบบนี้จะเป็นการฉีดออกซิเจนเข้าไปในส่วนห้องเผาไหม้ในขณะที่เชื้อเพลิงยังมีการเผาไหม้ไม่หมดทำให้เห็นได้ชัดเจนว่าการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าไปนั้นทำให้ปริมาณมลพิษลดลงแต่อย่างไรก็ตามการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าไปในห้องเผาไหม้นั้นจะทำให้เกิดความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ซ้ำเพิ่มขึ้นและไอเสียในห้องเผาไหม้เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นในห้องเผาไหม้ระบบป้อนอากาศโดยใช้ปั๊มอากาศ โดยฉีดอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้หรือจุดป้อนอากาศที่กำหนดไว้ ข้อดีของปั๊มอากาศคือ สามารถอัด



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)

เทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำเพื่อลดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีส่วนประกอบไนโตรเจนสูงในเตาเผาฟลูอิดซ์เบด

อากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้ปริมาณสูงอีกทั้งยังสามารถคุมปริมาณอากาศได้ด้วยวาล์วปรับอากาศ ข้อเสียคือ อาจมีชิ้นส่วนหรือเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดย้อนกลับเข้ามาสร้างความเสียหายให้กับบ้นอากาศได้

ระบบป้อนอากาศโดยใช้ความแตกต่างของความดัน ระบบนี้เป็นการนำอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้หรือจุดปล่อยอากาศที่กำหนดโดยใช้จังหวะความดันด้านลบในระบบเผาไหม้ส่วนของไอเสียโดยใช้วาล์วควบคุมอากาศที่มีความไวสูงเป็นพิเศษ ข้อดีของระบบนี้คือ สามารถป้องกันชิ้นส่วนหรือเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดออกมานอกระบบได้ ข้อเสียของระบบนี้คือ ไม่สามารถคาดเดาได้ล่วงหน้าว่าความดันด้านลบจะมากหรือน้อยแค่ไหนในการดูดอากาศเข้าไปแต่ละครั้ง

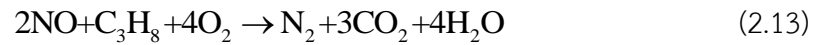
ระบบป้อนอากาศแบบเป็นขั้นบันไดถูกพัฒนาโดยนำมาใช้ร่วมกับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อเป็นการลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงการเผาไหม้ดังแสดงในภาพที่ 2.4 การป้อนอากาศทุติยภูมินั้นจะมีการเพิ่มอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมนั้นหมายความว่าอากาศปฐมภูมินั้นจะถูกลดอัตราส่วนลงเป็นเหตุให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เพิ่มมากขึ้นนั้นส่งผลให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้นจึงเข้าทำการเร่งปฏิกิริยากับก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) จึงทำให้ปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศนั้นลดลง หรือในอีกกรณีคือ เมื่อลดปริมาณอัตราส่วนอากาศปฐมภูมินั้นส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เพิ่มมากขึ้นอีกทั้งปริมาณสารระเหยและก๊าซแอมโมเนีย NH_2 มีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาระหว่างก๊าซแอมโมเนียกับก๊าซไนตริกออกไซด์ เกิดเป็นก๊าซไนโตรเจนและน้ำดังแสดงในปฏิกิริยา 2.12 ได้อากาศส่วนเกิน



การใช้เชื้อเพลิงทุติยภูมิถูกนำมาใช้เพื่อการควบคุมมลพิษที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศและลดต้นทุนในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลประเภทเดียวในการเผาไหม้เนื่องจากสามารถหาเชื้อเพลิงชีวมวลอีกชนิดที่มีค่าความร้อนใกล้เคียงกันแต่ต้นทุนถูกกว่าเข้ามาใช้ในการเผาไหม้ในขั้นทุติยภูมิได้ หลักการเผาไหม้โดยใช้การป้อนเชื้อเพลิงทุติยภูมิจะมีความแตกต่างจากการใช้อากาศทุติยภูมิดังแสดงในภาพที่ 2.4

การป้อนเชื้อเพลิงทุติยภูมินั้นการป้อนเชื้อเพลิงทุติยภูมิเป็นการเพิ่มอัตราส่วนของเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่อเชื้อเพลิงรวมนั้นส่งผลให้มีปริมาณเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นในขณะที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซไฮโดรคาร์บอนออกมาในห้องเผาไหม้เป็นจำนวนมากส่งผลให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนเข้าทำการเร่ง

ปฏิกิริยากับก๊าซไนตริกออกไซด์ เป็นเหตุให้เมื่อมีการปล่อยมลพิษออกสู่บรรยากาศนั้นปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ กลไกการลดก๊าซไนตริกออกไซด์จากการใช้การป้อนเชื้อเพลิงทุติยภูมิ ดังแสดงปฏิกิริยา 2.13

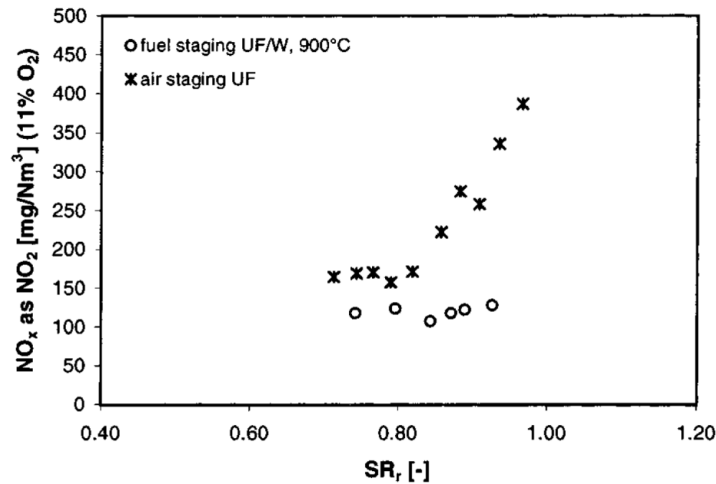


Salzmann R. และ Nussbaumer T (Salzmann & Nussbaumer, 2001) ในเรื่องของการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของการเกิดและการสลายของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ สภาวะการทดลองใช้ Wood Chips และ UF-chipboard เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งทำการเผาในเตาเผา Understoker แบบป้อนเชื้อเพลิงแบบเป็นชั้นดังแสดงในภาพ 2.5 โดยใช้ UF-chipboard เป็นเชื้อเพลิงหลักและ 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) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาพื้นฐานของก๊าซไนตริกออกไซด์เมื่อใช้การเผาไหม้โดยการป้อนเชื้อเพลิงแบบเป็นชั้นโดยใช้เชื้อเพลิงหลักเป็นถ่านหินบิทูมินัส บดละเอียดและถ่านหินสีน้ำตาลเชื้อเพลิงรองเป็นก๊าซธรรมชาติ เตาเผามีลักษณะเป็นท่อเซรามิกมีความยาว 2.5 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีขนาด 200 mm สามารถทนความร้อนได้ถึง 1400 °C และมีการป้อนเชื้อเพลิงแบบแนวตั้งจากด้านบนโดยใช้ฮีตเตอร์เผาและตรงกลางมีการเผาไหม้อีกครั้งโดยใช้ก๊าซ

จากการวิจัยพบว่า ที่เวลาในการเผาไหม้ 1-2 วินาทีนั้นจะทำให้ก๊าซไนตริกออกไซด์ลดลงและที่เวลาในการเผาไหม้มากกว่า 1.5 วินาทีนั้นจะทำให้ก๊าซไนตริกออกไซด์ลดลงเหลือน้อยกว่า 200 mg/Nm³



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

และถ่านหินสีน้ำตาลจะมีปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ที่สูงกว่าถ่านหินบิทูมินัสสดละเอียดและผลของอัตราส่วนอากาศในช่วงของการลดก๊าซไอเสียนั้นพบว่าช่วงที่อัตราส่วนของอากาศเท่ากับ 0.6 นั้นสามารถลดก๊าซไนตริกออกไซด์ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด

Su และ คณะ (Su et al., 2009) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากเตาเผาแบบบนลงล่าง (down-fired furnace) สภาวะการทดลองใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลักและใช้ก๊าซมีเทนเป็นเชื้อเพลิงรองโดยใช้การเผาไหม้แบบป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นลักษณะของเตาเผาเป็นท่อเซรามิกสูง 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 ที่ระยะเวลาในบริเวณการเผาไหม้ช้า 0.6-0.9 วินาทีนั้นจะทำให้ก๊าซไนตริกออกไซด์ลดลงได้ถึง 50% และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้โดยการติดตั้งเข้ากับ boiler ก็จะทำให้ก๊าซไนตริกออกไซด์ลดลงเหลือ 235 mg/Nm³ ที่ 3% O₂ คิดเป็น 60%

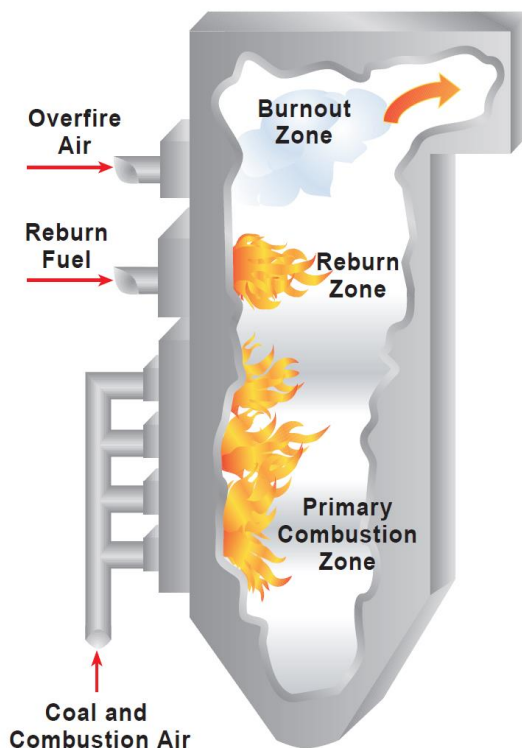
งานวิจัยของ Kicherer และคณะ (Kicherer et al., 1994) บ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณสารระเหยที่มีอยู่มากในชีวมวลมีส่วนช่วยในการลดการปลดปล่อย NO_x ได้เป็นอย่างดี

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

2.6.1 เทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำ

การเผาไหม้ซ้ำถือว่าเป็นวิธีการที่สามารถลดการปลดปล่อย NO_x ได้อย่างมีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง หลักการและวิธีการทำงานของเทคโนโลยีนี้แสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งเป็นการใช้วิธีการเผาไหม้ซ้ำเพื่อทำการลด NO_x ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน จากภาพที่ 2.7 จะเห็นว่า วิธีการเผาไหม้ซ้ำประกอบไปด้วยการเผาไหม้แบบจ่ายเชื้อเพลิงเป็นขั้น (fuel staging) ซึ่งทำให้เกิดโซนของการเผาไหม้ช่วงที่หนึ่ง (primary combustion zone) โดยเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงหลัก (main fuel) ซึ่งในโซนการเผาไหม้จะเกิดการสร้างสภาวะการเผาไหม้ที่มีปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับทฤษฎี จากนั้นมีการป้อนเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำ (reburning fuel) โดยปกติแล้วจะใช้ก๊าซธรรมชาติ ในช่วงนี้สภาวะการเผาไหม้จะเป็นส่วนผสมเชื้อหนา (fuel rich) โดยมีปริมาณความเข้มข้นของ H, CH, CH_2 and radicals อยู่ในปริมาณมาก ซึ่งมีประโยชน์ต่อการลด NO_x ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ NO_x ที่ถูกสร้างขึ้นในโซนการเผาไหม้แรกเปลี่ยนไปเป็น N_2 โดยปฏิกิริยาการที่เป็นไปได้สามารถเขียนได้ตามปฏิกิริยาที่ 2.14–2.19 (Adams & Harding, 1998; Casaca & Costa, 2009; Salzman & Nussbaumer, 2001)





ภาพที่ 2.7 หลักการของเทคโนโลยีเผาไหม้ซ้ำเพื่อลดการปลดปล่อย NO_x จากการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกา (US DOE, 1999)



จากนั้นมีการจ่ายอากาศเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ซ้ำที่บริเวณเหนือการจ่ายเชื้อเพลิงรองขึ้นไป ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ประโยชน์ของการจ่ายอากาศเผาไหม้ซ้ำนี้ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเพิ่มขึ้น แต่อย่างก็ตามจำเป็นต้องมีการปรับอากาศเผาไหม้ซ้ำให้เหมาะสม มิเช่นนั้น จะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของ NO_x โดยปกติแล้วอากาศเผาไหม้ซ้ำจะอยู่ที่ 10-20 % ของอากาศหลัก ด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ สามารถทำให้ลดการปลดปล่อย NO_x มากถึง 75% ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของเตาเผาและชนิดเชื้อเพลิงหลักและเชื้อเพลิงรองที่ใช้

โดยทั่วไปแล้ว ก๊าซธรรมชาติ จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงรองสำหรับการเผาไหม้ซ้ำ แต่อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือ เชื้อเพลิงแข็งก็สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำได้เช่นกัน ตารางที่ 2.4 แสดงผลของการทดลองใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำเพื่อลด NO_x หม้อไอน้ำขนาดใหญ่ที่ใช้สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าการลดของ NO_x จะอยู่ที่ประมาณ 30% ไปจนถึงมากกว่า 70% ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำ

แม้ว่าเชื้อเพลิงทุกชนิดจะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำได้ แต่ ชีวมวล มีข้อดีกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ อยู่หลายด้าน ยกตัวอย่างเช่น (1) เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณกำมะถันและไนโตรเจนต่ำ (2) เชื้อเพลิง

ตารางที่ 2.4 โครงการตัวอย่างที่ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ซ้ำเพื่อการลดการปลดปล่อย NO_x ในการเผาไหม้ถ่านหินที่ประเทศสหรัฐอเมริกา

Boiler	Reburning fuel	NO and SO ₂ reduction
60–110 MW _e cyclone, coal-fired	Coal	36–52%, w/bituminous
40–75 MW _e , tangential	Natural gas 15–25%	NO _x : 67% SO ₂ : 52–80%
20–33 MW _e , cyclone	Natural gas 22–33%	NO _x : 60–66% SO ₂ : 32–63%
172 MW _e , wall-fired	Natural gas 5–20%	NO _x : 30% (using low-NO _x burners) NO _x : 60–73% (using gas reburning coupled with low-NO _x burners)

ที่มา: The U.S. Department of Energy (US DOE, 1999)

ชีวมวลถูกพิจารณาว่ามีการปลดปล่อย CO₂ รวมเป็นศูนย์ และนอกจากนั้น (3) เชื้อเพลิงชีวมวลยังมีปริมาณของสารระเหยสูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ซึ่ง มีส่วนช่วยในการกำจัดและลด NO_x ได้ (Ballester et al., 2008; Harding & Adams, 2000)

Harding และ Adams (Harding & Adams, 2000) ได้ทำการทดลองใช้ไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำในการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำ นอกจากนี้ผลการทดสอบที่ได้ ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ซ้ำด้วยถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ จากผลการวิจัยพบว่า การใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำที่ 10–15% ของปริมาณความร้อนทั้งหมดสามารถลดการปลดปล่อย NO_x ได้ถึง 70% ตัวแปร เช่น ความชื้นของเชื้อเพลิง ขนาดของเชื้อเพลิง ปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำ และอัตราส่วนสมมูล ถูกพบว่ามีผลต่อการปลดปล่อย NO_x แต่ ปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำ และอัตราส่วนสมมูล ถูกยืนยันว่ามีผลมากที่สุด จากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ

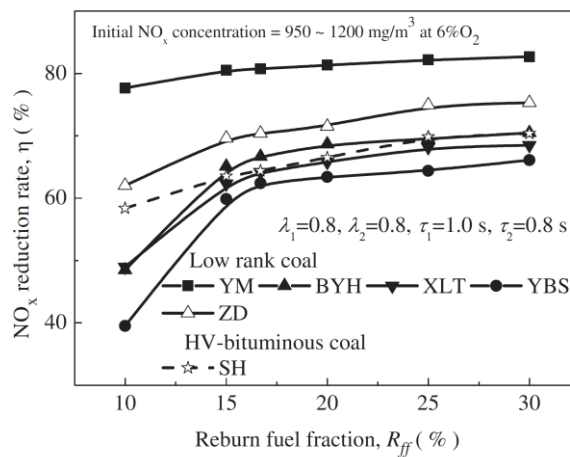
งานวิจัยของ Kicherer และคณะ (Kicherer et al., 1994) บ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณสารระเหยที่มีอยู่มากในชีวมวลมีส่วนช่วยในการลดการปลดปล่อย NO_x ได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ผลวิจัยของ Casaca และ Costa (Casaca & Costa, 2005) Ballester และคณะ (Ballester et al., 2008) และ Shu และคณะ (Shu et al., 2015b) ได้ยืนยันไปในทางเดียวกันว่าการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำ สามารถลดการปลดปล่อย NO_x ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังสามารถช่วยลดปัญหาเนื่องจากการกักเก็บในเชื้อเพลิงได้ด้วย

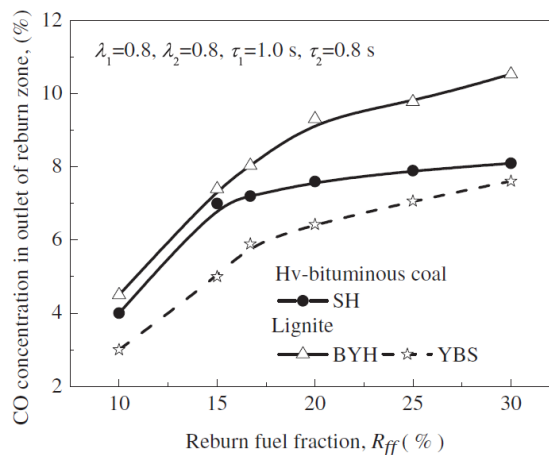
Yang และคณะ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนเชื้อเพลิงรอง เวลาคงอยู่ (residence time) ในช่วงเผาไหม้ซ้ำ อัตราส่วนสมมูลในช่วงเผาไหม้ซ้ำและอัตราส่วนสมมูลในห้องเผาไหม้หลัก ที่มีผลต่อการปลดปล่อย NO_x ระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาขนาดห้องปฏิบัติการที่มีการประยุกต์ใช้การเผาไหม้ซ้ำ ภาพที่ 2.8 แสดงถึงผลกระทบของสัดส่วนเชื้อเพลิงรองต่อการลดการปล่อย NO_x จากภาพจะเห็นได้ว่า สัดส่วนของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำ มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการปลดปล่อย NO_x โดยประสิทธิภาพการลด

NO_x จะแปรผันตรงกับอัตราส่วนส่วนเชื้อเพลิงรอง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำมากกว่า 20% การลด NO_x จะค่อนข้างคงที่ จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยการเพิ่มอัตราของปฏิกิริยาเนื้อเดียว (homogeneous reaction) ของ NO_x ที่ก่อตัวในห้องเผาไหม้กับ สารระเหย (volatile matter) ที่เกิดจากเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำ และนอกจากนี้ยังเป็นผลมาจาก ปฏิกิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous reaction) ระหว่าง NO_x และ คาร์บอนของถ่านของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำ

นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มข้นของ CO ภายในเตาเผาเพิ่มขึ้นเป็นเมื่อมีการการเพิ่มอัตราส่วนเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำดังแสดงในภาพที่ 2.9 เป็นผลทำให้อัตราการลด NO_x เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง CO และ NO ทำให้ NO_x สลายตัวกลายเป็น N₂ ตามปฏิกิริยา 2.20



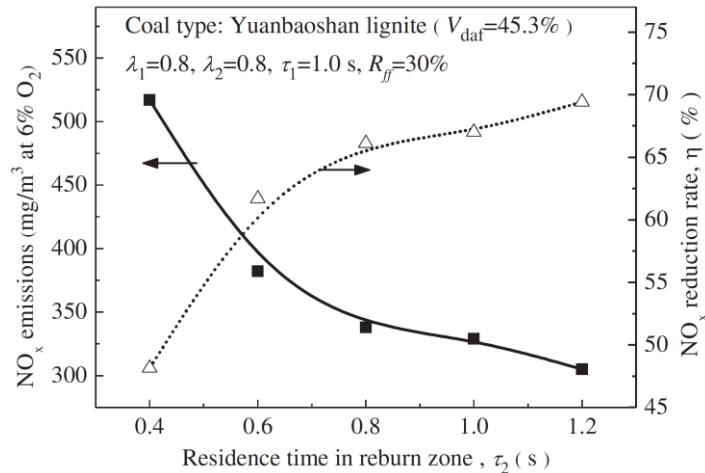
ภาพที่ 2.8 ผลกระทบของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำต่อการลด NO_x (Yang et al., 2015)



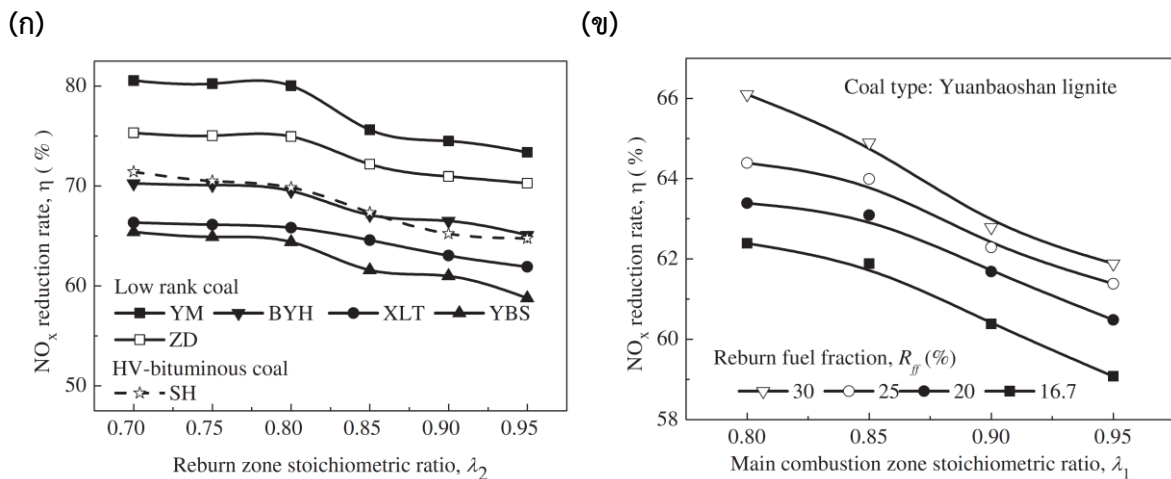
ภาพที่ 2.9 ผลกระทบของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำต่อ CO ที่ออกจากช่วงเผาไหม้ซ้ำ (Yang et al., 2015)

ภาพที่ 2.10 แสดงผลกระทบของเวลาคงอยู่ต่อการปลดปล่อยและประสิทธิภาพการลด NO_x จากภาพจะเห็นได้ว่าถ้าเพิ่มเวลาคงอยู่การปลดปล่อย NO_x จะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเวลาคงอยู่ที่เพิ่มขึ้นทำให้มีเวลาให้ปฏิกิริยาการสลายตัวของ NO_x เพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากว่ามีเวลาคงอยู่ในช่วงเผาไหม้ซ้ำสั้น จะ

ทำให้ HCN และถ่านที่อยู่ในโซนนี้ถูกส่งไปยังช่วงการเผาไหม้หมดจด (burnout) ทำให้เกิดการออกซิเดชันของสารเหล่านี้บางส่วนกลายเป็น NO_x และอาจเป็นผลให้ NO_x ที่ปล่อยออกจากเตาเผาเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.10 ผลกระทบของเวลาคงอยู่ในช่วงเผาไหม้ซ้ำต่อการปลดปล่อยและประสิทธิภาพการลด NO_x (Yang et al., 2015)



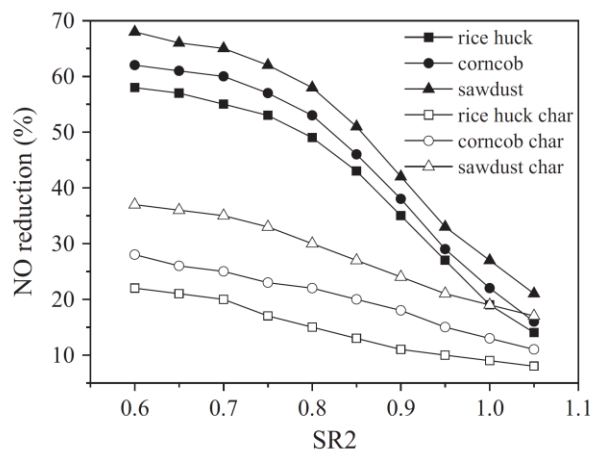
ภาพที่ 2.11 ผลกระทบของอัตราส่วนสมมูลในช่วง (ก) เเผาไหม้ซ้ำและ (ข) ห้องเผาไหม้หลัก ต่อประสิทธิภาพการลด NO_x (Yang et al., 2015)

ภาพที่ 2.11 แสดงผลของอัตราส่วนสมมูลภายในช่วงเผาไหม้ซ้ำและห้องเผาไหม้หลักต่อประสิทธิภาพของการลด NO_x จากรูปจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการลด NO_x จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูลภายในห้องเผาไหม้ซ้ำและห้องเผาไหม้ เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารระเหยที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบลดลง นอกจากนั้นยังทำให้สารประกอบพวก HCN, NH_3 ในห้องเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น ช่วยให้ปฏิกิริยาการลด NO_x เพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาเคมี 2.21-2.24





Shu (Shu et al., 2015a) ได้ศึกษาผลกระทบของชนิดของเชื้อเพลิงเผาไหม้ชนิดต่างกัน 3 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการลด NO_x ภาพที่ 2.12 แสดงผลกระทบของเชื้อเพลิงเผาไหม้และอัตราส่วนสมมูลในช่วงเผาไหม้ซ้ำต่อประสิทธิภาพการลด NO_x จากภาพจะเห็นได้ว่า คุณสมบัติ (ชนิด) ของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำมีผลอย่างมากต่อการปลดปล่อย NO_x เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดที่สภาวะการเผาไหม้เดียวกันพบว่าขี้เลื่อย (sawdust) มีประสิทธิภาพในการลด NO_x ได้ดีที่สุด ตามด้วยซังข้าวโพด (corncob) เดียวกันพบว่าขี้เลื่อย (sawdust) มีประสิทธิภาพในการลด NO_x ได้ดีที่สุด ตามด้วยซังข้าวโพด (corncob)



ภาพที่ 2.12 ผลกระทบของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำและอัตราส่วนสมมูลในช่วงเผาไหม้ซ้ำต่อประสิทธิภาพการลด NO_x (Shu et al., 2015a)

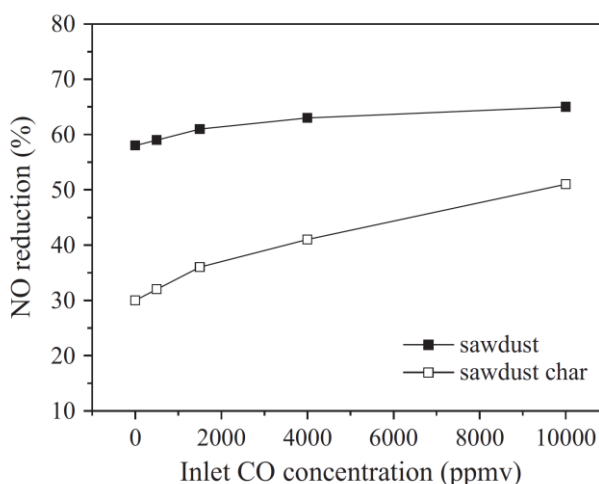
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบของ Shu et al., 2015a

Samples	Proximate analysis (wt %, as air dried)				Ultimate analysis (wt %, as air dried)					LHV (MJ/kg)
	M	A	V	FC	C	H	O	N	S	$Q_{\text{net, ad}}$
<i>Biomass</i>										
Rice husk	4.0	15.5	64.4	16.1	39.5	4.9	35.0	0.5	0.04	15.1
Sawdust	3.3	3.0	74.4	19.3	45.6	5.6	38.6	0.7	0.03	17.5
Corncob	4.6	5.3	72.1	18.0	43.7	5.3	39.7	0.5	0.06	16.4
<i>Biomass char-800 °C</i>										
Rice husk	3.3	38.9	6.5	51.3	69.6	1.4	4.1	0.4	0.05	25.1
Sawdust	2.0	31.7	6.9	59.4	73.8	1.8	6.0	0.4	0.07	25.9
Corncob	2.5	30.9	6.5	60.1	69.1	1.3	4.4	0.5	0.08	23.1
<i>Biomass char-1000 °C</i>										
Rice husk	3.1	40.1	6.3	50.5	67.2	1.1	3.8	0.6	0.04	24.2
Sawdust	2.3	32.8	6.9	58.0	74.9	1.7	5.7	0.7	0.06	25.7
Corncob	2.8	31.8	6.4	59.0	69.8	1.0	5.1	0.8	0.05	22.9
<i>Biomass char-1200 °C</i>										
Rice husk	2.9	40.5	5.9	50.7	66.5	0.9	2.2	0.7	0.05	23.6
Sawdust	2.1	33.3	6.7	57.9	74.1	1.1	4.8	0.8	0.04	24.8
Corncob	2.6	32.9	6.1	58.4	68.4	0.8	3.5	0.6	0.06	21.5

ที่มา: Shu et al., 2015a

และ แกลบ (rice husk) จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่แสดงในตาราง 2.4 เชื้อเพลิงทั้งสาม มีส่วนประกอบของไนโตรเจน (N) ใกล้เคียงกันประมาณ 0.5–0.7% โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามพบว่าซีลี้อยมีปริมาณสารระเหย (V) มากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ทำให้ในระหว่างการเผาไหม้ซีลี้อยมีการปลดปล่อยสารระเหยที่ประโยชน์ต่อปฏิกิริยาเนื้อเดียวสำหรับการลด NO_x นอกจากนี้ ซีลี้อยยังมีปริมาณ คาร์บอนคงที่ (FC) มากที่สุด ดังนั้น ในระหว่างการเผาไหม้ที่ซีลี้อยเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ซีลี้อยจะมีถ่านของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซีลี้อยเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิง 2 ชนิดที่เหลือ เป็นผลให้ปฏิกิริยาเนื้อผสมระหว่าง C และ NO ที่บริเวณพื้นผิวของถ่านเกิดขึ้นได้มากที่สุด

เพื่อเป็นการยืนยันผลกระทบของสารระเหยในเชื้อเพลิงเผาไหม้ซีลี้อยต่อประสิทธิภาพการลด NO_x ผู้วิจัยยังได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างซีลี้อยและถ่านซีลี้อย (มีปริมาณสารระเหยต่ำ ดูจากตารางที่ 2.4) ภาพที่ 2.13 แสดงผลกระทบของเชื้อเพลิงและปริมาณ CO ต่อประสิทธิภาพการลด NO_x จากรูปพบว่า ซีลี้อยมีประสิทธิภาพการลด NO_x ดีกว่าถ่านซีลี้อยทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากปริมาณของสารระเหยในเชื้อเพลิงที่มากกว่า นอกจากนี้ ยังจะเห็นว่าปริมาณ CO มีผลต่อปริมาณการลด NO เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ (Yang et al., 2015)



ภาพที่ 2.13 ผลกระทบของเชื้อเพลิงและความเข้มข้นของ CO ต่อประสิทธิภาพการลด NO_x (Shu et al., 2015a)

นอกจากนี้ (Shu et al., 2015a) ยังได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสม เวลาคงอยู่ต่อการลด NO_x ซึ่งได้ผลการทดลองไปในทางเดียวกันกับ (Yang et al., 2015)

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า เทคโนโลยีการเผาไหม้ซีลี้อยเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการควบคุมมลภาวะ (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง NO_x) ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยความรู้พื้นฐาน หรือข้อมูล ที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วิธีการเผาไหม้ซีลี้อยในเตาเผาฟลูอิดเบดสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นมีอยู่อย่างจำกัด (ยังไม่มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง) ดังนั้นงานวิจัยในสาขานี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการพัฒนาการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง (โดยเฉพาะอย่างยิ่งชีวมวลที่มีอยู่ในประเทศไทยอย่างมากมาย) เพื่อการผลิตพลังงาน (ความร้อนหรือไฟฟ้า) ให้เป็นไปอย่างยั่งยืน

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และกระบวนการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ถูกแบ่งรูปแบบของการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ 1) การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ด้วยวิธีการเผาไหม้ฟลูอิด์เบดแบบปกติ (เพื่อใช้เป็นกรณีอ้างอิงเปรียบเทียบ) และ 2) การเผาไหม้ชีวมวล ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วม 3 วิธี คือ (a) การใช้เทคนิคการเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงผสม (co-firing premixed fuel) (b) การใช้เทคนิคการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (fuel staging) (c) การเผาไหม้ด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ (reburning technique) เพื่อลดการปลดปล่อย NO_x เนื้อหาในบทนี้อธิบายวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งกระบวนการในการดำเนินการวิจัยตลอดทั้งโครงการ

3.1 เตาเผาฟลูอิด์เบดแบบทรงกรวย

ในการวิจัยนี้ การทดลองทั้งหมดถูกทดลองในเตาเผาฟลูอิด์เบดแบบทรงกรวย (conical fluidized-bed combustor หรือเรียกว่า “conical FBC”) ดังแสดงในภาพที่ 3.1 เตาเผาถูกออกแบบให้

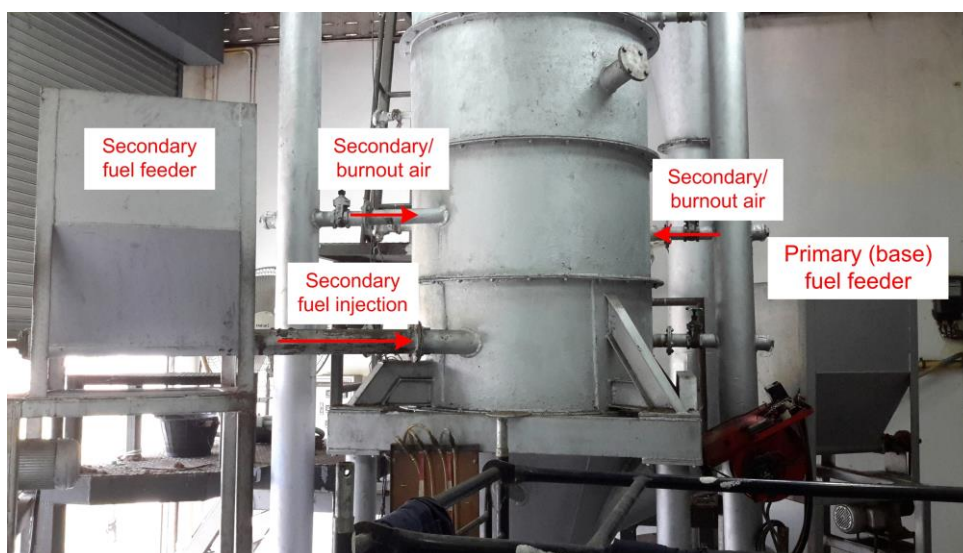


ภาพที่ 3.1 เตาเผาฟลูอิด์เบดแบบทรงกรวยขนาด ก่อนการปรับปรุงเพื่อใช้สำหรับการเผาไหม้ร่วม

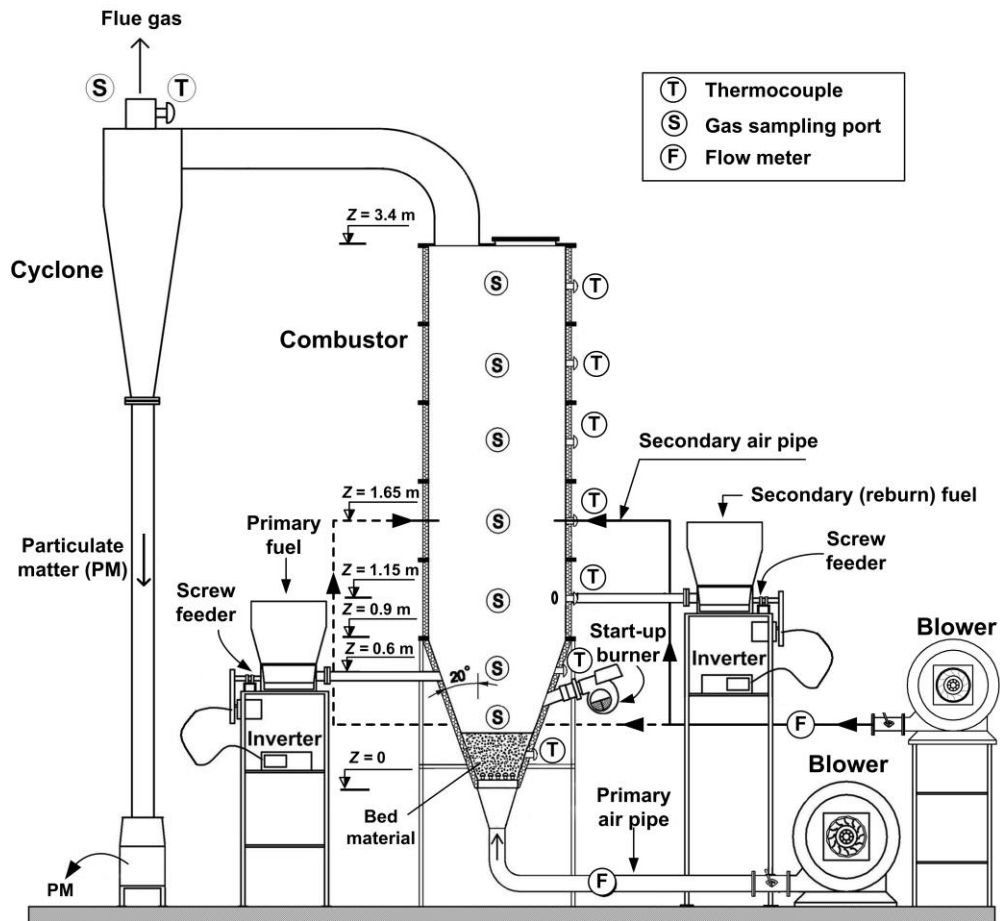
สามารถเชื้อเพลิงได้หลากหลายเช่น ถ่านหิน และชีวมวลชนิดต่างๆ โดยมีขนาดการออกแบบให้สามารถรับภาระความร้อนได้สูงสุดประมาณ 350 kW_{th} จากภาพที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า เตาเผาประกอบด้วสองส่วนหลักคือ (1) ส่วนทรงกรวยมุม 40° ความสูง 0.9 m ติดตั้งอยู่ด้านล่างของเตา (2) ส่วนทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.9 m ความสูง 2.5 m ซึ่งประกอบมาจาก ทรงกระบอก 5 ชั้น แต่ละชั้นสูง 0.5 m เตาเผาสร้างมาจากเหล็กเคลือบกันสนิม (galvanized steel) หนา 4.5 cm และถูกหุ้มฉนวนภายในด้วยปูนซีเมนต์ทนไฟ นอกจากตัวเตาเผาแล้ว มีการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ 8 ตัว (thermocouple of type K ความแม่นยำในการวัด ± 0.5 °C) ตลอดความสูงของเตาและที่ปลายปล่องไอเสียเพื่อทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาระหว่างการเผาไหม้ โดยหัววัดอุณหภูมิทุกตัวเชื่อมต่อกับ data logger ซึ่งสามารถแสดงอุณหภูมิทุกจุดได้พร้อมกัน

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเตาเผานี้ได้ถูกออกแบบให้มีการเผาไหม้แบบดั้งเดิม (Conventional combustion) โดยการป้อนเชื้อเพลิงตำแหน่งเดียวและมีการจ่ายอากาศหลักเพื่อการเผาไหม้เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ชุดทดลองสามารถทำงานได้ตามหลักการของการเผาไหม้แบบจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น (ต้องมีการจ่ายเชื้อเพลิงต่างระดับ) และการการเผาไหม้ซ้ำ (มีการจ่ายเชื้อเพลิงต่างระดับและการจ่ายอากาศเผาไหม้ซ้ำ) จึงมีการปรับปรุงเตาเผาด้วยการติดตั้งชุดป้อนเชื้อเพลิงตัวที่สองเข้าไปกับตัวเตาที่ระยะ 1.15 m (วัดจากหัวจ่ายอากาศ) และระบบจ่ายอากาศรองหรืออากาศเผาไหม้ซ้ำที่ระยะ 1.65 m ดังแสดงในภาพที่ 3.2

ภาพที่ 3.3 แสดงแผนภาพรายละเอียดทางเรขาคณิตของเตาเผาฟลูอิดเบดที่ทำการปรับปรุงสำหรับการทดสอบการเผาไหม้ด้วยวิธีการที่เผาไหม้ร่วมแบบต่างๆ แผนภาพดังกล่าวระบุถึง ขนาด ระยะ และตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเตาเผา ระยะความสูงของเตาเผา ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิง และระบบการจ่ายอากาศ



ภาพที่ 3.2 เตาเผาฟลูอิดเบดแบบทรงกรวยที่มีการติดตั้งระบบการป้อนเชื้อเพลิงรองและระบบการป้อนอากาศเผาไหม้ซ้ำสำหรับการทดสอบ



ภาพที่ 3.3 แผนภาพแสดงรายละเอียดของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดที่ทำการปรับปรุงสำหรับการทดสอบการเผาไหม้ด้วยวิธีการที่เผาไหม้ร่วมแบบต่างๆ

ในกรณีการเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงผสม เชื้อเพลิงจะถูกทำการผสมกัน (ตามสัดส่วนที่กำหนดอธิบายในหัวข้อ 3.4) และถูกป้อนเข้าเตาเผาด้วยเครื่องป้อนเชื้อเพลิงเพียงตัวเดียว ที่ส่วนทรงกรวยระยะ 0.9 m วัดจากหัวจ่ายอากาศ

สำหรับกรณีการเผาไหม้ร่วมด้วยวิธีการเผาไหม้เป็นชั้นและการเผาไหม้ซ้ำ การป้อนเชื้อเพลิงจะถูกแบ่งเป็น 2 สาย และถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาที่ตำแหน่งต่างกัน 2 ตำแหน่ง โดยที่เชื้อเพลิงหลักจะถูกป้อนเข้าที่ตำแหน่ง 0.9 m ส่วนเชื้อเพลิงรองจะถูกป้อนที่ตำแหน่ง 1.15 m ในกรณีการเผาไหม้ซ้ำนั้น นอกจากจะมีการป้อนเชื้อเพลิง 2 ตำแหน่งแล้ว ยังมีการแบ่งการป้อนอากาศเป็น 2 สาย โดยอากาศที่ใช้เผาไหม้ถูกป้อนเข้าเตาโดยเครื่องจ่ายอากาศขนาด 25 แรงม้า ผ่านท่อขนาด 10 cm และเข้าเตาเผาผ่านหัวกระจายอากาศซึ่งถูกใช้สำหรับการกระจายอากาศและการสร้างฟลูอิดซ์เซชันภายในเตาให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัดของเตาเผา อากาศรองถูกจ่ายเข้าเตาเผาด้วยเครื่องจ่ายอากาศขนาด 7.5 แรงม้าผ่านท่อขนาด 10 cm เพื่อการเผาไหม้สารที่เผาไหม้ได้ที่เหลือจากโซนการเผาไหม้หลักทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์มากที่สุด

ในระหว่างกระบวนการเริ่มต้นเตา หัวเผา น้ำมันดีเซลถูกใช้สำหรับการอุ่นวัสดุเบด เมื่อทรายอมความร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 700 °C ซึ่งสูงเพียงพอต่อการติดไฟของชีวมวล ก็จะหยุดการจ่ายน้ำมัน จากนั้นจะเริ่มการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล

3.2 เชื้อเพลิง

ในการวิจัยครั้งนี้ ใช้เชื้อเพลิง 4 ชนิดคือ 1) แกลบอัดเม็ด (Pelletized rice husk, PRH) 2) เหง้ามันสำปะหลังอัดเม็ด (Pelletized cassava rhizome, PCR) 3) แกลบชื้น (Moisturize rice husk, MRH) และ 4) เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus bark, Eu.B) ลักษณะโดยทั่วไปของเชื้อเพลิงแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

สาเหตุที่ใช้เชื้อแกลบในงานวิจัยนี้เนื่องจากหาได้ง่ายและราคาค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่นๆ สำหรับเหง้ามันสำปะหลังอัดเม็ดและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสนั้นเป็นเชื้อเพลิงที่หาค่อนข้างยาก แต่อย่างไรก็ตาม จากจุดประสงค์หลักของโครงการวิจัยนี้คือ เพื่อหาวิธีการเผาไหม้ที่สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ดังนั้นการใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนสูงอย่างเช่นเหง้ามันสำปะหลัง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

Biomass	C	H	O	N	S	A	W	(kJ/kg)
PRH	43.27	5.04	31.17	0.79	0.02	9.90	9.81	15,100
MRH	29.94	3.01	22.93	0.34	0.01	14.21	29.56	10,600
PCR	38.08	5.53	40.35	0.88	0.05	4.49	10.62	15,522
Eu.B	9.5	3.89	27.64	0.13	0	6.18	52.65	6,192

หมายเหตุ

PRH คือ แกลบอัดเม็ด

MRH คือ แกลบชั้น

PCR คือ เหง้ามันสำปะหลังอัดเม็ด

Eu.B เปลือกไม้ยูคา

จะทำให้เห็นศักยภาพของวิธีการที่นำมาใช้เพื่อลดมลพิษดังกล่าวได้อย่างชัดเจน สำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัส นั้นพบว่ามีความชื้นค่อนข้างสูงซึ่งไม่สามารถนำมาเผาไหม้ด้วยตัวของมันเองได้ นอกจากนี้ส่วนประกอบของ ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงชนิดนี้ค่อนข้างต่ำเหมาะต่อการนำมาเป็นเพลิงเผาไหม้ร่วม

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด จากตารางที่ 3.1 พบว่า แกลบอัดเม็ดและเหง้ามันสำปะหลังอัดเม็ดคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากมีปริมาณ คาร์บอน (C) ในปริมาณที่สูงและมีค่าความร้อนต่ำอยู่ในระดับปานกลาง (สามารถเปรียบเทียบกับถ่านหิน คุณภาพปานกลาง) แต่สำหรับแกลบชั้นและเปลือกไม้ยูคาลิปตัส จะเห็นได้ว่า มีค่าความร้อนต่ำที่ต่ำเนื่องจาก มีปริมาณความชื้นสูง ดังนั้นหากทำการเผาไหม้แกลบและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีความชื้นอาจทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพต่ำได้ การใช้แกลบชั้นและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงรองในงานวิจัยนี้ มีจุดมุ่งหมาย หลักเพื่อสร้างสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (หมายความว่า มีปริมาณ CO , C_xH_y และ NH_3) ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาเพื่อการแตกตัวของ NO_x ให้กลายเป็น N_2 ภายในเตาเผา ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ยังเป็นการลดอุณหภูมิภายในเตาเผาไม่ให้สูงมากซึ่งช่วยเป็นการลด NO_x อีกทางหนึ่ง



ภาพที่ 3.5 ทรายซิลิกาที่ใช้เป็นวัสดุเบดในการทดสอบการเผาไหม้

3.3 วัสดุเบด

ในการวิจัยสำหรับการหาวิธีการลดการปล่อย NO_x ได้ใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด เพราะโดยปกติแล้วทรายซิลิกาเป็นทรายที่ถูกใช้ในการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด

ภาพที่ 3.5 แสดงลักษณะทั่วไปของวัสดุเบด (ทราย) ที่ใช้ในการวิจัยนี้ โดยวัสดุเบดที่ใช้มีขนาด 300–500 μm โดยเทียบได้กับอนุภาคตามการจัดแบบ Geldart (Geldart, 1973) กลุ่ม B ซึ่งจะทำให้เกิดการฟลูอิดไคซ์แบบฟองอากาศ (bubbling fluidization) หรือ แบบปั่นป่วน (turbulent fluidization) คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุเบดถูกแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเบด

วัสดุเบด	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

3.4 วิธีดำเนินการ

ในโครงการวิจัยนี้มีแบ่งการทดสอบเป็น 5 กรณีแสดงในตารางที่ 3.3 ในโครงการวิจัยนี้พารามิเตอร์หลักในการทดสอบคือ ปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess air, EA) อัตราส่วนเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลัก (Energy fraction of secondary/reburn fuel, EF_2) และอัตราส่วนอากาศรองต่ออากาศรวม (Secondary-to-total air ratio, SA/TA)

จากตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า ปริมาณความร้อนป้อนรวม (heat input) เข้าสู่เตาเผาของทุกการทดลองถูกกำหนดให้มีปริมาณเท่ากันที่ประมาณ 200 kW_{th} ทั้งนี้ เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกันได้ ทั้งนี้ปริมาณความร้อนป้อนสามารถคำนวณได้จาก อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (สัดส่วนของเชื้อเพลิงหลักและเชื้อเพลิงรอง) คูณกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงดังสมการ

$$E_{\text{in}} = \frac{m_{\text{f1}}(\text{LHV}_1) + m_{\text{f2}}(\text{LHV}_2)}{3600} \quad (3.1)$$

เมื่อ E_{in} คือปริมาณความร้อนป้อนเข้าเตา (kW_{th})

m_{f1} คืออัตราการป้อนของเชื้อเพลิงหลัก (kg/h)

m_{f2} คืออัตราการป้อนของเชื้อเพลิงรอง (kg/h)

LHV_1 คือค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงหลัก (kJ/kg)

LHV_2 คือค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงรอง (kJ/kg)

ในการวิจัยนี้จะทำการกำหนดปริมาณส่วนเกินเท่ากับทุกการทดลอง คือ 20% 40% 60% และ 80%

ตารางที่ 3.3 กรณีศึกษาและตัวแปรที่ศึกษาและควบคุมและช่วงของการทดลอง

การทดลอง	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) ด้วยวิธีการเผาไหม้ที่มีการจ่ายอากาศหลักอย่างเดียว	ปริมาณความร้อนป้อน	200 kW _{th}
	สัดส่วนของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำในเชื้อเพลิงผสม (energy fraction (EF ₂) of secondary fuel in fuel blend)	0.1–0.25
	อากาศส่วนเกิน	20–80%
กรณีศึกษาที่ 3: การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เทคนิคการเผาไหม้แบบจ่ายเชื้อเพลิงต่างระดับ (fuel staging) ด้วยวิธีการเผาไหม้ที่มีการจ่ายอากาศหลักอย่างเดียว	ปริมาณความร้อนป้อนเข้าสู่เตาเผา	200 kW _{th}
	ปริมาณอากาศส่วนเกิน	20–80%
	สัดส่วนของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำในปริมาณการป้อนพลังงานความร้อนรวม Energy fraction (EF ₂) of secondary fuel in total fuel supply	0.1–0.25
กรณีศึกษาที่ 4: การเผาไหม้ซ้ำ โดยมีการจ่ายเชื้อเพลิงต่างระดับ และ จ่ายอากาศรองเพื่อทำการเผาไหม้ซ้ำ	ปริมาณความร้อนป้อนเข้าสู่เตาเผา	200 kW _{th}
	อากาศส่วนเกิน	20–80%
	สัดส่วนของเชื้อเพลิงเผาไหม้ซ้ำในเชื้อเพลิงผสม Energy fraction (EF ₂) of reburn fuel in total fuel supply	0.1–0.25
	อัตราส่วนอากาศรองต่ออากาศรวม (SA/TA)	0.1–0.4

3.4.1 การคำนวณอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลัก

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

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

EF_2 สามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนต่อของเชื้อเพลิงหลัก LHV_{f1} และเชื้อเพลิงรอง LHV_{f2}

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

3.4.2 การคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้

ปริมาณอากาศตามทฤษฎี (the theoretical volume of air, m^3/kg , at $0^\circ C$ and $1\ atm$) ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม ภายใต้สภาวะการเผาไหม้ที่สมบูร์ณ (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

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

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

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

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

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

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

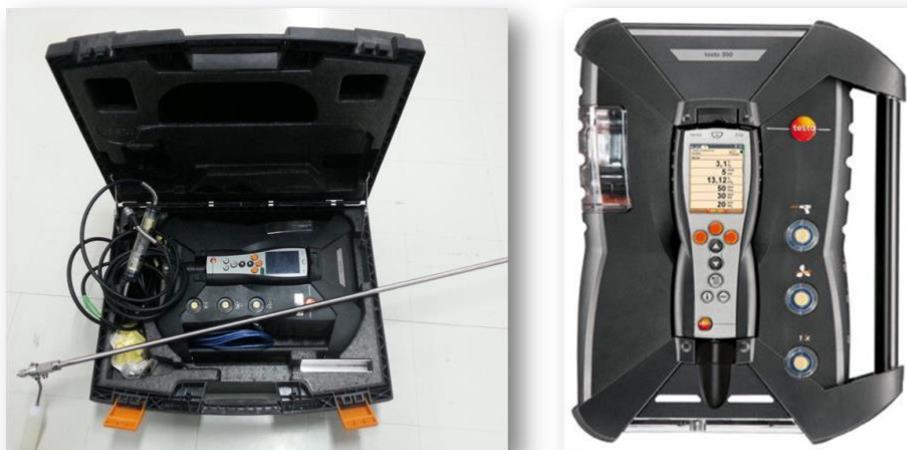
ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA, %) คำนวณจากสมการที่ 3.9

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

3.4.3 การวัดผลการทดลอง

ตัวแปรที่ทำการวัดในขณะที่ทำการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วย อุณหภูมิ ความเข้มข้นของออกซิเจน และความเข้มข้นของก๊าซมลพิษ NO_x CO และ C_xH_y โดยทำการวัดตามความสูงของเตาเผา และที่ทางออกของไซโคลน โดยมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบการเผาไหม้ และการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด 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 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย Testo-350 (Testo Germany)

3.4.4 การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้

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

$$\eta_{cf} = 100 - (q_{ic,cf} + q_{uc,cf}) \quad (3.10)$$

- ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ความร้อนที่สูญเสียจากคาร์บอนส่วนที่ไม่เผาไหม้จำเป็นที่จะต้องหาจากถ้ำที่เกินออกมาจากกระบวนการการเผาไหม้ โดยค่าการสูญเสียความร้อนเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ในถ้ำ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.11

$$q_{uc,cf} = \frac{32,866 C_{PM}}{(100 - C_{PM})} \frac{A_{cf}}{LHV_{cf}} \quad (3.11)$$

โดย C_{PM} คือ คาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ที่อยู่ในถ้ำ (คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก)

A_{cf} คือ ปริมาณถ้ำของเชื้อเพลิงกรณีการเผาไหม้ร่วม (คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำกรณีการเผาไหม้ร่วม (kJ/kg)

- ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์สามารถคำนวณได้จาก ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ก๊าซไฮโดรเจน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่วัดได้ ณ ทางออกของปล่องไอเสียของเตาเผา ปริมาณความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.12

$$q_{ic,cf} = (126.4CO + 358.2C_xH_y)_{@6\%O_2} \cdot 10^{-4} V_{dg,cf} \frac{(100 - q_{uc,cf})}{LHV_{cf}} \quad (3.12)$$

3.4.5 การหาจุดเหมาะสมการทำงานของเตาเผา

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาจุดเหมาะสมโดยวิธีอ้างอิงต้นทุน (Cost-based approach) (Kuprianov, 2005; Kuprianov et al., 2011) เพื่อทำการหาอากาศส่วนเกินและอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลักที่

เหมาะสมที่สุด วิธีการนี้จะให้ค่าต่ำสุดของต้นทุนสำหรับการลดมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ชีวมวล โดยมีสมการกำหนดเป้าหมาย (Objective function) ดังแสดงในสมการ 3.13

$$J_{ec} = \text{Min}(P_{NO_x} \dot{m}_{NO_x} + P_{CO} \dot{m}_{CO} + P_{C_xH_y} \dot{m}_{C_xH_y}) \quad (3.13)$$

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

P_{CO} คือ ต้นทุนของการลด CO (US\$/t)

$P_{C_xH_y}$ คือ ต้นทุนของการลด C_xH_y (พิจารณาให้เป็น CH_4) (US\$/t)

\dot{m}_{NO_x} คือ อัตราการปล่อย NO_x (kg/s)

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

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

ซึ่ง $P_{NO_x} = 2400$ US\$/t และ $P_{C_xH_y}$ หรือ $P_{CH_4} = 330$ US\$/t (ESCAP-UN, 1995) แต่สำหรับ

ค่าต้นทุนการลด CO ยังไม่มีค่าแนะนำไว้ในเอกสารหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แต่อย่างไรก็ตามได้มีการแนะนำว่า อัตราส่วนระหว่างค่าของการลด NO_x ต่อ CO (P_{NO_x} / P_{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

$$\dot{m}_{NO_x} = 2.05 \times 10^{-6} (\dot{m}_{f1} + \dot{m}_{f2}) NO_x V_{dg,cf} \quad (3.14)$$

$$\dot{m}_{CO} = 1.25 \times 10^{-6} (\dot{m}_{f1} + \dot{m}_{f2}) CO V_{dg,cf} \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_{C_xH_y} = 0.71 \times 10^{-6} (\dot{m}_{f1} + \dot{m}_{f2}) C_xH_y V_{dg} \quad (3.16)$$

ค่า V_{dg} สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.5

บทที่ 4

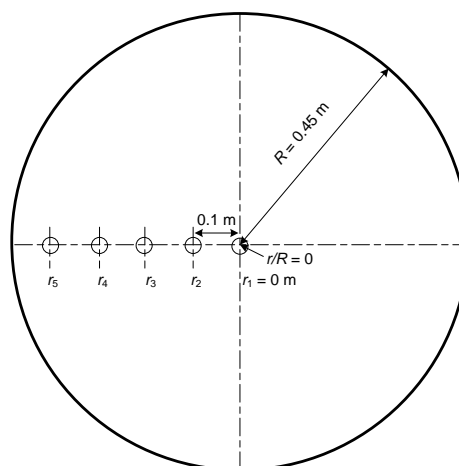
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากจุดมุ่งหมายของโครงการวิจัยนี้คือเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนสูงในเตาเผาแบบฟลูอิดซ์เบด โดยใช้วิธีการเผาไหม้ร่วมที่แตกต่างกัน 3 วิธี อันได้แก่การใช้เทคนิคการเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงผสม (co-firing premixed fuel) การใช้เทคนิคการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (fuel staging) การเผาไหม้ด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ (reburning technique) เนื้อหาในบทนี้แสดงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองที่ได้จากการทดลองใช้วิธีการเผาไหม้ดังกล่าว เพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมและคุณลักษณะการเผาไหม้ รวมถึงสมรรถนะการทำงานของเตาเผา ก่อนและหลังการใช้วิธีการเผาไหม้ร่วม ในผลการทดลองทุกการทดลองจะถูกแสดงเปรียบเทียบกับกรณีการเผาไหม้แบบดั้งเดิม (กรณีที่ไม่มีการเผาไหม้ร่วม)

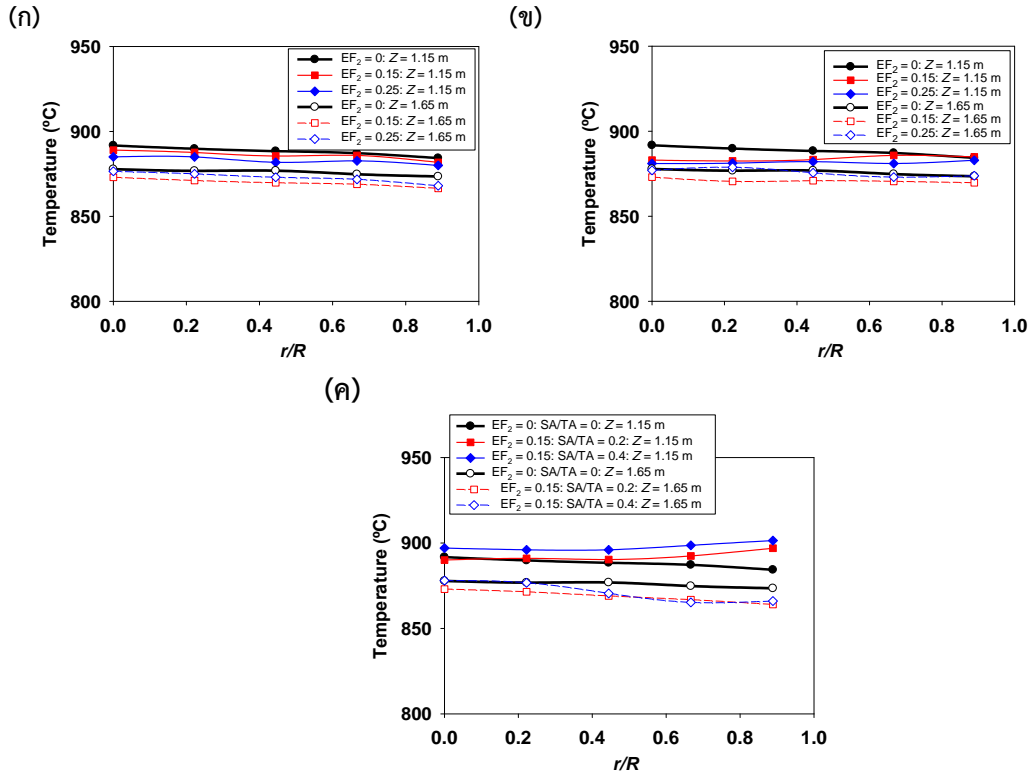
4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิและความเข้มข้นแก๊สภายในแนวรัศมีเตาเผาฟลูอิดซ์เบด

เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการเผาไหม้ในแนวรัศมี (แนวขวางหน้าตัด) ของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดระหว่างทำการเผาไหม้ร่วมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ได้มีการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิและแก๊สภายในแนวรัศมีเตา ซึ่งการวัดจะใช้หัววัดที่สามารถปรับตำแหน่งได้ โดยระยะในการวัดถูกแสดงในภาพที่ 4.1 โดยการวัดจะเริ่มวัดจากตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัด (axial direction) ของเตาเผา (ระยะ r_1) จากนั้นทำการขยับหัววัดเพื่อวัดที่ตำแหน่ง r_2 ซึ่งห่างจากจุดเดิมเป็นระยะ 0.1 m และทำการวัดจนถึงตำแหน่ง r_5 ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ในการอภิปรายในหัวข้อนี้ จะแสดงเพียงแค่ผลการทดลองที่ได้จากการเผาไหม้ร่วมระหว่างเหง้ามันสำปะหลัง (PCR) และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (EB) เนื่องจากการสังเกตเปรียบเทียบระหว่างการเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบอัดเม็ดและแกลบซึ่งมีลักษณะการกระจายตัวในแนวรัศมีคล้ายกัน

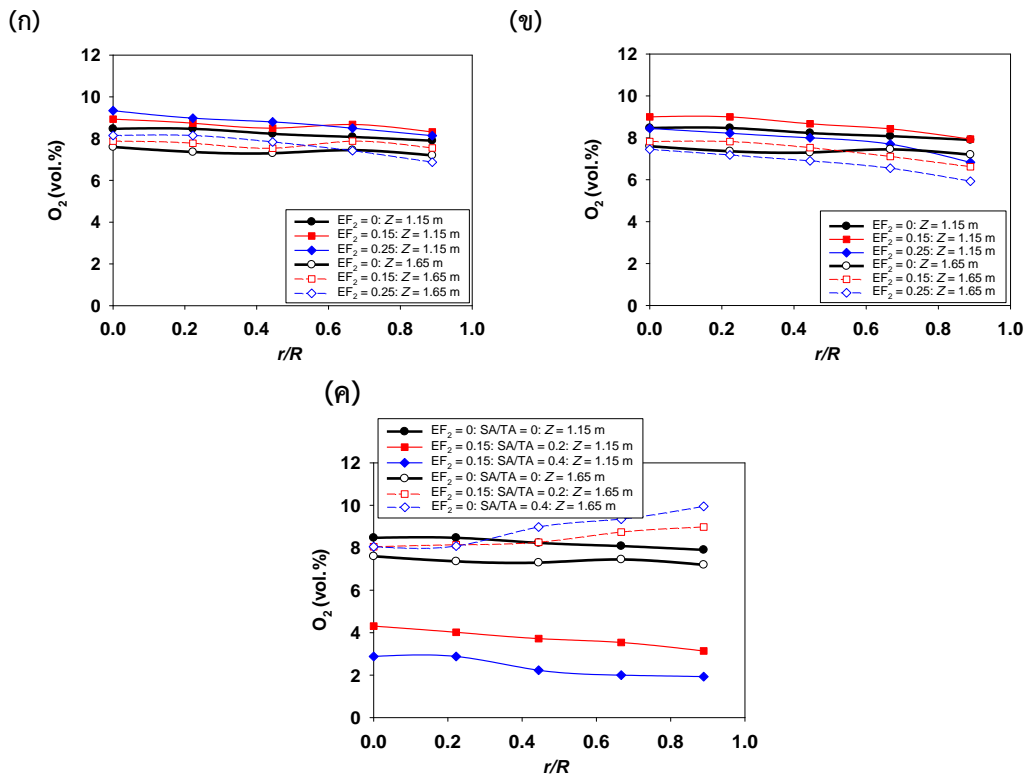
ภาพที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR และ EB โดยใช้วิธีการเผาไหม้ร่วมแบบใช้เชื้อเพลิงผสม การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ



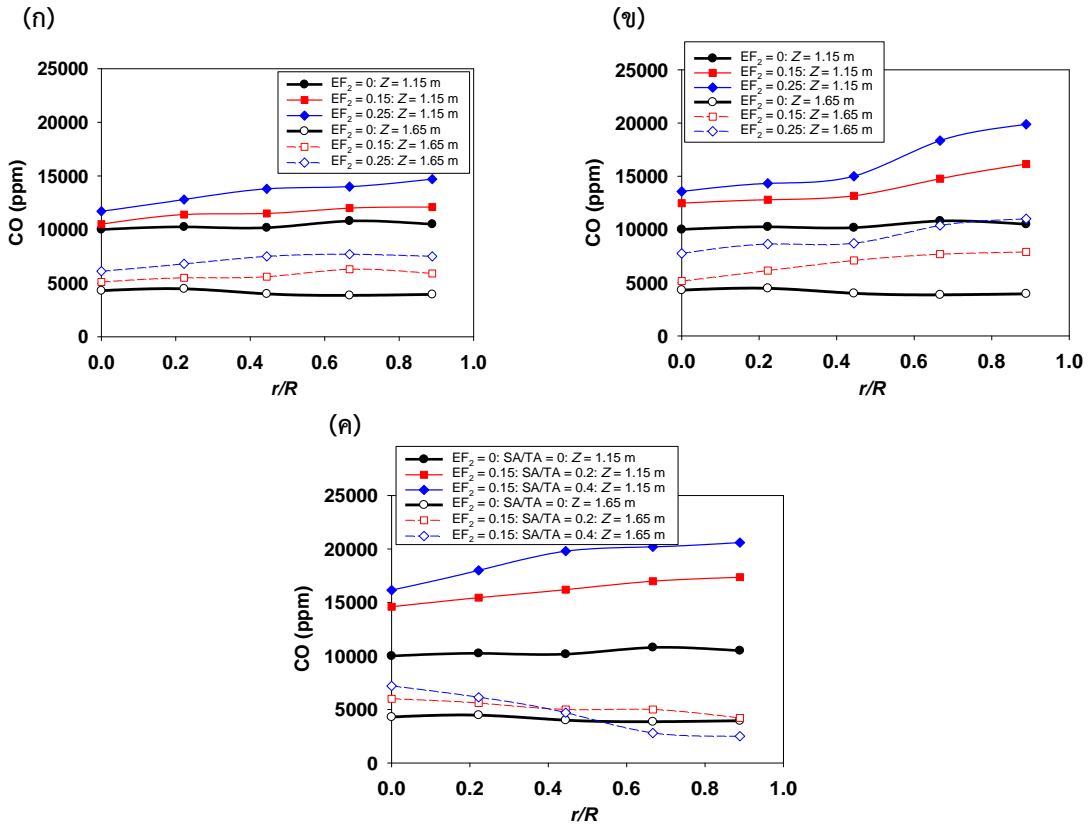
ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นของแก๊สในแนวรัศมีของเตาเผา



ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ (ก) เชื้อเพลิงผสม (ข) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ (ค) การเผาไหม้ซ้ำ โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ที่ระดับความสูง (Z) ต่างกัน



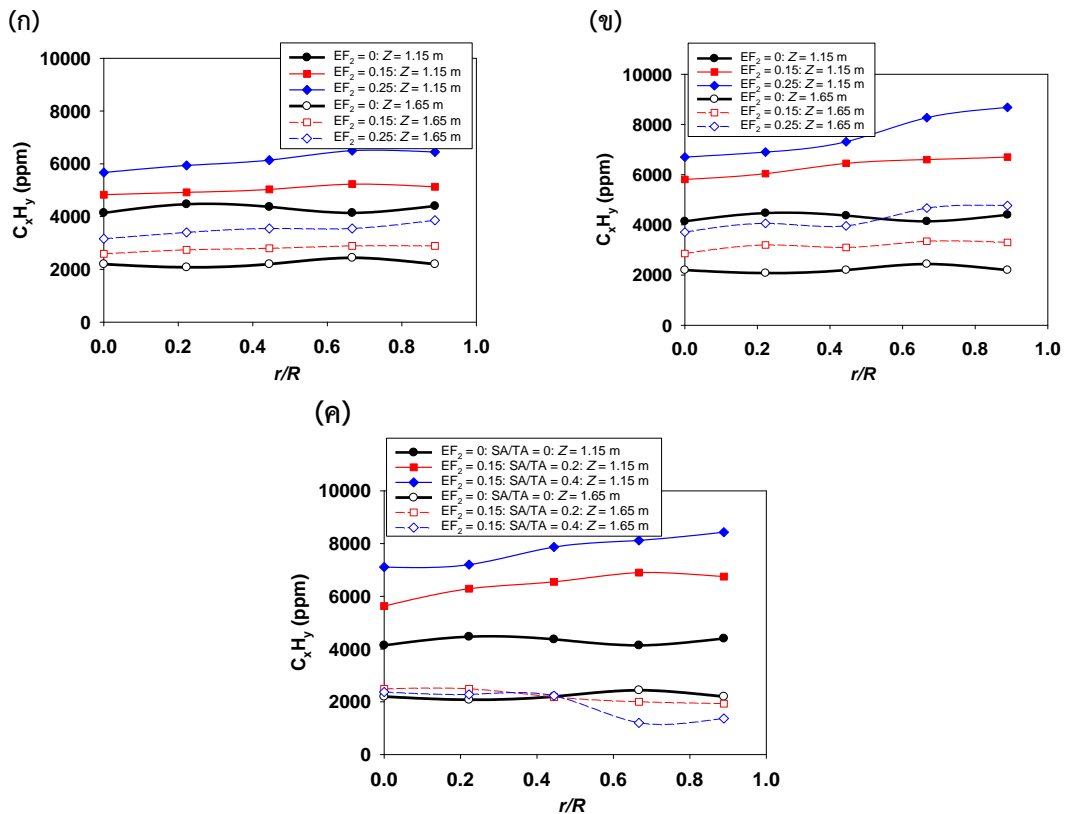
ภาพที่ 4.3 การกระจายตัว O_2 ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ (ก) เชื้อเพลิงผสม (ข) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ (ค) การเผาไหม้ซ้ำ โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ที่ระดับความสูง (Z) ต่างกัน



ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของ CO ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ (ก) เชื้อเพลิงผสม (ข) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ (ค) การเผาไหม้ซ้ำ โดยใช้ EA \approx 40% ที่ระดับความสูง (Z) ต่างกัน

การเผาไหม้ซ้ำ โดยอากาศใช้อากาศส่วนเกินประมาณ 40% วัดตามระดับความสูงต่างกัน จากภาพที่ 4.2 เห็นได้ว่าการกระจายตัวของการทดลองทุกการทดลองมีความสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของเตาเผา บ่งชี้ให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของการเผาไหม้ตามแนวรัศมีของเตาเผา เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเผาไหม้แบบปกติและการเผาไหม้ร่วมจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิในกรณีการเผาไหม้ร่วมจะมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิงร่วม ในกรณีการเผาไหม้ซ้ำ (ดูภาพที่ 4.2 ข) ที่ความสูง $Z = 1.65$ m อุณหภูมิบริเวณขอบเตามีค่าต่ำกว่าตำแหน่งกลางเตา ทั้งนี้เนื่องจากผลของการป้อนอากาศรอง (อากาศเผาไหม้ซ้ำ) ณ ตำแหน่งนี้

ภาพที่ 4.3 แสดงความเข้มข้นของ O_2 ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมแบบใช้เชื้อเพลิงผสมด้วยวิธีการและสภาวะการเผาไหม้เดียวกันกับข้อมูลในภาพที่ 4.2 จากภาพจะเห็นได้ว่าในกรณีการเผาไหม้ด้วยวิปติและ การเผาไหม้ร่วมโดยใช้เชื้อเพลิงผสมและการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น มีการกระจายตัวของ O_2 ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดเตา แต่มีการลดลงเล็กน้อย ณ ตำแหน่งขอบเตา เนื่องจากผลของการกระจายอากาศของหัวจ่ายอากาศและลักษณะทรงกรวยของเตาเผา แต่สำหรับกรณีการเผาไหม้ซ้ำ การกระจายตัวของ O_2 มีลักษณะแตกต่างจากกรณีอื่น จะสังเกตได้ว่า ณ ความสูง 1.15 m ปริมาณความเข้มข้นของ O_2 มีน้อยกว่ากรณีอื่น เนื่องจาก การแบ่งจ่ายอากาศเป็น 2 สาย ทำให้ปริมาณอากาศในส่วนด้านล่างของเตาจะมีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ ณ ตำแหน่ง



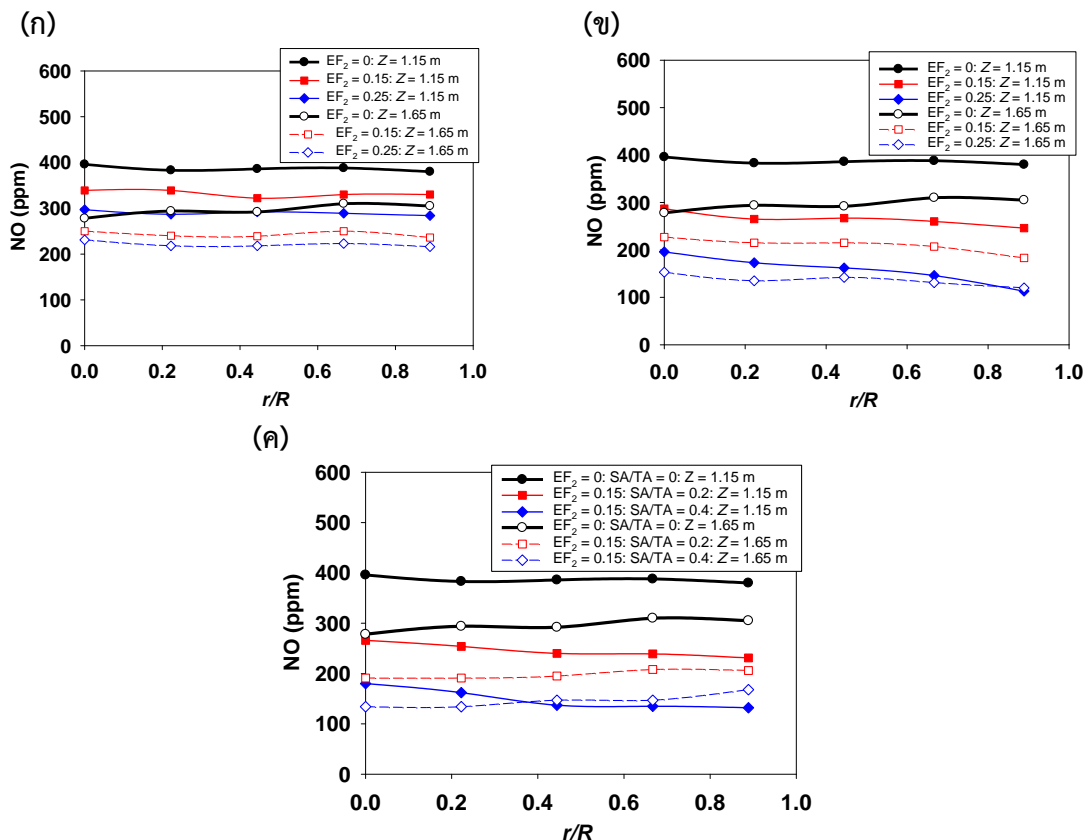
ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของ CO ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ (ก) เชื้อเพลิงผสม (ข) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ (ค) การเผาไหม้ซ้ำ โดยใช้ EA \approx 40% ที่ระดับความสูง (Z) ต่างกัน

ความสูง $Z = 1.65$ จะสังเกตเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ O_2 ณ บริเวณขอบเตาเผา ทั้งนี้เป็นผลมาจากการจ่ายอากาศ ณ ตำแหน่งนี้ ทำให้สามารถวัดค่า O_2 ได้มากกว่ากรณีอื่นๆ

ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ CO ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมแบบใช้เชื้อเพลิงผสมด้วยวิธีการและสภาวะการเผาไหม้เดียวกันกับข้อมูลในภาพที่ 4.2 และ 4.3 จากภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของ CO ในกรณีเผาไหม้ด้วยวิธีการแบบปกติมีค่าสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดเตาแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาที่สม่ำเสมอทั้งหน้าตัดเตา แต่สำหรับการเผาไหม้ร่วม ค่าความเข้มข้นของ CO จะมีค่าสูงกว่ากรณีแบบปกติเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นที่สูงขึ้นของเชื้อเพลิง (มาจากเปลือกไม้ยูคา) และอุณหภูมิที่ต่ำกว่า จากกราฟในภาพที่ 4.4 จะเห็นว่าความเข้มข้นของ CO ของกรณีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นและการเผาไหม้ซ้ำ มีความไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากผลของการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้นและการจ่ายอากาศรอง (ในกรณีเผาไหม้ซ้ำ) จากภาพที่ 4.4 ข จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของ CO ณ ตำแหน่งขอบเตามีค่าสูงกว่าบริเวณกลางเตา โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตำแหน่งความสูง $Z = 1.15$ m เป็นผลมาจากการป้อนเชื้อเพลิงรองในแนวสัมผัส (tangential) ของเตา สำหรับกรณีการเผาไหม้ซ้ำ (ดูภาพที่ 4.4 ค) ณ ตำแหน่งความสูง $Z = 1.15$ m ความเข้มข้นของ CO บริเวณขอบจะมีสูงกว่าบริเวณกลางเตา เป็นมาจากการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น ในขณะที่ตำแหน่งความสูง $Z = 1.65$ m ความเข้มข้นของ CO บริเวณขอบเตามีค่าต่ำกว่าบริเวณกลางเตา สามารถอธิบายได้โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณ O_2 ณ ตำแหน่งนี้ เนื่องจากการป้อนอากาศเผาไหม้ซ้ำเข้าเตาเผาในแนวสัมผัสขอบเตา

ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ C_xH_y ที่วัดในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมแบบใช้เชื้อเพลิงผสมด้วยวิธีการและสภาวะการเผาไหม้เดียวกันกับข้อมูลในภาพที่ 4.2 ถึง 4.4 จากภาพ จะสังเกตเห็นว่าลักษณะการกระจายตัวของ C_xH_y ในภาพที่ 4.5 มีลักษณะคล้ายกับของ CO ในภาพที่ 4.4 เนื่องจากการก่อตัว C_xH_y และ CO มีลักษณะคล้ายกัน (อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อที่ 4.2) ดังนั้นพฤติกรรมของ C_xH_y สามารถอธิบายได้ในทางเดียวกันกับ CO

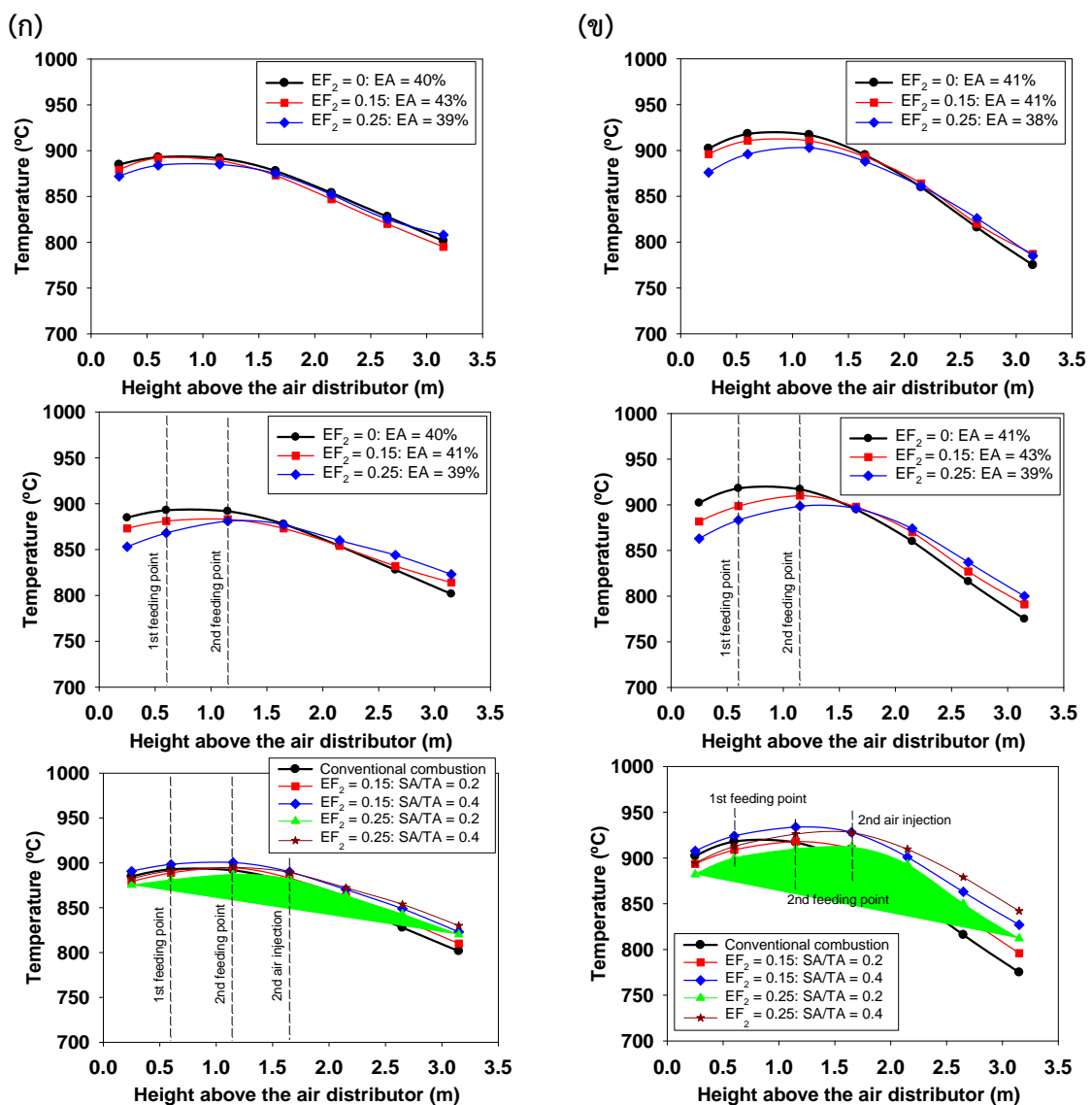
ภาพที่ 4.6 แสดงความเข้มข้นของ NO ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมแบบใช้เชื้อเพลิงผสมด้วยวิธีการและสภาวะการเผาไหม้เดียวกันกับข้อมูลในภาพที่ 4.2 ถึง 4.5 จากภาพจะสังเกตเห็นว่าการกระจายตัวของ NO จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับ CO และ C_xH_y กล่าวคือ จะมีความเข้มข้นสูงสุด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางเตาแล้วต่ำลงเรื่อยๆ ตามแนวรัศมี เนื่องจาก CO และ C_xH_y ทำปฏิกิริยากับ NO แล้วได้ N_2 ทำให้ NO ณ ตำแหน่งที่ CO และ C_xH_y สูงมีค่าต่ำ



ภาพที่ 4.6 ความเข้มข้นของ NO (แสดงแทน NO_x) ในแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR และ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมต่างกัน (ก) เชื้อเพลิงผสม (ข) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น และ (ค) การเผาไหม้ซ้ำ โดยใช้ EA ≈ 40% ที่ระดับความสูง (Z) ต่างกัน

4.2 พฤติกรรมการเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไคซ์เบด

ภาพที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ที่อัตราส่วนพลังงานรอก $EF_2 = 0.15$ และ $EF_2 = 0.25$ ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมแตกต่างกัน ใช้อากาศส่วนเกินคงที่ประมาณ 40% โดยทำการวัด ณ ตำแหน่งแกนกลางของเตา ตลอดความสูงของเตา จากกราฟในภาพ 4.1 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของทุกการทดลองมีลักษณะคล้ายกัน คือ มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในส่วนทรงกรวยของเตาเผา (ความสูงต่ำกว่า 0.9 m) จากนั้นค่อยๆ ลดลงตามระดับความสูงของเตา เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีการเผาไหม้แบบปกติ ($EF_2 = 0$)



ภาพที่ 4.7 อุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (วัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดเตา $r_1 = 0$) เมื่อเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ด้วยวิธีการใช้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และ การเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ณ ตำแหน่งความสูง Z ต่างกัน

และกรณีเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงผสม พบว่า อุณหภูมิของกรณีเผาไหม้ด้วยวิธีการปกติในส่วนทรงกรวยของเตาเผามีค่าสูงกว่ากรณีเผาไหม้ร่วม ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อเพลิงหลัก PCR และ PRH ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความหนาแน่นและน้ำหนักค่อนข้างสูงจึงทำให้เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ร่วงลงและเกิดการผสม (mixing) กับทราย (เบต) ที่บริเวณส่วนล่างของเตาและการเผาไหม้ก็เกิดขึ้นอย่างรุนแรงที่บริเวณนี้ นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม ยังทำให้ความชื้นรวมของเชื้อเพลิงผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิในส่วนกรวยมีค่าต่ำลงเช่นกัน อย่างไรก็ตาม จะสังเกตได้ว่า ในส่วนทรงกระบอกของเตาเผา ($Z > 0.9$ m) อุณหภูมิของการเผาไหม้ทั้ง 2 กรณีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อเพลิงรองที่มีความหนาแน่น ขนาด และน้ำหนักต่ำกว่าเชื้อเพลิงหลักถูกยกตัวขึ้นมาจากเบตโดยอากาศที่เป่าเข้าเตาจากด้านล่าง และเชื้อเพลิงเหล่านี้ถูกเผาไหม้ที่ระยะสูงขึ้นไปในส่วนทรงกระบอกนี้มีการลดลงของอุณหภูมิทุกการทดลองเนื่องจากการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา

ในกรณีการเผาไหม้ด้วยการป้อนเชื้อเพลิงต่างระดับ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเชื้อเพลิงรองในการเผาไหม้พบว่า บริเวณทรงกรวยของเตาอุณหภูมิมีอุณหภูมิลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเผาไหม้ด้วยวิธีการปกติ เนื่องจากปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าส่วนทรงกรวย (เชื้อเพลิงหลัก) ของเตาลดลงและเป็นผลทำให้อากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ณ ตำแหน่งของการป้อนเชื้อเพลิงรอง มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื่องจากมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงรองในตำแหน่งดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเผาไหม้ปกติกับ จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิในส่วนทรงกระบอกของเตาเผามีค่าสูงกว่า เนื่องจากผลของการป้อนเชื้อเพลิงรองทำให้เชื้อเพลิงบางรอนส่วนถูกอากาศเผาไหม้ยกตัวขึ้นไปเผาไหม้ในส่วนทรงกระบอก

สำหรับการกรณีการเผาไหม้ซ้ำ จะสังเกตเห็นได้ว่า อุณหภูมิในส่วนทรงกรวยของเตาเผา มีค่าใกล้เคียงกันกับการเผาไหม้ด้วยวิธีการแบบปกติ แม้ว่าจะมีการป้อนความร้อนจากเชื้อเพลิงหลักที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเผาไหม้ซ้ำมีการแบ่งการจ่ายอากาศเป็น 2 ส่วน ทำให้อากาศส่วนเกินในส่วนทรงกรวยลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ใช้อากาศรอง $SA/TA = 0.4$ ซึ่งเป็นผลทำให้อุณหภูมิในส่วนทรงกรวยของเตาเผา มีค่าสูงกว่าการเผาไหม้ด้วยวิธีการปกติ จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่งที่มีการจ่ายอากาศเผาไหม้ซ้ำ ($Z = 1.65$ m) มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เป็นผลมาจากการเผาไหม้ซ้ำของสารที่เผาไหม้ได้ที่มาจากเชื้อเพลิงรอง โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีการใช้เชื้อเพลิงรอง $EF_2 = 0.25$

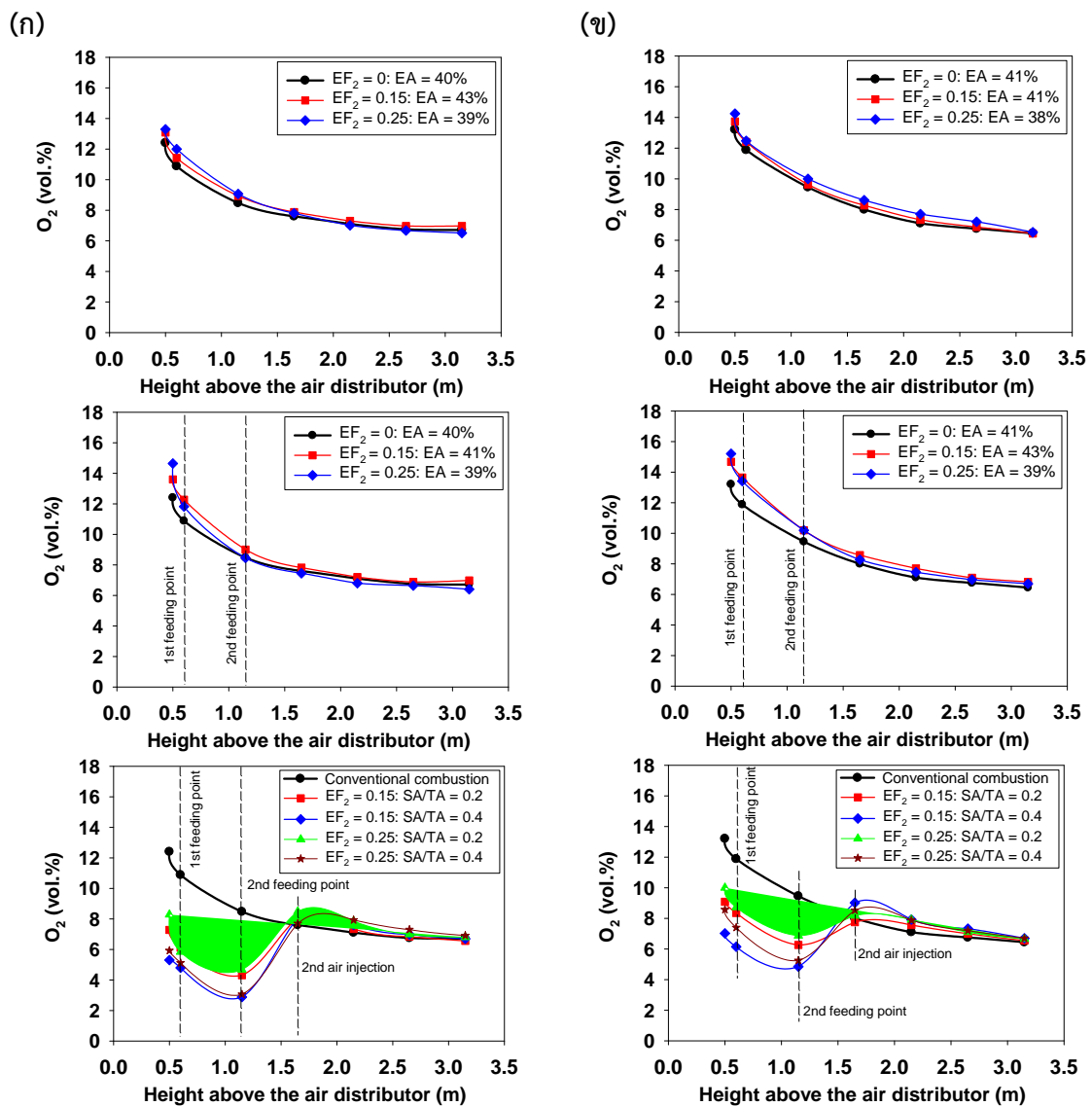
เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการเผาไหม้กรณีใช้ PCR และ PRH เป็นเชื้อเพลิงหลักพบว่า อุณหภูมิกรณีที่ใช้ PRH เป็นเชื้อเพลิงหลักสูงกว่ากรณี PCR เล็กน้อย แม้ว่าค่า LHV ของเชื้อเพลิงทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 15 MJ/kg (ดูตารางที่ 3.1) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความหนาแน่นที่มากกว่าของ PRH ทำให้เชื้อเพลิงส่วนใหญ่เกิดการเผาไหม้บริเวณกรวยและเกิดการสูญเสียความร้อนน้อยกว่าในบริเวณส่วนทรงกระบอก นอกจากนี้เชื้อเพลิงรองที่ใช้ MRH มีค่าความชื้น ($W = 29.56\%$) มีค่าต่ำกว่า EU ($W = 52.65\%$) มาก ทำให้ความชื้นรวมในเตาเผาของเชื้อเพลิงมีค่าต่ำกว่า จึงเป็นผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผากรณีใช้ PRH เป็นเชื้อเพลิงหลักมีค่าสูงกว่า

ภาพที่ 4.8 แสดงปริมาณ O_2 ในเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ที่สภาวะการทำงานเดียวกันกับข้อมูลในภาพที่ 4.7 จากภาพที่ 4.8 เห็นได้ว่าการกระจายตัว

ของออกซิเจนภายในเตาในกรณีการเผาไหม้ด้วยวิธีการปกติมีแนวโน้มลดลงตลอดความสูงของเตาเนื่องจากออกซิเจนถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการเผาไหม้ จะสังเกตได้ว่า การลดลงของออกซิเจนในส่วนทรงกรวยเกิดมีอัตราสูงกว่าส่วนทรงกระบอกของเตา เนื่องจากการเผาไหม้เกิดขึ้นในส่วนทรงกรวยเป็นหลัก ดังสังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนทรงกระบอก ซึ่งมีความสอดคล้องกับลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ

จากกราฟในภาพที่ 4.8 การกระจายตัวของ O_2 ตลอดความสูงของเตามีลักษณะคล้ายกันกับกรณีการเผาไหม้ด้วยวิธีการปกติ บ่งบอกถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้และการใช้ O_2 ที่เหมือนกันของ 2 กรณี

สำหรับกรณีการเผาไหม้แบบจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นพบว่า O_2 ในส่วนทรงกรวยของเตามีปริมาณมากกว่าการเผาไหม้ด้วยวิธีปกติ โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มสัดส่วนเชื้อเพลิงรอง เป็นเพราะการจ่ายเชื้อเพลิงหลักที่น้อยลงทำให้ปริมาณอากาศส่วนเกินในส่วนทรงกรวยเพิ่มมากขึ้น

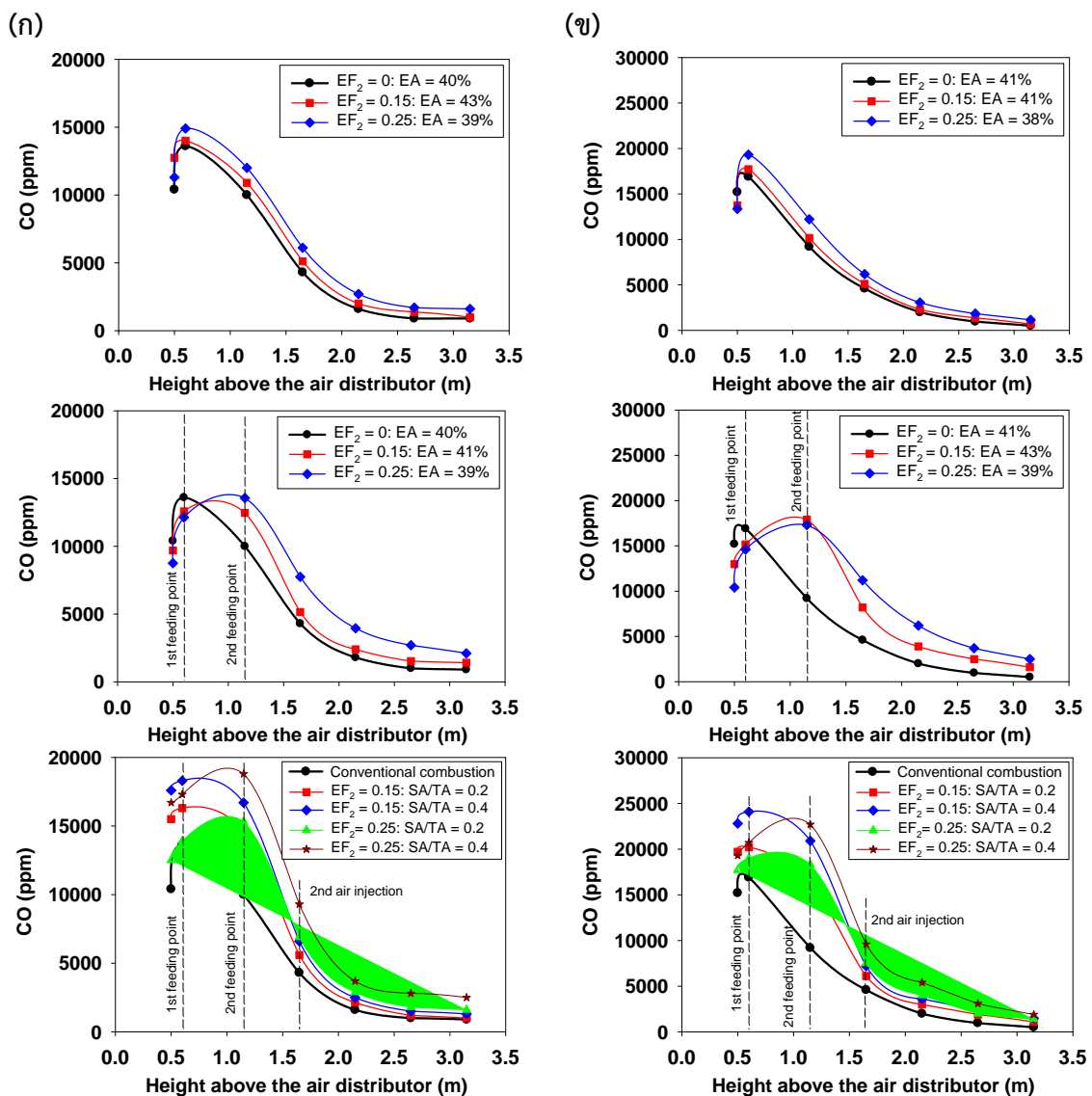


ภาพที่ 4.8 ปริมาณ O_2 ในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด (วัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดเตา $r_1 = 0$) เมื่อเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ด้วยวิธีการใช้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และ การเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) โดยใช้ EA \approx 40% ณ ตำแหน่งความสูง Z ต่างกัน

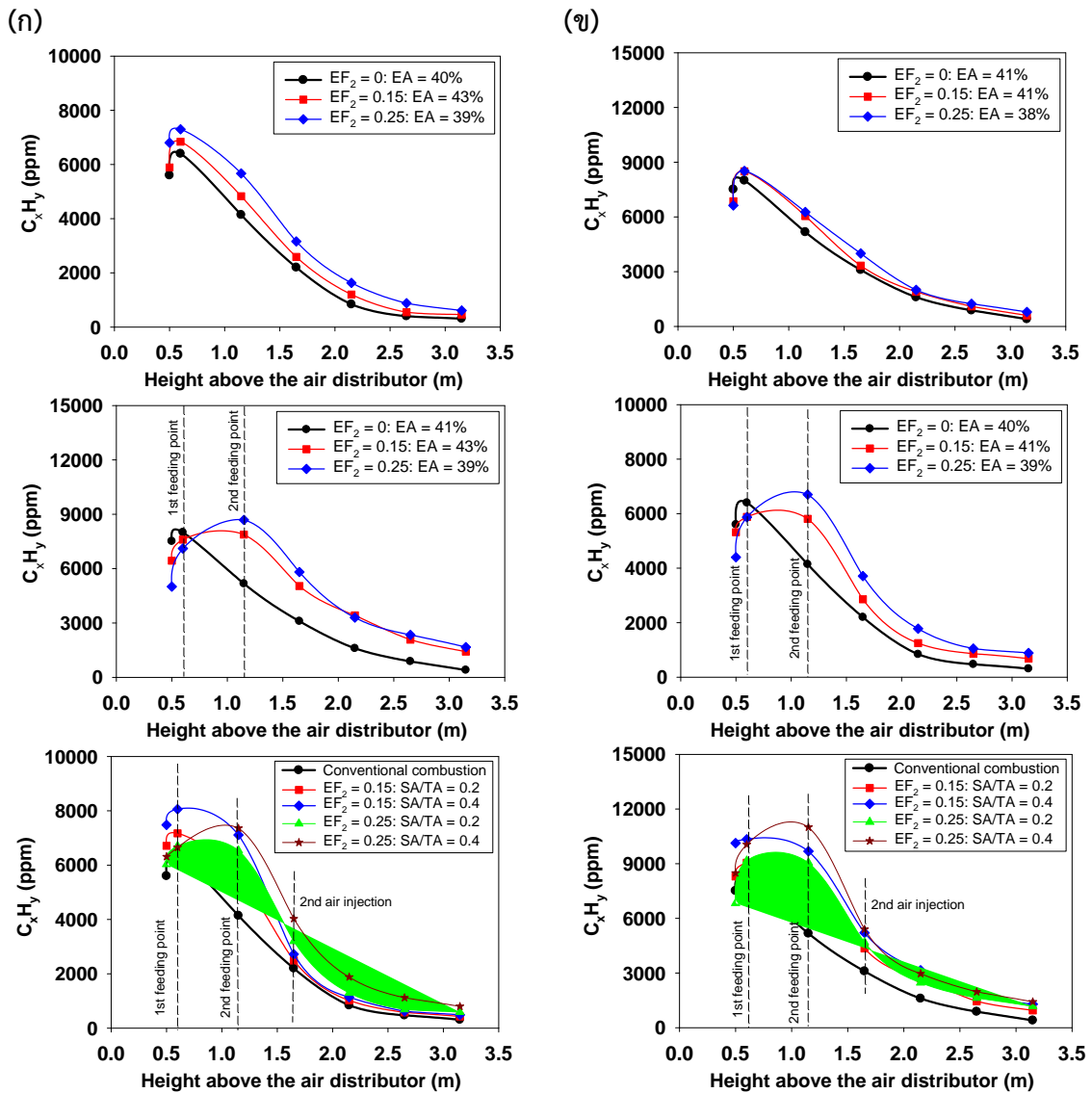
จากการศึกษาสำหรับการเผาไหม้ซ้ำ พบว่าพฤติกรรมกระจายตัวของ O_2 มีลักษณะแตกต่างจากกรณีอื่น โดยพบว่า ในส่วนทรงกรวยของเตาเผาที่มีปริมาณ O_2 ต่ำกว่ากรณีอื่นๆ มาก เนื่องจากการจ่ายอากาศที่ลดลงในส่วน อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณ O_2 จนเท่ากับกรณีอื่นๆ ในส่วนทรงกระบอกที่ตำแหน่งการจ่ายอากาศเผาไหม้ซ้ำ

4.3 การก่อดัวและออกซิเดชันของ CO และ C_xH_y ภายในเตาฟลูอิดซ์เบด

ภาพที่ 4.9 แสดงการกระจายตัวของ CO ภายในเตาเผาตามแนวความสูง เมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ที่สภาวะการทำงานและวิธีการเผาไหม้เช่นเดียวกับข้อมูลในภาพที่ 4.7 และ 4.8 จากการกระจายตัวของ CO ในภาพที่ 4.9 ทำให้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงตามระดับความสูงของเตาเผา บ่งชี้ถึงการก่อดัว (formation) ออกซิเดชัน (oxidation) ของ CO ภายใน



ภาพที่ 4.9 ความเข้มข้นของ CO ในเตาเผาฟลูอิดซ์เบด (วัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดเตา $r_1 = 0$) เมื่อเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ด้วยวิธีการใช้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และ การเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) โดยใช้ EA \approx 40% ณ ตำแหน่งความสูง (Z) ต่างกัน



ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นของ C_xH_y ในเตาเผาฟลูอิดซ์เบด (วัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดเตา $r_1 = 0$) เมื่อเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ด้วยวิธีการใช้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และ การเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) โดยใช้ $EA \approx 40\%$ ณ ตำแหน่งความสูง Z ต่างกัน

เตาเผา กรณีการเผาไหม้ด้วยวิธีการปกติและการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม ในช่วงแรก ($Z < 0.6$ m) เป็นช่วงที่อยู่ต่ำกว่าตำแหน่งการป้อนเชื้อเพลิง ความเข้มข้นของ CO ในภาพที่ 4.2ก มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงสุดที่ 0.6 m เนื่องจากการปล่อยสารระเหย (devolatilization) ของเชื้อเพลิงและออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) และคาร์บอนในถ่าน (Char-C) อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วนของเชื้อเพลิงรองในเชื้อเพลิงผสมมีมากขึ้น ความเข้มข้นของ CO ที่ตำแหน่ง 0.6 m มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเผาไหม้แบบปกติ เป็นเพราะกลับขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดลง ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สำหรับในส่วนทรงกระบอกของเตาเผา ($Z > 0.6$ m) ความเข้มข้นของ CO มีการลดลงอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความสูงระหว่าง 0.6 ถึง 0.8 m การลดลงของ CO สามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง CO กับ O และไอน้ำ (Turns, 2006)

กรณีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น พบว่า ในส่วนทรงกรวยของเตาเผา ความเข้มข้นของ CO มีค่าต่ำกว่ากรณีการเผาไหม้ปกติ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอากาศส่วนเกินดังที่ได้อธิบายไปแล้ว อย่างไรก็ตามเมื่อมีการป้อนเชื้อเพลิงรอง จะเห็นได้ว่าความเข้มข้น CO ณ ตำแหน่ง $Z = 1.65$ m มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ตามสัดส่วนเชื้อเพลิงรองที่เพิ่มขึ้น แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า CO มีการลดลงเรื่อยๆ ตามระดับความสูงของเตาเผา เนื่องจากปฏิกิริยาการออกซิเดชันของ CO เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเผาไหม้ปกติพบว่าค่า CO ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมในส่วนทรงกรวยของเตาเผา มีค่าสูงกว่าเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

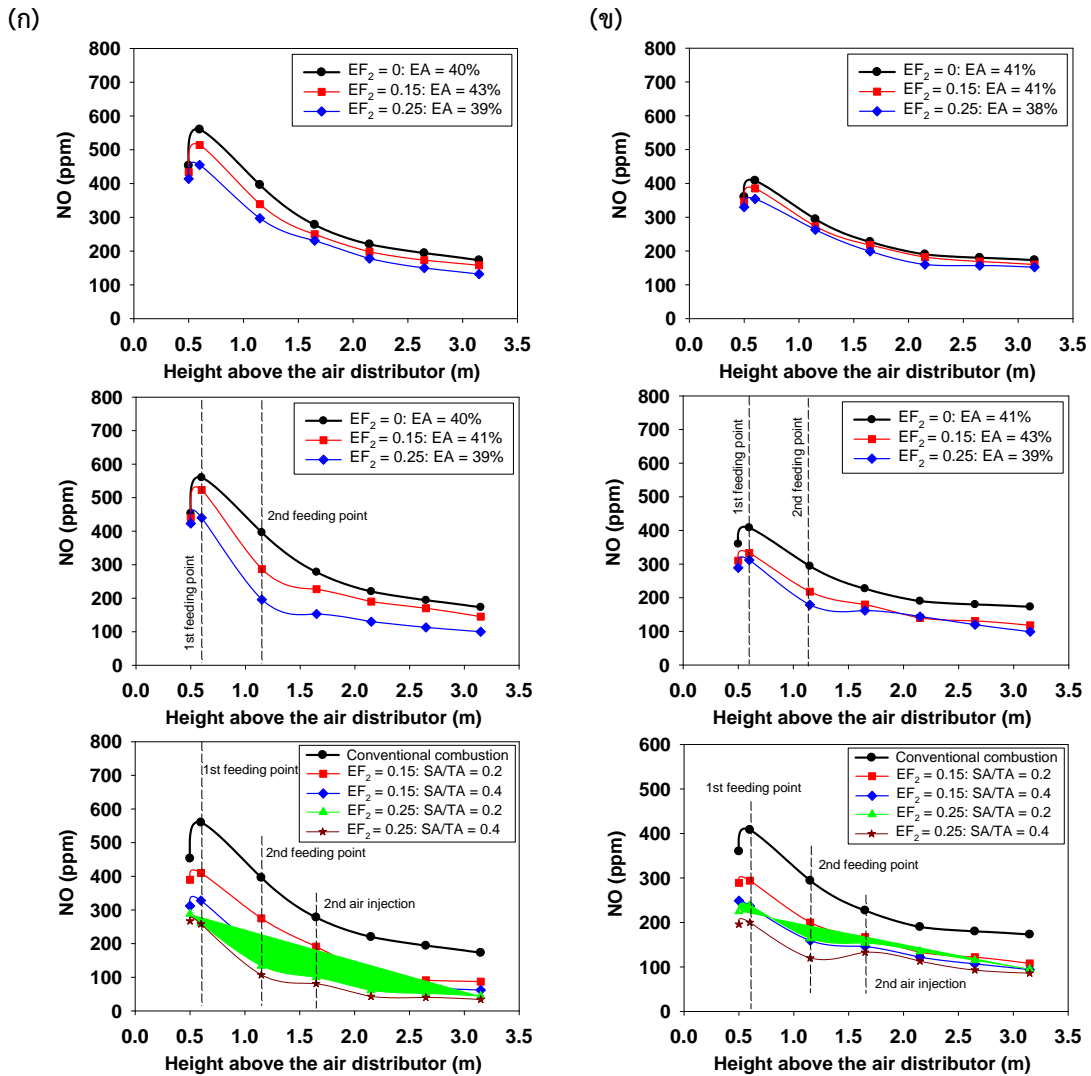
สำหรับกรณีการเผาไหม้ซ้ำ จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของ CO ในช่วงทรงกรวยจะมีค่าสูงกว่ากรณีการเผาไหม้ด้วยวิธีปกติเนื่องจากการจ่ายปริมาณอากาศที่ลดลง แม้ว่าจะมีการลดลงของการป้อนเชื้อเพลิงหลัก และจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อมีการเพิ่มค่า EF_2 และ SA/TA มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของ CO ลดลงเป็นอย่างมาก ณ ตำแหน่งจ่ายอากาศรอง ทำให้เกิดการเผาไหม้ซ้ำของสารเผาไหม้ได้

ภาพที่ 4.10 แสดงความเข้มข้นของ C_xH_y ในเตาฟลูอิดไธด์เบตตามระดับความสูงของเตาเผา เมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR กับ EB และ PRH กับ MRH ด้วยวิธีการเผาไหม้และสภาวะการเผาไหม้เดียวกับกับข้อมูลในภาพที่ 4.7 ถึง 4.9 จากภาพที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า แนวโน้มของ C_xH_y ทุกตำแหน่งความสูงของเตา มีลักษณะคล้ายกับ CO เนื่องจากโดยปกติแล้วแหล่งกำเนิดของ C_xH_y จะมาจากสารระเหยในเชื้อเพลิงและการลดลงของ C_xH_y เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีต่อเนื่อง คือปฏิกิริยาออกซิเดชันของ C_xH_y เป็น CO จากนั้น CO จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็น CO_2 (Turns, 2006) การเพิ่มสัดส่วนแก๊สขึ้นทำให้ความเข้มข้นของ C_xH_y ทุกตำแหน่งความสูงมีมากขึ้น เนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลดความเข้มข้นของ NO (อภิปรายละเอียดในหัวข้อถัดไป)

4.4 การก่อตัวและการลดลงของ NO ภายในเตาฟลูอิดไธด์เบต

ภาพที่ 4.11 แสดงความเข้มข้นของ NO ในเตาฟลูอิดไธด์เบตตามระดับความสูงของเตาเผา เมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR กับ EB และ PRH กับ MRH ด้วยวิธีการเผาไหม้และสภาวะการเผาไหม้เดียวกับกับข้อมูลในภาพที่ 4.7 ถึง 4.0 จากภาพที่ 4.11 การกระจายตัวของ NO มีลักษณะเช่นเดียวกันเช่นเดียวกันกับ CO และ C_xH_y และสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ตามลักษณะการกระจายตัวของ แสดงถึงช่วงก่อตัว (formation) และ การลด (reduction) ของ NO จากกราฟในภาพที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของ NO ภายในเตาของกรณีการเผาไหม้ด้วยวิธีปกติที่ทุกระดับความสูงมีค่าสูงกว่ากรณีอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าวิธีการเผาไหม้ร่วมที่เสนอในการวิจัยนี้ มีศักยภาพในการลดการก่อตัวของ NO ได้ จากภาพที่ 4.11 เห็นได้ว่าความเข้มข้นของ NO มีการเพิ่มขึ้นในช่วงแรก ($Z < 0.6$ m) เนื่องจากการปล่อยสารระเหยของชีวมวลและการออกซิเดชันของสารระเหยที่มีไนโตรเจน N เป็นส่วนประกอบ เช่น HCN NH_3 และกลายเป็น NO ในที่สุด (Werther et al., 2000; Winter et al., 1999) แต่อย่างไรก็ตาม NO ที่เกิดขึ้นบางส่วนก็ถูกสลายพันธะเนื่องจากปฏิกิริยาคาตาลิติก (catalytic reaction) ระหว่าง NO กับ CO C_xH_y ถ่าน และ เถ้า

สำหรับการเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงผสมพบว่ามีค่าความเข้มข้นของ NO ภายในเตาเผา มีค่าต่ำกว่ากรณีการเผาไหม้แบบปกติเนื่องจากปริมาณของ CO และ C_xH_y ในตำแหน่งต่างๆ ของเตาเผาที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.11 ความเข้มข้นของ NO ในเตาเผาฟลูอิดซ์เบด (วัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดเตา $r_1 = 0$) เมื่อเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR และ EB และ (ข) PRH และ MRH ด้วยวิธีการใช้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และ การเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง) โดยใช้ EA \approx 40% ณ ตำแหน่งความสูง (Z) ต่างกัน

เมื่อใช้การเผาไหม้แบบจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้น พบว่าในส่วนทรงกรวยของเตาเผา ความเข้มข้นของ NO มีค่าลดลงเป็นอย่างมากตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของเชื้อเพลิงรอง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ CO และ C_xH_y ในส่วนทรงกรวย นอกจากนี้จะสังเกตเห็นในกราฟของ NO ว่ามีการลดลงของ NO อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเพิ่มสัดส่วนเชื้อเพลิงรองเป็น $EF_2 = 0.25$ ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มขึ้นของ CO และ C_xH_y ในปฏิกิริยา catalytic reduction

ในกรณีการเผาไหม้ซ้ำพบว่า NO ในส่วนทรงกรวยมีค่าต่ำกว่าการเผาไหม้ด้วยกรณีอื่นเป็นอย่างมากเนื่องจากค่า CO และ C_xH_y ที่มากกว่ากรณีอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10 เมื่อเพิ่ม SA/TA จะเห็นได้ว่า NO มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการจ่ายอากาศรองเพื่อเผาไหม้ซ้ำที่

ตำแหน่ง $Z = 1.65$ m พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของ NO เนื่องจากอากาศที่นำเข้าไปเผาไหม้ซ้ำทำให้ CO และ C_xH_y ลดลงทำให้ NO เพิ่มขึ้น

4.5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดซ์เบด

ตารางที่ 4.1 และ 4.2 ค่าความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR กับ EB และ PRH กับ MRH โดยทำการทดสอบที่อัตราอากาศส่วนเกินตั้งแต่ประมาณ 20% ถึง 40% และสัดส่วนพลังงานจากเชื้อเพลิงรอง 0.15 และ 0.25 และมีการใช้อัตราส่วนอากาศรองต่ออากาศหลัก $SA/TA = 0.2$ และ 0.4 (ใช้เฉพาะกรณีการเผาไหม้ร่วม) จากตารางพบว่า ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนไม่เผาไหม้และการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเป็นอย่างมาก จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบที่อากาศส่วนเกินเท่ากัน ประสิทธิภาพการเผาของเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมทุกวิธีมีค่าต่ำกว่าการเผาไหม้แบบปกติ เป็นผลมาจากการปล่อยมลพิษ CO และ C_xH_y ที่มากกว่าการเผาไหม้กรณีปกติ ทำให้ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มอากาศส่วนเกินสามารถลดการสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้ แต่มีผลค่อนข้างน้อยต่อความร้อนสูญเสียจากคาร์บอนไม่เผาไหม้ อย่างไรก็ตามจากข้อมูลในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาฟลูอิดซ์เบดที่ทำการเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงและวิธีการที่นำเสนอมีค่าค่อนข้างสูงประมาณ 97.1 %– 99.7%

ตารางที่ 4.1 ความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดที่เผาไหม้ร่วม PCR กับ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วม 3 วิธี ที่สภาวะการทำงานแตกต่างกัน

สัดส่วน พลังงาน เชื้อเพลิง รอง (EF ₂)	สัดส่วน อากาศ ต่ออากาศ หลัก (SA/TA)	อากาศ ส่วนเกิน (vol.%)	O ₂ (%)	วัดที่ปล่อยไอเสีย CO (ppm)	C _x H _y (ppm) คาร์บอน ที่ไม่เผา ไหม้ใน เถ้า (wt.%)	คาร์บอน ไม่เผาไหม้ การเผาไหม้ ไม่สมบูรณ์	ความร้อนสูญเสีย เนื่องจาก (%)	ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (%)	
การเผาไหม้แห้งมันสำปะหลังแห้งด้วยวิธีปกติ									
0	0	19	3.6	1360	770	3.30	1.19	1.16	98.0
		40	6.1	610	360	1.96	0.45	0.64	98.9
		60	8.0	230	132	2.30	0.53	0.27	99.2
		83	9.5	160	50	3.25	0.76	0.16	99.1
การเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงผสมแห้งมันสำปะหลังและเปลือกไม้ยูคาลิปตัส									
0.15	0	19	3.6	1790	930	1.00	0.13	1.41	98.4
		43	6.4	750	403	0.90	0.12	0.73	99.2
		56	7.6	420	194	0.87	0.11	0.41	99.5
		80	9.4	190	74	0.93	0.12	0.19	99.7
0.25	0	20	3.8	2330	993	1.01	0.16	1.59	98.2
		39	6.1	1080	550	1.08	0.17	0.95	98.9
		56	7.7	600	262	0.89	0.14	0.54	99.3
		80	9.4	400	148	0.81	0.13	0.38	99.5
การเผาไหม้ร่วมแห้งมันสำปะหลังและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น									
0.15	0	20	3.8	2370	1157	0.72	0.09	1.82	98.1
		41	6.2	900	549	1.14	0.15	0.93	98.9
		57	7.7	390	260	0.92	0.12	0.48	99.4
		76	9.1	240	108	0.78	0.10	0.26	99.6
0.25	0	18	3.7	3690	1686	2.14	0.34	2.54	97.1
		39	6.1	1750	833	1.57	0.25	1.47	98.3
		59	7.9	740	451	2.17	0.34	0.82	98.8
		80	9.4	530	300	1.42	0.22	0.64	99.1
การเผาไหม้ร่วมแห้งมันสำปะหลังและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ									
0.15	0.2	20	3.8	1840	1080	7.42	1.05	1.51	97.4
		38	5.9	910	561	2.78	0.37	0.91	98.7
		60	7.9	410	187	2.88	0.39	0.40	99.2
		78	9.3	210	80	2.07	0.28	0.21	99.5
	0.4	20	3.8	2060	1080	3.33	0.45	1.62	97.9
		41	6.3	910	530	3.39	0.46	0.90	98.6
		59	7.9	450	220	2.73	0.37	0.46	99.2
		78	9.2	190	70	3.03	0.41	0.18	99.4
0.25	0.2	19	3.8	2430	1289	2.63	0.42	1.85	97.7
		40	6.2	1150	600	2.81	0.45	1.02	98.5
		62	8.1	510	243	2.79	0.44	0.49	99.1
		81	9.4	250	80	2.89	0.46	0.22	99.3
	0.4	19	3.9	3170	1710	2.76	0.44	2.43	97.1
		39	6.1	1660	860	3.45	0.55	1.44	98.0
		59	7.9	880	462	3.69	0.59	0.88	98.5
		77	9.2	500	276	2.57	0.41	0.58	99.0

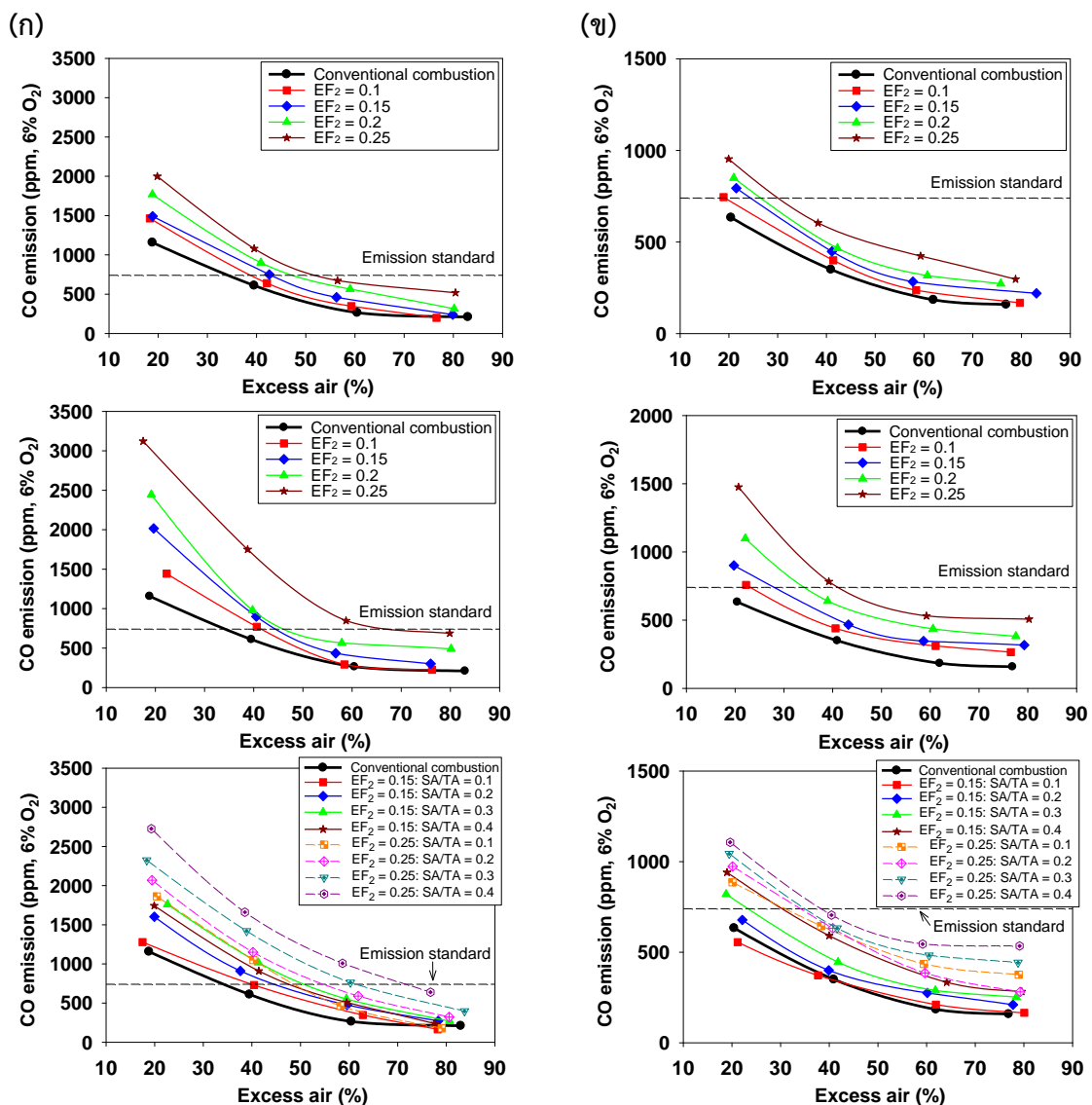
ตารางที่ 4.2 ความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดที่เผาไหม้ร่วม PRH กับ MRH ด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วม 3 วิธี ที่สภาวะการทำงานแตกต่างกัน

สัดส่วน พลังงาน เชื้อเพลิง รอง (EF ₂)	สัดส่วน ต่ออากาศ หลัก (SA/TA)	อากาศ ส่วนเกิน (vol.%)	O ₂ (%)	วัดที่ปล่องไอเสีย CO (ppm)	C _x H _y (ppm)	คาร์บอน ที่ไม่เผา ไหม้ใน เถ้า (wt.%)	คาร์บอน ไม่เผาไหม้ การเผาไหม้ ไม่สมบูรณ์	ความร้อนสูญเสีย เนื่องจาก (%)	ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (%)
การเผาไหม้แกลบอัดแห้งด้วยวิธีปกติ									
0	0	21	3.7	742	440	3.63	0.81	0.82	98.4
		41	6.2	350	174	3.15	0.70	0.41	98.9
		62	8.1	160	53	2.09	0.46	0.17	99.4
		77	9.1	126	37	1.98	0.44	0.14	99.4
การเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงผสมแกลบอัดแห้งและแกลบชื้น									
0.15	0	22	3.9	923	580	1.62	0.41	1.06	98.5
		41	6.2	448	233	1.59	0.40	0.53	99.1
		58	7.7	253	107	1.77	0.45	0.30	99.3
		83	9.6	169	65	1.52	0.38	0.22	99.4
0.25	0	20	3.7	1100	720	1.28	0.35	1.27	98.4
		38	5.9	604	340	1.55	0.43	0.73	98.8
		59	7.9	367	172	1.09	0.30	0.46	99.2
		79	9.3	229	126	1.07	0.29	0.35	99.4
การเผาไหม้ร่วมแกลบอัดแห้งและแกลบชื้นด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น									
0.15	0	20	3.7	1080	668	2.12	0.54	1.45	98.0
		43	6.4	467	242	2.49	0.64	0.56	98.8
		59	7.8	313	160	2.51	0.64	0.37	99.0
		79	9.3	253	107	2.30	0.59	0.27	99.1
0.25	0	20	3.7	1704	817	2.09	0.78	1.51	97.7
		39	6.0	783	380	1.96	0.63	0.76	98.6
		59	7.9	464	232	2.13	0.65	0.44	98.9
		80	9.4	391	206	2.33	0.61	0.35	99.0
การเผาไหม้ร่วมแกลบอัดแห้งและแกลบชื้นด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ									
0.15	0.2	22	3.9	778	352	1.94	0.49	0.74	98.8
		40	6.0	400	160	2.17	0.55	0.41	99.0
		60	7.9	240	60	2.05	0.52	0.22	99.3
		78	9.2	165	30	2.44	0.62	0.15	99.2
	0.4	19	3.5	1108	569	2.27	0.58	1.05	98.4
		40	6.1	591	262	2.50	0.64	0.60	98.8
		64	8.2	284	100	2.68	0.69	0.30	99.0
		80	9.3	220	77	1.81	0.46	0.26	99.3
0.25	0.2	20	3.7	1142	537	2.57	0.72	1.13	98.2
		41	6.2	632	225	2.35	0.65	0.63	98.7
		60	7.9	339	100	3.33	0.94	0.35	98.7
		79	9.3	220	82	2.89	0.81	0.28	98.9
	0.4	20	3.7	1300	844	2.47	0.69	1.48	97.8
		40	6.2	705	384	2.74	0.77	0.85	98.4
		59	7.9	480	237	3.26	0.92	0.62	98.5
		79	9.3	418	220	2.15	0.60	0.63	98.8

4.6 ผลกระทบของวิธีการเผาไหม้ต่อการปล่อยมลพิษของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

4.6.1 การปลดปล่อย CO

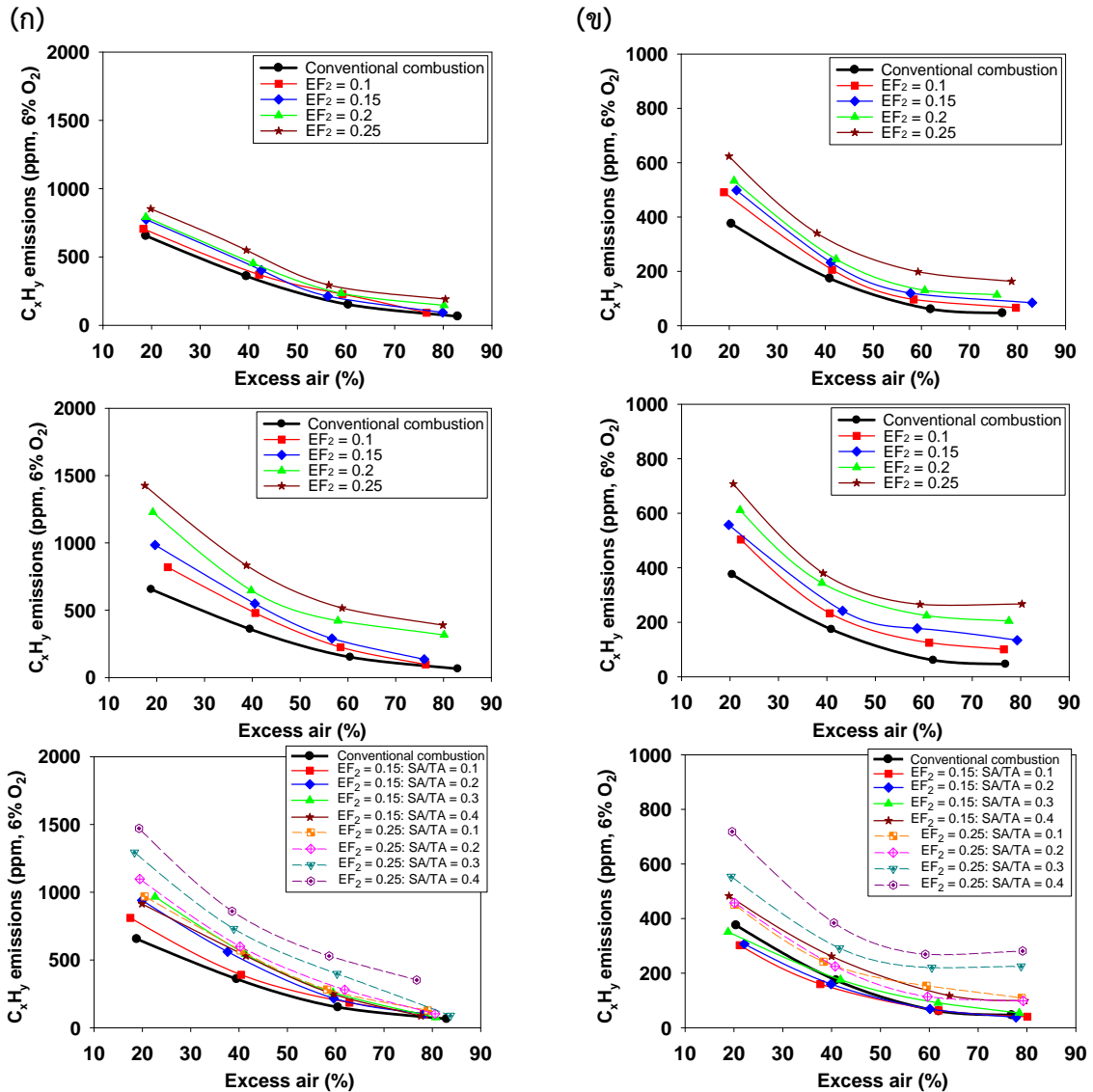
ภาพที่ 4.12 แสดงผลของสภาวะการทำงาน (EA, EF_2 และ SA/TA) ต่อความเข้มข้นของแก๊สมลพิษ CO (ปรับเทียบที่ 6% O_2) ที่ถูกปล่อยเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดตรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมกับ PCR กับ EB และ PRH และ MRH จากภาพจะเห็นได้ว่า EA, EF_2 และ SA/TA มีผลกระทบต่อการปล่อยมลพิษเป็นอย่างมีนัยสำคัญ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกิน (ที่ EF_2 และ SA/TA คงที่) ความเข้มข้นของ CO ลดลงอย่างเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่ม EF_2 และ/หรือ SA/TA จะเห็นได้ CO มีค่าเพิ่มมากขึ้น เป็นไปตามพฤติกรรมการก่อตัวและการเผาไหม้ของแก๊สมลพิษในภาพที่ 4.9 และ 4.10



ภาพที่ 4.12 การปล่อย CO จากเตาเผาฟลูอิดไคซ์ระหว่างการเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR กับ EB และ (ข) PRH กับ MRH ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และการเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง)

4.6.2 การปลดปล่อย C_xH_y

ภาพที่ 4.13 แสดงผลของสภาวะการทำงาน (EA, EF_2 และ SA/TA) ต่อความเข้มข้นของแก๊สมลพิษ C_xH_y (ปรับเทียบที่ 6% O_2) ที่ถูกปล่อยเตาเผาฟลูอิดซ์เบดตรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR กับ EB และ PRH และ MRH จากภาพที่ 4.13 พบว่าแนวโน้มของการปลดปล่อย C_xH_y มีลักษณะคล้ายกันกับ CO กล่าวคือ C_xH_y มีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม EA แต่เพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของ EF_2 และ SA/TA เพิ่มขึ้น ดังนั้น การควบคุมมลพิษ CO และ C_xH_y สามารถทำได้โดยการเพิ่มอากาศส่วนเกินและ/หรือ ลด EF_2 และ SA/TA

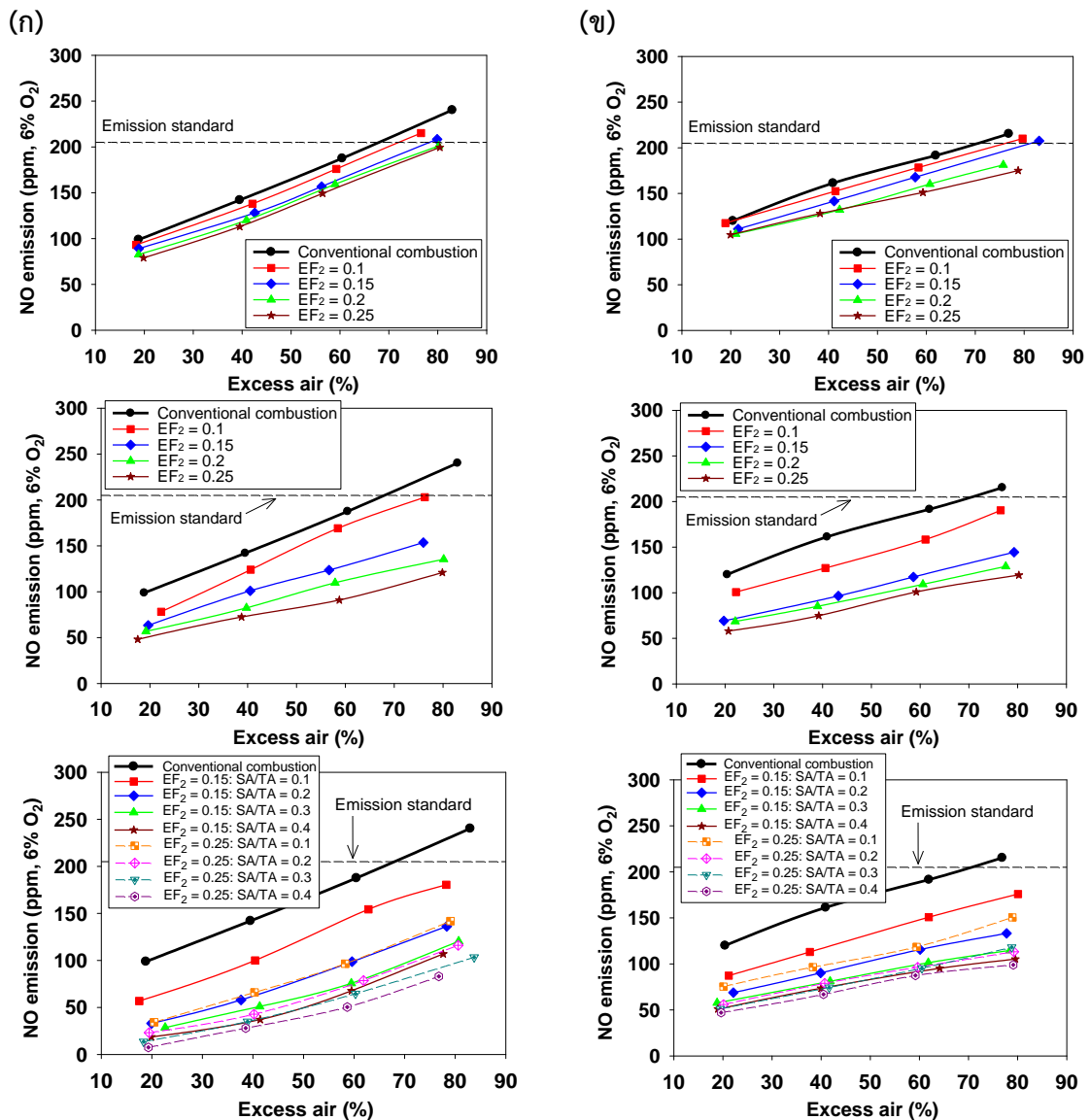


ภาพที่ 4.13 การปล่อย C_xH_y จากเตาเผาฟลูอิดซ์ระหว่างการเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR กับ EB และ (ข) PRH กับ MRH ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และการเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง)

4.6.3 การปลดปล่อย NO

ภาพที่ 4.14 แสดงผลของสภาวะการทำงาน (EA, EF_2 และ SA/TA) ต่อความเข้มข้นของแก๊สมลพิษ NO (ปรับเทียบที่ 6% O_2) ที่ถูกปล่อยเตาเผาฟลูอิดซ์เบดตรงกรวยเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR กับ

EB และ PRH และ MRH จากภาพที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า ผลกระทบของสภาวะการทำงานที่มีต่อการปลดปล่อย NO เป็นไปในทางตรงกันข้ามกับการปลดปล่อย CO และ C_xH_y กล่าวคือเมื่อเพิ่ม EA แนวโน้มของการปลดปล่อย NO จะเพิ่มขึ้น แต่หากว่าลดสัดส่วนของ EF_2 และ/หรือ SA/TA การปลดปล่อย NO จะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการก่อตัวและลดตัวของ NO ในเตาตั้งที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 4.4 ดังนั้นการควบคุมมลพิษหลักที่ปลดปล่อยระหว่างการเผาไหม้ร่วมสามารถทำได้โดยการควบคุมสภาวะการทำงานให้เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหาจุดเหมาะสมโดยวิธีอ้างอิงต้นทุน (Cost-based approach) ดังที่จะอธิบายในหัวข้อถัดไป



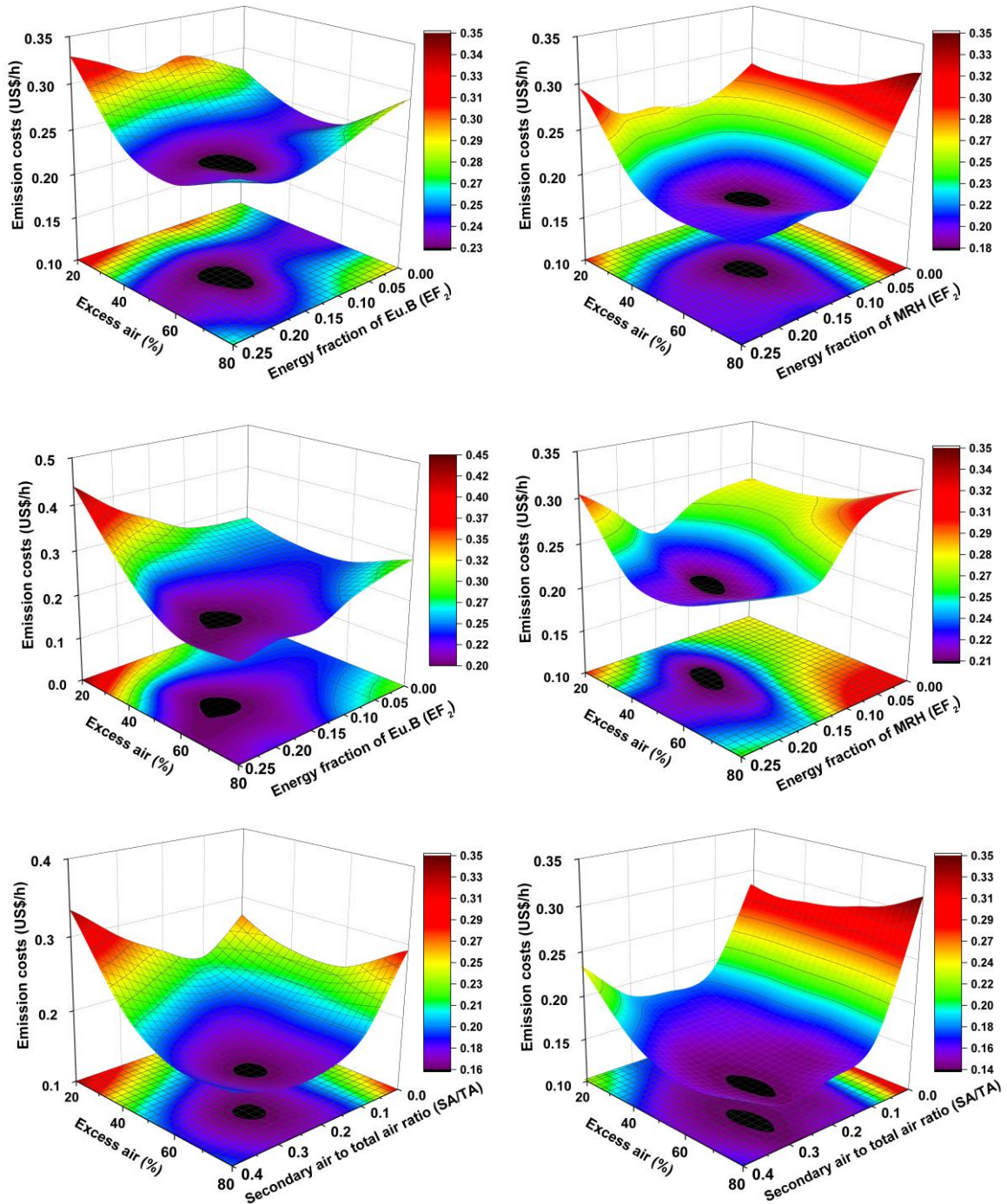
ภาพที่ 4.14 การปล่อย NO จากเตาเผาฟลูอิดซ์ระหว่างการเผาไหม้ร่วมระหว่าง (ก) PCR กับ EB และ (ข) PRH กับ MRH ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และการเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง)

4.7 สถานะที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไชต์เบด

ภาพที่ 4.15 แสดงราคาต้นทุนของการปล่อยมลพิษ (emission costs, US\$/h) ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงรอกต่างกันในเตาเผาฟลูอิดไชต์เบดแบบทรงกรวยโดยคำนวณจากค่าการ

(ก)

(ข)



ภาพที่ 4.15 ผลของสถานะการทำงานที่มีต่อต้นทุนการปลดปล่อยมลพิษ (emission cost) ที่ปลดปล่อยจากเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้ร่วม PCR กับ EB และ PRH กับ MRH ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม (กราฟด้านบน) การป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (กราฟตรงกลาง) และการเผาไหม้ซ้ำ (กราฟด้านล่าง)

ปล่อยมลพิษ CO C_xH_y และ NO ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.4.5

จากภาพที่ 4.15 เห็นได้ว่าอากาศส่วนเกิน อัตราส่วนเชื้อเพลิงรอง และอัตราส่วนอากาศรองต่ออากาศหลัก ส่งผลกระทบต่อราคาการปล่อยมลพิษเป็นอย่างมาก เมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมที่มีสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองเพิ่มขึ้นที่อากาศส่วนเกินต่ำ และ/หรือ สัดส่วนอากาศรองต่ออากาศหลัก ส่งผลให้ราคาการปล่อยมลพิษมีค่าสูง เป็นผลมาจากความเข้มข้นที่มากของ CO และ C_xH_y ในไอเสีย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกิน และลดสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรองลง และ/หรือ ลดสัดส่วนอากาศรองต่ออากาศหลัก ทำให้ค่าการปล่อยมลพิษก็สูงเช่นกัน เนื่องจากผลกระทบของ NO ต่อราคาการปล่อยมลพิษ

จากข้อมูลในภาพที่ 4.15 ทำให้สามารถหาค่าสถานะที่เหมาะสมของการเผาไหม้ร่วมดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงถึงค่า EA EF₂ และ SA/TA ที่เหมาะต่อการเผาไหม้ร่วม

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ร่วมด้วยวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัย

การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่าง PCR กับ EB	การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่าง PRH กับ MRH
EF ₂ = 0.15 and EA = 50% CO emission = 610 ppm. C _x H _y emissions = 310 ppm. NO emission = 142 ppm. NO reduction = 13%	EF ₂ = 0.15 and EA = 40% CO emission = 350 ppm. C _x H _y emissions = 180 ppm. NO emission = 155 ppm. NO reduction = 15%
การเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR กับ EB ด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น	การเผาไหม้ร่วมระหว่าง PRH กับ MRH ด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น
EF ₂ = 0.15-0.2 and EA = 50% CO emission = 600–700 ppm C _x H _y emissions = 300–500 ppm NO emission = 120–90 ppm NO reduction = 35–40%	EF ₂ = 0.15 and EA = 40% CO emission = 500 ppm. C _x H _y emissions = 300 ppm. NO emission = 95 ppm. NO reduction = 45%
การเผาไหม้ร่วมระหว่าง PCR กับ EB ด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ	การเผาไหม้ร่วมระหว่าง PRH กับ MRH ด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ
SA/TA = 0.2–0.3 and EA = 60% CO emission = 500 ppm C _x H _y emissions = 180–230 ppm NO emission = 65–85 ppm NO reduction = 50–60 %	SA/TA = 0.3 and EA = 60% CO emission = 350 ppm. C _x H _y emissions = 110 ppm. NO emission = 80 ppm. NO reduction = 50%

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จุดมุ่งหมายของโครงการวิจัยนี้คือเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนสูงในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยใช้วิธีการเผาไหม้ร่วมที่แตกต่างกัน 3 วิธี อันได้แก่การใช้เทคนิคการเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงผสม (co-firing premixed fuel) การใช้เทคนิคการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น (fuel staging) การเผาไหม้ด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ (reburning technique) การทดสอบทั้งหมดในงานวิจัยนี้ใช้เชื้อเพลิงหลัก 2 ชนิดคือ เหว้งมันสำปะหลังอัดเม็ด (PCR) และแกลบอัดเม็ด (PRH) โดยทำการเผาไหม้ร่วมกันเชื้อเพลิงรอง 2 ชนิดคือ เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสับ (EB) และ แกลบชั้น (MRH) ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงรอง $EF_2 = 0.1-0.25$ อากาศส่วนเกิน 20%–40% และอัตราส่วนอากาศรองต่ออากาศหลัก $SA/TA = 0.1-0.4$ (ใช้สำหรับการเผาไหม้ร่วมเท่านั้น)

ก่อนทำการทดลองด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วม ได้มีการทำการทดสอบการเผาไหม้ด้วยวิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงหลักทั้ง 2 ชนิดในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดด้วยวิธีการเผาไหม้แบบปกติ กล่าวคือ มีการป้อนเชื้อเพลิงชนิดเดียวจากแหล่งเดียว และมีการจ่ายอากาศเผาไหม้จากด้านล่างของเตา เพื่อใช้เป็นกรณีเปรียบเทียบกับวิธีการเผาไหม้ร่วมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

จากผลการวิจัยพบว่า การเผาไหม้ร่วมที่นำเสนอทั้ง 3 วิธี มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้และการก่อตัวและการสลายตัวของมลพิษที่เกิดขึ้นเป็นอย่างมาก จากผลที่ได้จากการวัด การเผาไหม้ทั้ง 3 วิธี สามารถสร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการลด/การสลายตัวของ NO_x ที่ก่อตัวขึ้นภายในเตาเผา กล่าวคือมีการก่อตัวขึ้นของ CO และ C_xH_y ในภายในเตาเผามากขึ้นกว่าปกติ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการลดการเกิดของ NO_x ภายในเตาเผาจึงส่งผลให้การปล่อย NO_x จากเตาเผาลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเผาไหม้ร่วมทั้ง 3 วิธี พบว่าวิธีการเผาไหม้ซ้ำมีความสามารถในการลด NO_x มากกว่าวิธีการอื่นๆ

เนื่องจากพารามิเตอร์การทำงานของเตาเผาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ส่งผลกระทบต่อการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาในลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการหาสภาวะของการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของเตาเผา จึงได้ทำการวิเคราะห์หาจุดทำงานที่เหมาะสมด้วยวิธีการอ้างอิงต้นทุนของการปลดปล่อยมลพิษ จากการวิเคราะห์พบว่า สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงรองต่อเชื้อเพลิงหลัก $EF_2 \approx 0.15$ และอากาศส่วนเกิน $EA = 40\%-50\%$ มีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ด้วยวิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม และการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น เมื่อทำการเผาไหม้ด้วยวิธีการเผาไหม้ซ้ำ อากาศส่วนเกิน $EA \approx 60\%$ และอัตราส่วนอากาศรองต่ออากาศหลัก $SA/TA = 0.2-0.3$ มีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ด้วยวิธีการดังกล่าว ภายใต้สภาวะการทำงานนี้ สามารถลดการปลดปล่อย NO_x ได้ประมาณ 15% (สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม) 40% (สำหรับการเผาไหม้ด้วยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงเป็นชั้น) 55% (สำหรับการเผาไหม้ซ้ำ) นอกจากนี้การปลดปล่อย CO และ C_xH_y ยังมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษที่กำหนดไว้มาก และที่สภาวะการทำงานนี้

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตามีค่าประมาณ 99% ดังนั้นวิธีการเผาไหม้ร่วมที่เสนอในโครงการวิจัยนี้ มีศักยภาพในการช่วยลดการปลดปล่อยมลพิษ NO_x ระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนสูงได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวก็ส่งผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพการเผาไหม้ ดังนั้นการหาจุดเหมาะสมของการทำงานจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เตามีสมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรใช้เชื้อเพลิงที่หลากหลายในการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของการทดสอบ
- เนื่องจากวิธีการเผาไหม้ซ้ำส่งผลทำให้อุณหภูมิเบตของเตาเผาสูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปัญหาจากการจับตัวกันของวัสดุเบต ดังนั้นควรทำการศึกษาผลกระทบของการเผาไหม้ซ้ำต่อพฤติกรรมของวัสดุเบตเมื่อถูกใช้ในการเผาไหม้ในระยะยาวด้วย
- ควรศึกษาผลกระทบของตัวแปรอื่นๆ เพิ่มเติมเช่น คุณสมบัติของเชื้อเพลิงหลักและเชื้อเพลิงรอง
- งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่มีการปลดปล่อย NO_x สูง นอกจากนี้การหาจุดเหมาะสมด้วยวิธีการอ้างอิงราคาต้นทุนการปล่อยมลพิษยังสามารถนำไปใช้เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบการเผาไหม้ได้
- องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ควรได้รับการต่อยอดเพื่อพัฒนาไปสู่การนำไปใช้ในระบบการเผาไหม้ขนาดอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย ปี พ.ศ 2556

http://www4.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/report13/alternative%20energy2013%20.pdf



กรมควบคุมมลพิษ และ มาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษออกจากโรงงานอุตสาหกรรมของ

http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd03.html

- Adams, B.R., Harding, N.S. 1998. Reburning using biomass for NO_x control. *Fuel Processing Technology*, 54(1-3), 249-263.
- 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.
- 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.
- Casaca, C., Costa, M. 2005. The effectiveness of reburning using rice husk as secondary fuel for NO_x reduction in a furnace. *Combustion Science and Technology*, 177(3), 539-557.
- 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.
- 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. The Renewable and Alternative Energy Development Plan for 25 Percent in 10 Years (AEDP 2012-2021). <http://www.dede.go.th> [accessed 01.01.14].
- 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.
- Harding, N.S., Adams, B.R. 2000. Biomass as a reburning fuel: a specialized cofiring application. *Biomass and Bioenergy*, 19(6), 429-445.
- IEA, 2015. Clean coal technologies. IEA Clean Coal Centre. Available from: <http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/database-section/clean-coal-technologies> (accessed on January 8, 2015).



- 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.
- 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., Lapirattanakun, 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.
- Ninduangdee, P., 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*, 44(6), 1045-1053.
- Ninduangdee, P., 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*, 176, 34–48.
- 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., Kuprianov, 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.
- Shu, Y., Wang, H., Zhu, J., Tian, G., Huang, J., Zhang, F. 2015a. An experimental study of heterogeneous NO reduction by biomass reburning. *Fuel Processing Technology*, 132, 111-117.
- Shu, Y., Zhang, F., Wang, H., Zhu, J., Tian, G., Zhang, C., Cui, Y., Huang, J. 2015b. An experimental study of NO reduction by biomass reburning and the characterization of its pyrolysis gases. *Fuel*, 139, 321-327.
- Sirisomboon, K., Kuprianov, V.I., Arromdee, P. 2010. Effects of design features on combustion efficiency and emission performance of a biomass-fuelled fluidized-bed combustor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(3), 270-277.
- 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., Jin, B., Zhang, M., Liu, R., Zhang, Y. 2008. 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*. Boston: McGraw-Hill.
- 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.
- 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.



- Yang, J., Sun, R., Sun, S., Zhao, N., Hao, N., Chen, H., Wang, Y., Guo, H., Meng, J. 2015. Experimental study on NO_x reduction from staging combustion of high volatile pulverized coals. Part 2. Fuel staging. Fuel Processing Technology, 138, 445-454.
- 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.