การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

พฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาเผาแกลบวอร์เทคแบบสองขั้น

Combustion Behaviors of a Two-Stage Rice Husk Vortex Combustor

ดิษฐพร ตุงโสธานนท์ [1] ยิ่งยง แก้วก่อเกียรติ [2] ภูรินทร์ อัครกุลธร [3] พงษ์เจต พรหมวงศ์ [1]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนน ฉลองกรุง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทรศัพท์ 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 E-mail: kppongje@kmitl.ac.th[1]

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ถนน เชื่อมสัมพันธ์ เขต หนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530
โทรศัพท์ 0-2988-3666 ต่อ 241 โทรสาร 0-2988-3666 ต่อ 241

[3]คณะเกษตรศาสตร์บางพระ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล บางพระ ศรีราชา ชลบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาเผาแกลบวอร์เทคแบบสองขั้น โดยศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆภายในเตาเผา ขี้เถ้าเบาและควันจากก๊าซไอเสียได้ถูกวัดและสังเกตตามลำดับ อัตราการไหลเชิงมวลของแกลบคงที่คือ 0.3 กิโลกรัมต่อนาที อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 25%, 43%, 67% และ 100% ตามลำดับ และในการศึกษาถึงผลกระทบจากการป้อนอากาศทุติยภูมิได้ใช้อัตราส่วนการไหลของอากาศทุติยภูมิเชิงปริมาตรต่ออากาศทั้งหมด (λ) จำนวน 3 ค่า คือ 0.00, 0.15 และ 0.25 ตามลำดับ การทดลองได้ถูกกำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดภายในห้องเผาไหม้มีค่าประมาณ 1,000^{o}C ขี้เถ้าเบาและควันที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้สามารถควบคุมการปล่อยมลพิษจากปล่องทิ้งไอเสียได้ด้วยอัตราส่วนการไหลของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) ซึ่งผลจากการศึกษาได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดี มีความเสถียรสูง การปล่อยมลพิษต่ำ และง่ายต่อการปฏิบัติงานในการเผาไหม้

Abstract

This paper presents the study of combustion behaviors of a two-stage rice husk vortex combustor. The temperature distributions for selected locations inside the combustor and the fly ash and smoke from its flue gas were measured and observed respectively. Mass flow rate of rice husk to be keep constant at 0.3 kg/min and by varying the excess air from 25% , 43%, 67% and 100% respectively. In order to study the effect of secondary air injection, three values of the ratio of volumetric flow rates of the secondary air to the total air, (λ), were used and set to be 0.00, 0.15 and 0.25.The combustion temperature inside the chamber is controlled to be under 1,000^{o}C for each test run. Besides, emissions and the sizes of fly ash particles from the exhaust stack can be controlled by the flow rate ratios of the secondary air to the total air, λ. The combustion behaviors of a two-stage rice husk vortex combustor shows an excellent performance, low emissions, high stabilization and ease of operation in firing the rice husk fuel.

1.บทนำ

ความต้องการในการใช้พลังงานในปัจจุบันนี้มีปริมาณมากขึ้นและประกอบกับแหล่งพลังงานหลักที่ใช้กันในปัจจุบันนี้ คือ พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ที่มีอยู่ตามแหล่งต่างๆมีอัตราลดลงอย่างมาก ดังนั้น ปัญหาเกี่ยวกับการขาดแคลนพลังงานจึงดูเหมือนว่าเป็นประเด็นสำคัญที่จะเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนา จึงเกิดความคิดริเริ่มในการที่จะหาแหล่งพลังงานแหล่งใหม่ขึ้นเป็นพลังงานทางเลือกทดแทนแหล่งพลังงานที่มีใช้อยู่เดิม โดยที่แหล่งพลังงานแหล่งใหม่ที่น่าสนใจในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้น ควรจะเป็นแหล่งพลังงานที่หามาได้ง่าย ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อย สำหรับบทความนี้จะมุ่งประเด็นไปที่เชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกษตร คือ แกลบ ซึ่งมีอยู่ในปริมาณมากทั่วไปในโลก แกลบ คือ เปลือกนอกของเมล็ดข้าว คิดเป็น 20% โดยน้ำหนักของการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกอันจะก่อให้เกิดเป็นขยะ ประมาณได้ว่าในแต่ละปีมีข้าวเปลือกจากทั่วโลกมากกว่า 80 ล้านตัน เฉพาะที่ประเทศไทยมีโรงสีข้าวประมาณ 40,000 โรง และมีแกลบที่ได้จากการสี 4.4-4.6 ล้านตันต่อปี ซึ่งคิดเป็นค่าความร้อนเทียบเท่ากับปริมาณน้ำมันดิบ 1.46-1.53 ล้านตัน

เนื่องด้วยแกลบจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็งชนิดหนึ่งและเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่เบามาก จากการศึกษามีรายงานจำนวนมากของเตาเผาหลายชนิดที่มีการใช้วัสดุชีวมวลหรือถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในจำนวนเหล่านั้นเทคโนโลยีฟลูอิดไดซ์เบด ดูเหมือนว่าจะเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือเศษเหลือจากการเกษตรเป็นพลังงานเนื่องจากว่ามีข้อได้เปรียบตามธรรมชาติ คือ สามารถเปลี่ยนเชื้อเพลิงได้ตามความเหมาะสม ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ เงื่อนไขการทำงานที่อุณหภูมิคงที่ แต่อย่างไรก็ตาม Wan และ Chyang 1998 [1] รายงานว่าการใช้วิธีการของฟลูอิดไดซ์เบดนั้นต้องการห้องเผาไหม้ (ฟรีบอร์ด) ที่สูงมากเพื่อลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคเชื้อเพลิงและทำให้อนุภาคอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดนั้นอาจต้องมีความสูงรวมของฟรีบอร์ดมากกว่า 15 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเบด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้เชื้อเพลิงแข็งที่เบามาก วิธีการนี้อาจจะไม่เหมาะสำหรับการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาขนาดเล็กเพื่อจุดประสงค์ในการประยุกต์ใช้ในกาอบแห้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแก้ไขปรับปรุงเตาเผาเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้กับเชื้อเพลิงแข็งที่มีน้ำหนักเบา

เตาเผาวอร์เทคได้ถูกพัฒนาขึ้นเมื่อไม่นานมานี้ ซึ่งเตาเผาชนิดนี้เป็นการรวมข้อได้เปรียบและกำจัดข้อด้อยของเตาเผาไซโคลน เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดและเตาเผาถ่านหินผง Nieh และ Fu (1988,1990)[2,3] ได้ทำการทดลองเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาถ่านหินอย่างสะอาด Promvonge และ Silapabanleng (2001)[4] ได้ทำการทดลองกับเตาเผาวอร์เทคซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับเตาเผาของ Nieh และ Fu แต่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้ถ่านหิน ได้ศึกษาและรายงานพฤติกรรมการเผาไหม้แกลบในเตาเผาดังกล่าว ผลจากขี้เถ้าในเตาเผาต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้รวมถึงอุปสรรคปัญหาในการกำจัด เนื่องจากแกลบมีปริมาณขี้เถ้าสูงซึ่งไม่เหมือนถ่านหิน

ในการปรับปรุงการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูงและเกิดมลพิษต่ำมีวิธีการอยู่หลายวิธีดังนี้ 1) การปรับปรุงการออกแบบห้องเผาไหม้ 2) การเตรียมส่วนผสมของเชื้อเพลิง 3) การสร้างเสถียรภาพของเปลวไฟด้วยการหมุนวน 4) การนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่ 5) การเผาไหม้เป็นลำดับขั้นและอื่นๆ

ดังนั้น เตาเผาวอร์เทคแบบสองขั้นจึงได้พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการตามที่กล่าวมาข้างต้นคือ ข้อ1, 2, 3และ 5

ตารางที่1. องค์ประกอบของแกลบ

คาร์บอน	36.8%
ไฮโดรเจน	5.8%
ออกซิเจน	37.4%
ไนโตรเจน	0.14%
กำมะถัน	0.1%
ความชื้น	7.8%
ขี้เถ้า	18.9%
ความหนาแน่น , kg/m^3	100.0
ค่าความร้อน(Gross heat of combustion, kcal/kg)	3,308.

2.เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงแกลบขนาดปกติประมาณ (2.0x8.0 มิลลิเมตร) ซึ่งเป็นขนาดปกติที่ได้จากการสี จากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองพบว่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ มีปริมาณต่างๆ ตามตารางที่ 1.

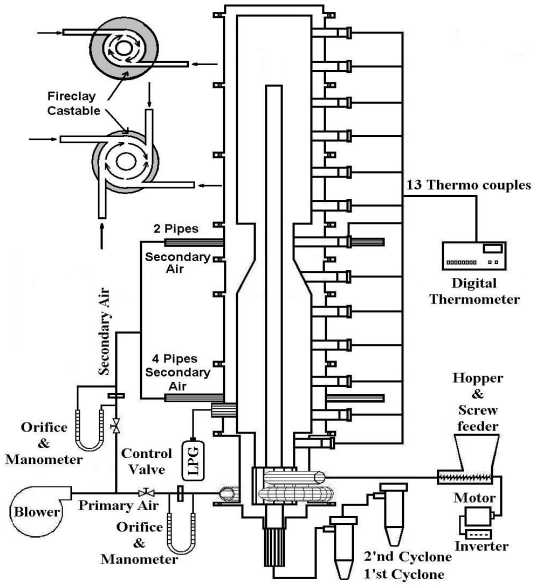
3.การติดตั้งการทดลองและวิธีการ

แกลบที่นำมาทดลองมีขนาด2.0x8.0มิลลิเมตร (ค่าการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 1.) ซึ่งเป็นขนาดปกติที่ได้จากการสี การจัดระบบการทดลองของเตาเผาแสดงในรูปที่ 1. เตาเผาทำจากเหล็กท่อทรงกระบอก หล่อซีเมนต์ทนไฟแทนการหุ้มฉนวน เตาเผามีความสูง1.8 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.30 เมตร และมีชุดท่อหัวฉีดอากาศทุติยภูมิ (Q_S) เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.025 เมตร ท่อทิ้งไอเสียซึ่งอยู่กลางห้องเผาไหม้ทำจากแสตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.075 เมตร รายละเอียดเตาเผาวอร์เทคแบบสองขั้นแสดงในรูปที่ 2.

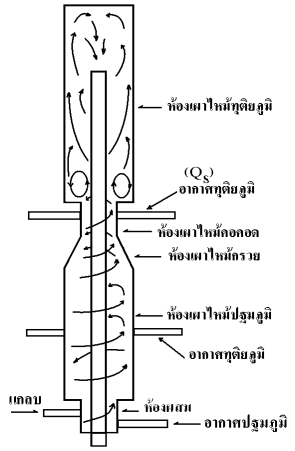
จากแผนผังที่แสดงในรูปที่ 1. อากาศปฐมภูมิได้ถูกเตรียมเข้าห้องผสมที่ส่วนล่างของเตาพร้อมเชื้อเพลิงแกลบ อากาศทุติยภูมิสองส่วนได้ถูกฉีดเข้าไปในเตาตามแนวสัมผัส ส่วนแรกถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ ส่วนที่สองฉีดไปยังคอคอดซึ่งอยู่ใต้ห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของการหมุนวนและเสถียรภาพของเปลวไฟ

การเผาไหม้เกิดขึ้นก่อนในบริเวณวงแหวนในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ ต่อจากนั้นก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะหมุนขึ้นไปยังห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ ซึ่งก่อนที่จะเข้าห้องเผาไหม้ทุติยภูมิก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ถูกเร่งและเมื่อผ่านคอคอดจะถูกผสมกับอากาศทุติยภูมิที่เตรียมไว้ การเผาไหม้บริเวณเหนือคอคอดนี้การหมุนวนที่ปั่นป่วนสูงของก๊าซจะเหนี่ยวนำให้เกิดCentral toroidal recirculation ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง และช่วยเพิ่มเวลาในห้องเผาไหม้ให้นานขึ้น นอกจากนี้ผลจากทั้งแรงเหวี่ยงหนีศูนย์และแรงฉุดของไหลจะทำให้เชื้อเพลิงลอยขึ้นสู่ด้านบนของเตาเผา ขณะที่อนุภาคแกลบถูกเผาไหม้ก็จะมีน้ำหนักและขนาดลดลงอย่างต่อเนื่องจนในที่สุดก็จะถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ อนุภาคส่วนใหญ่ของขี้เถ้าจะมีน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กพอจะออกไปยังท่อทิ้งไอเสียกับก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้และออกจากเตาเผาเรียกว่า ขี้เถ้าเบา

เตาเผานี้ทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 500-1000°C เครื่องเป่าลม (Blower) ขนาด 7.46 kW ใช้ในการเตรียมอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ แกลบถูกลำเลียงผ่านเกลียวลำเลียงเข้าไปยังห้องผสมที่อยู่ด้านล่างของเตา ตอนเริ่มต้นของการทำงานใช้หัวเผาอุ่นเตาให้ร้อนด้วยก๊าซ LPG ใช้เวลาประมาณ 15 นาทีจนอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงประมาณ 400°C ต่อจากนั้นป้อนแกลบจากฮอปเปอร์ (Hopper) ด้วยอัตราป้อนแกลบที่ 0.3 กิโลกรัมต่อนาที จนอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 700°C จึงหยุดการอุ่นเตาโดยการนำหัวเผาออก ในตอนเริ่มต้นของการจุดเตาจะพบควันสีดำหนาแล้วหลังจากนั้นควันจะจางและน้อยลง



รูปที่1.แผนภาพของการติดตั้งระบบชุดทดลอง



รูปที่ 2.รูปร่างของเตาเผาวอร์เทคแบบสองขั้น

4.เงื่อนไขและการเก็บผลการทดลอง

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งต้องการปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้จะมีปริมาณความต้องการที่มากกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆแต่หากมีการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่มากเกินไปก็ไม่เป็นผลดีต่อกระบวนการเผาไหม้ การทดลองนี้ได้ทำการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบที่อัตราป้อน 0.3 กิโลกรัมต่อนาที โดยใช้อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 25%, 43%, 67% และ 100% ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน ถูกกำหนดโดย

$$\text{Excess air} = \frac{\text{Actual air - Theoretical air}}{\text{Theoretical air}} \qquad (1)$$

สำหรับอากาศถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ อากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ สัดส่วนระหว่างอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด(λ) มีค่าเท่ากับ 0.00, 0.15 และ 0.25 ตามลำดับ โดยที่

$$\lambda = \frac{Q_S}{Q_T} \qquad (2)$$

เมื่อ Q_S คืออัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/min)

Q_T คือ อัตราการไหลของอากาศทั้งหมด (kg/min)

ในการวัดระดับอุณหภูมิภายในเตา ทำการวัดที่ความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (x/D) 13 ระดับ คือ 0.25, 0.5, 0.7, 1.25, 1.75, 2.25, 2.75, 3.25, 3.75, 4.25, 4.75, 5.25 และ 5.75 ตามลำดับ

5.ผลการทดลองและการวิเคราะห์

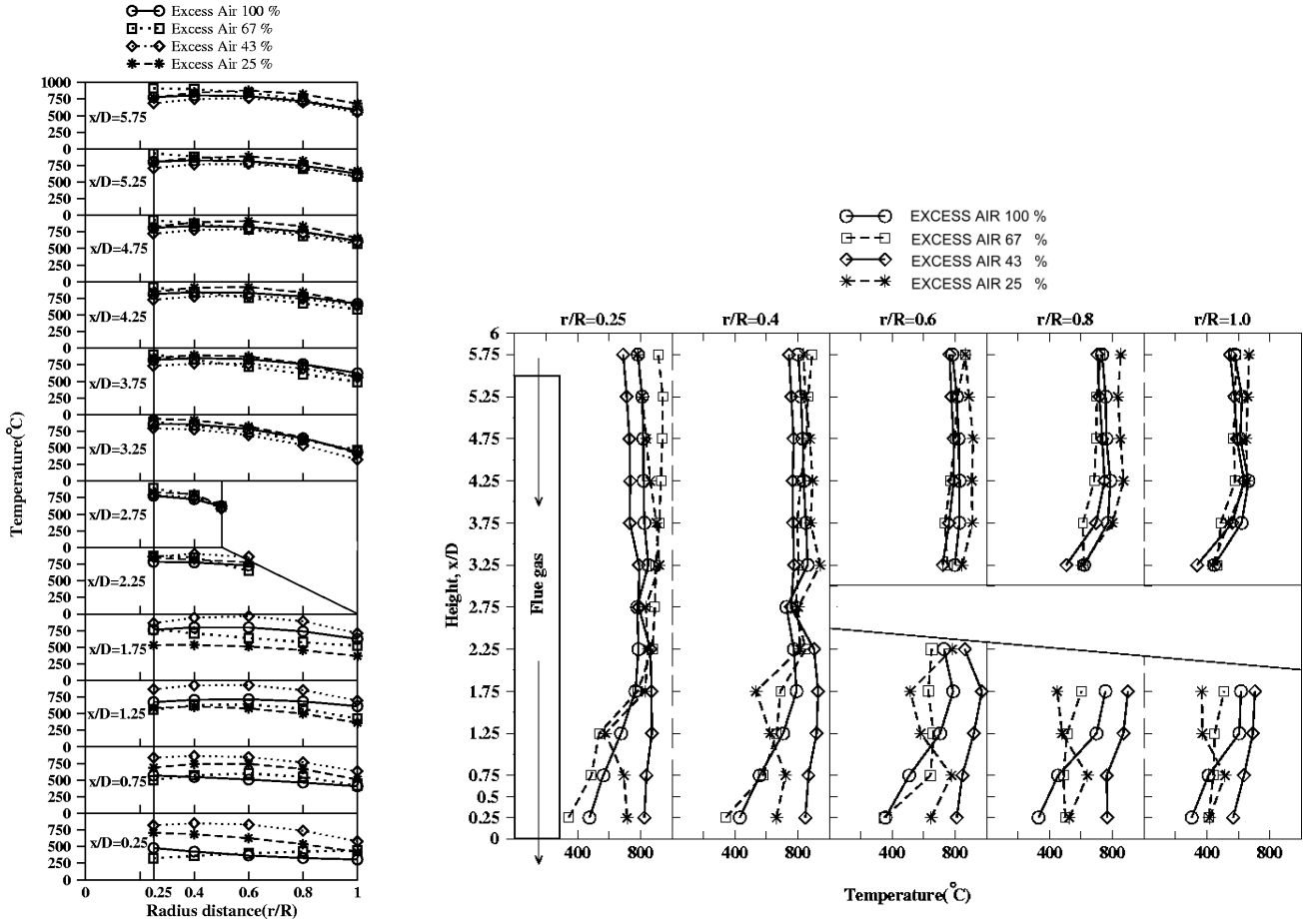
5.1 อิทธิพลของอากาศส่วนเกิน (Excess Air)

การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีและตามแนวแกนภายในเตาเผาสำหรับในแต่ละอัตราส่วนสมมูลได้แสดงในภาพที่ 3ก. และ 3ข. ตามลำดับ

ที่ λ= 0.00 (ไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ) พบว่ากระกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งนั้นค่อนข้างคงตัวยกเว้นที่ใกล้บริเวณผนังและที่ส่วนล่างของเตา ที่อากาศส่วนกิน 43% มีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั้งห้องเผาไหม้ปฐมภูมิและห้องเผาไหม้ทุติยภูมิซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 3ข. สิ่งนี้ได้บ่งบอกว่ามีการผสมกันอย่างดีและมีการเผาไหม้สูงเกิดขึ้น ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ อากาศส่วนเกิน 25%, 67%และ100% นั้นสังเกตได้ว่าการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ปฐมภูมินั้นไม่เสถียร ส่วนที่อากาศส่วนเกินน้อยกว่า 43% ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิและจะมีอัตราใกล้เคียงกันกับที่อากาศส่วนเกินค่าอื่นๆในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ ซึ่งสามารถให้เหตุผลว่าอนุภาคมีเวลาในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิน้อยเมื่อใช้อากาศส่วนเกินมาก ดังนั้น ความแตกต่างของการใช้อัตราส่วนสมมูลจะสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนจากระดับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ

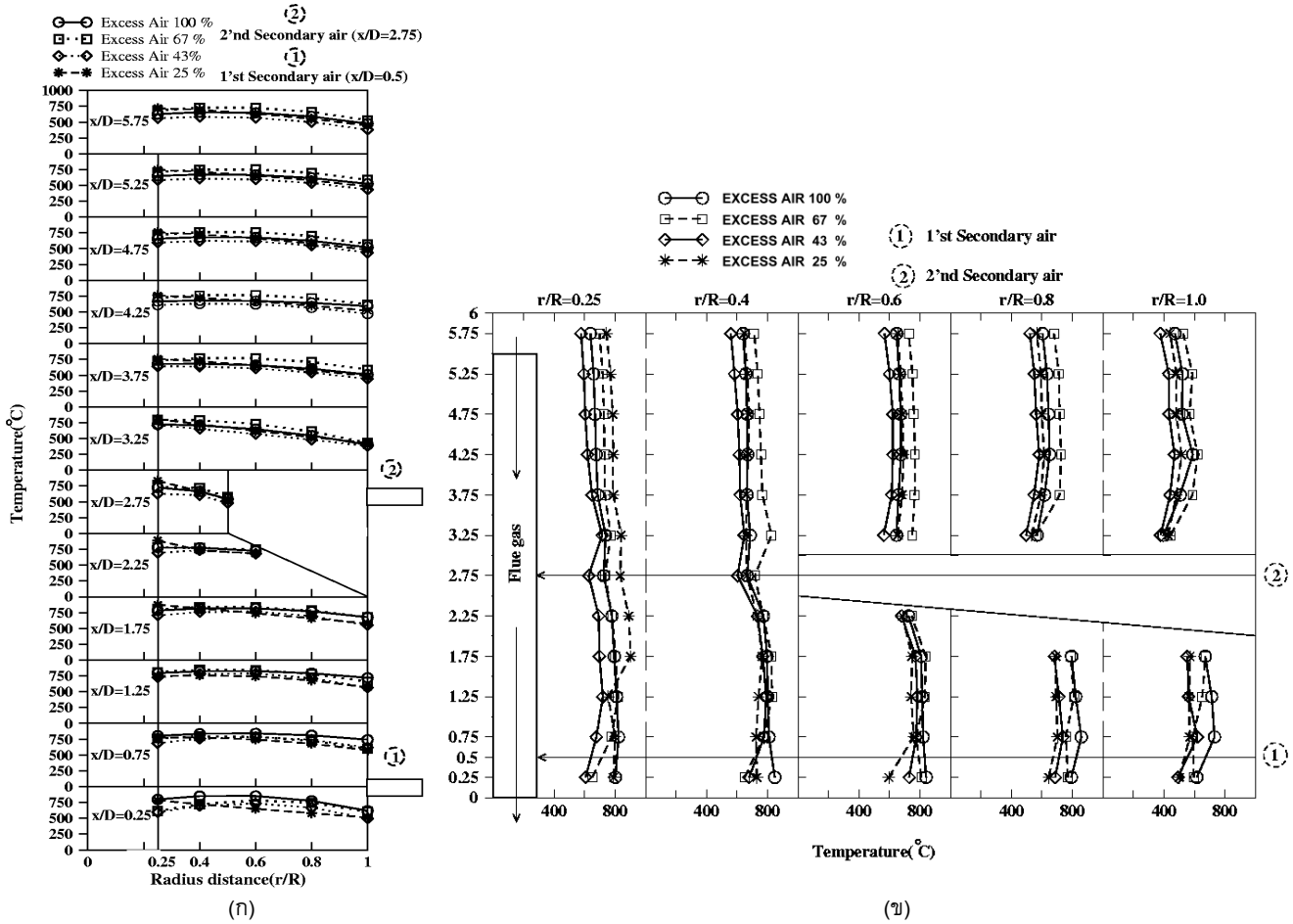
5.2 อิทธิพลของอากาศทุติยภูมิ (λ)

กรณีของการใช้อากาศส่วนเกินน้อย ซึ่งเป็นการบอกว่าที่การเผาไหม้แบบที่มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงน้อยและมีอากาศส่วนเกินน้อยนั้นλสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ ผลจากการใช้ λ=0.25 ต่อการกระจายอุณหภูมิในทุกค่าของอากาศส่วนเกิน ค่าทั้งหมดมีแนวโน้มเดียวกันทั้งสองห้องเผาไหม้ ซึ่งสามารถมองเห็นได้ชัดที่รูปที่ 4ก. และ 4ข. ตามลำดับ แม้ว่าอุณหภูมิสูงที่สุดจะต่ำกว่ากรณีที่ผ่านมา แต่การกระจายอุณหภูมิมีความราบเรียบกว่ากรณี λ ค่าอื่น ซึ่งหมายความว่ามีการผสมและเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ดีกว่า เพิ่มเสถียรภาพในการเผาไหม้มากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าขอบเขตของการติดไฟของการผสมบางสามารถที่จะเพิ่มขึ้นได้โดยการใช้ค่าλ



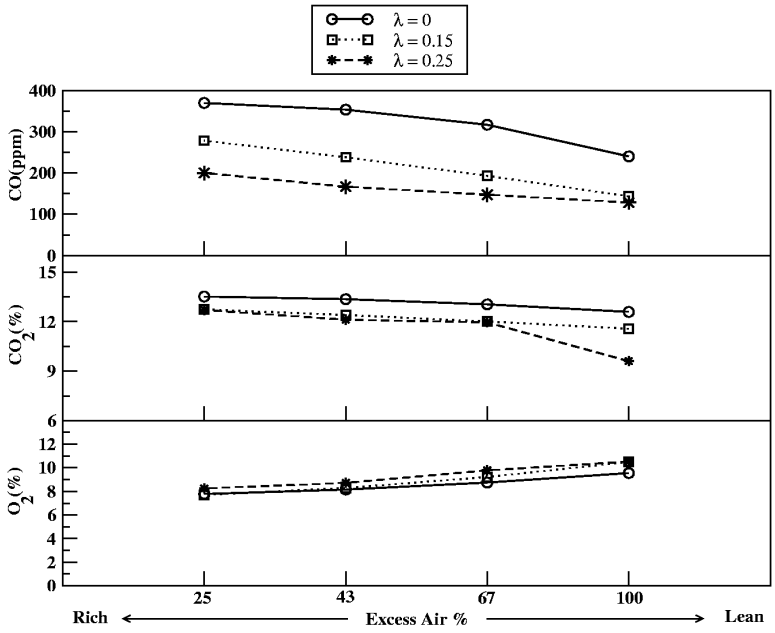
(ก) (ข)

รูปที่ 3.การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา กรณีไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ λ = 0.00, (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน



(ก) (ข)

รูปที่ 4.การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา กรณีใช้อากาศทุติยภูมิ 25%, λ=0.25, (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน



รูปที่ 5. การปล่อยมลพิษของก๊าซไอเสียที่ทางออก

5.3 การปล่อยมลพิษของก๊าซไอเสีย

การปล่อยก๊าซ CO, CO_2 และ O_2 ในแต่ละค่าของอากาศส่วนเกินและ λ นั้นได้แสดงในภาพที่ 5. สำหรับค่าของ CO นั้นจะลดลงเมื่อปริมาณของอากาศส่วนเกินมีค่ามากขึ้น การก่อตัวของ CO จะลดลงอีกครั้งเมื่อมีการใช้ λ สังเกตได้จากด้านบนของภาพที่ 5. ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเผาไหม้มีความเข้มข้นมากขึ้นที่ห้องเผาไหม้ทั้งสองเนื่องจากมีการผสมกันดีระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในเตาเผา การปล่อย CO_2 นั้นจะค่อยๆลดลงเมื่อมีการเพิ่มอากาศส่วนเกิน นอกจากนั้นการใช้ λ จะทำให้ปริมาณ CO_2 ลดลงด้วย ระดับของ O_2 จะพบว่าค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอากาศส่วนเกินและλ

6.สรุป

การทดลองศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาเผาแกลบวอร์เทคแบบสองขั้น โดยทำการวัดการกระจายอุณหภูมิและการปล่อยก๊าซไอเสียรวมถึงเสถียรภาพของการเผาไหม้ ผลการทดลองพบว่าการใช้อากาศส่วนเกิน 43%และ67%ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้และ ความเสถียรของเปลวไฟที่ดี มีค่าการปล่อยของมลพิษน้อย ผลของการใช้อากาศทุติยภูมิช่วยในการเผาไหม้ทุกๆค่าของอากาศส่วนเกินช่วยให้ลักษณะการกระจายอุณหภูมิมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น ทำให้เกิด recirculation zone ส่งผลให้การหลุดลอยของอนุภาคลดลงและปล่อยมลพิษต่ำกว่า

7.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงสีไฟศรีกรุงลาดกระบังที่ได้อนุเคราะห์เชื้อเพลิงแกลบในการทดลอง

8.เอกสารอ้างอิง

[1] H.P. Wan and C.S. Chyang, “Transport Disengaging Height and Elutriation Rate of a Vortexing Fluidized Bed,” J. of Chemical Engineering of Japan, Vol.13, No.6, pp.977-986, 1998.

[2] S. Nieh and T.T. Fu, “Development of a Non-slagging Vortex Combustor (VC) for Space/Water Heating Application,” Proceeding of The 5th International Coal Conference, Pittsburgh, pp.761-768, 1988.

[3] S. Nieh and T.T. Fu, “A Non-slagging Vortex Combustor Firing Coal-Water Fuel for Commercial Heating Application,” Proceeding of The 7th International Coal Conference, Pittsburgh, pp.223, 1990.

[4] P. Promvonge and K. Silapabanleng, “Experimental Study of Combustion Characteristics in a Rice Husk Fired Vortex Combustor,” Proceedings of the 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Savannah, Georgia, paper no. 2001-RE-17, 2001.