

การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

สุวิทย์ เตีย¹

ภัทวดี พุกอมรพันธ์² พรเทพ จิตวุฒิกโร² แสง แซ่เล้า²

และ ทนงค์ ฉายาวัฒน์³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้นำเอาเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดมาประยุกต์ใช้เผาเชื้อเพลิงชีวมวลประเภท กากมันสำปะหลัง, เปลือกถั่วลิสง และฟางข้าว เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ที่มีต่อการเผาไหม้ การทดลองนี้ทำโดยเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่เท่ากับ 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่า ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ สูงสุดของกากมันสำปะหลัง, เปลือกถั่วลิสง และฟางข้าว มีค่าเท่ากับ 7.25, 6.0 และ 7.15 ตามลำดับ จะได้ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 99.71%, 99.07% และ 97.92% ตามลำดับ และพบว่า อุณหภูมิเหนือเบดสูงกว่าอุณหภูมิในเบด เป็นเพราะชีวมวลที่ใช้มีปริมาณสารระเหยสูง ส่วนปริมาณ ก๊าซพิษได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 290-340 ppm ส่วนสารประกอบ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) จะมีน้อยมากประมาณ 120-200 ppm

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

² นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

³ วิศวกร สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ

Combustion of Biomass in fluidized-bed Furnace

Suvit Tia ¹

Pathavud Prukamornpan ² Pornteap Jitvootthikai ² Sang Sae Lao ²

and Tanong Chayawattana ³

King Mongkut's University of Technology Thonburi

Abstract

The combustion of biomass (cassava stalk, peanut shell and rice straw) in fluidized-bed furnace was studied in order to examine the effects of air / fuel ratio on the combustion efficiency. The experiment was performed by changing air/fuel ratio at constant fuel feeding rate of 15 kg/hr. Results showed that the combustion efficiency of cassava stalk, peanut shell and rice straw are **99.71%**, 99.07% and 97.92% at A/F ratio of 7.25, 6.0 and 7.15, respectively. The over bed temperature is higher than the in-bed, due to high volatile content of biomass fuel. In addition, the emission of CO was in the range of 290-340 ppm while NO_x was in the range of 120-200 ppm.

¹ Associate Professor, Department of Chemical Engineering

² Graduate Student, Department of Chemical Engineering

³ Engineer, Pilot Plant Development and Training Institute

1. บทนำ

ในปัจจุบันการพัฒนาแหล่งพลังงานต่างๆ ในประเทศมาใช้ประโยชน์ กำลังเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะประเทศไทย เนื่องจากปัญหาทางด้านการขาดแคลนพลังงาน ในขณะที่ประเทศไทยยังมีทรัพยากรต่างๆ ที่ยังไม่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างเต็มที่ เช่น ชีวมวลที่เหลือจากการเกษตร จึงได้มีการตื่นตัวในการนำทรัพยากรเหล่านี้มาใช้ เช่น โรงทอผ้า โรงงานกระดาษ และโรงสีข้าว ชีวมวลที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ แกลบ ชีลี้อย และซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำและผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ชีวมวลจัดเป็นเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำ ดังนั้นต้องมีเตาเผาที่เหมาะสมในการเผาไหม้

1.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกได้เป็น 4 ประเภท [1] คือ

1. เชื้อเพลิงที่ได้จากไม้ (forest biomass) เช่น เศษไม้ เปลือกไม้ กิ่งไม้และชีลี้อย
2. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (agriculture biomass) ส่วนใหญ่เป็นของเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น แกลบ ซังข้าวโพด เป็นต้น
3. เชื้อเพลิงที่ได้จากอุตสาหกรรม (industrial waste) เช่น ชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล กากสับปรดจากโรงงานทำสับปรดกระป๋อง
4. เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้ของมนุษย์ (domestic waste) เช่น ขยะจากเทศบาล

1.2 ศักยภาพของชีวมวลในประเทศไทย [2], [3]

ข้าวโพด มีพื้นที่เพาะปลูกทุกภาค และมากที่สุดทางภาคเหนือ พื้นที่เพาะปลูกในปี 2535/36 จำนวน 8.446 ล้านไร่ ผลผลิต 3.672 ล้านตันต่อปี อัตราส่วนข้าวโพดต่อซังข้าวโพดเท่ากับ 1 : 0.25 [3] คิดเป็นพลังงานความร้อน 0.855×10^{12} kcal/ปี

อ้อย มีพื้นที่เพาะปลูกทางภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ ในปี 2535/36 มีพื้นที่เพาะปลูกจำนวน 6.267 ล้านไร่ ผลผลิต 39.827 ล้านตันต่อปี อัตราส่วนอ้อยต่อชานอ้อยเท่ากับ 1 : 0.28 [3] คิดเป็นพลังงาน 4.578×10^{13} kcal/ปี

ปาล์ม พื้นที่เพาะปลูกเกือบทั้งหมดในภาคใต้ ในปี 2535 มีจำนวน 0.958 ล้านไร่ ผลผลิตที่ได้ 1.352 ล้านตันต่อปี

มะพร้าว มีพื้นที่เพาะปลูกทางภาคใต้ ในปี 2535/36 จำนวน 2.427 ล้านไร่ ผลผลิต 1.411 ล้านตันต่อปี อัตราส่วนระหว่างมะพร้าวและกากมะพร้าวเท่ากับ 1 : 0.35 คิดเป็นพลังงานความร้อน 2.132×10^{12} kcal/ปี

ข้าว แบ่งเป็น

ก. ข้าวนาปี 2535/36 มีพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศ 56.295 ล้านไร่ ผลผลิตประมาณ 17.302 ล้านตันต่อปี (เพาะปลูกไม่เต็มที่เนื่องจากภาวะฝนแล้ง)

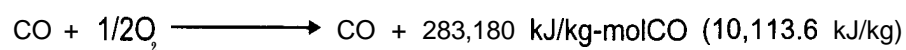
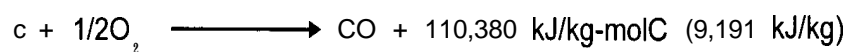
ข. ข้าวนาปรัง ในปี 2535/36 มีพื้นที่เพาะปลูก 4.15 ล้านไร่ ผลผลิต 2.615 ล้านตันต่อปี

อัตราส่วนระหว่างข้าวเปลือกต่อฟางข้าวเป็น 1 : 2 คิดเป็นพลังงานความร้อนประมาณ 1.523×10^{14} kcal/ปี

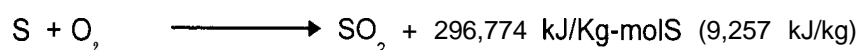
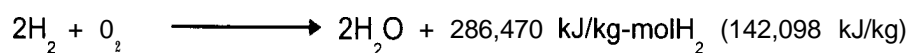
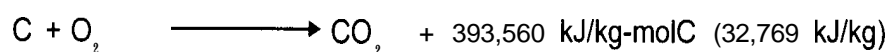
ถั่วลิสง มีพื้นที่เพาะปลูกทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในปี 2535/36 จำนวน 0.65 ล้านไร่ ผลผลิต 0.137 ล้านตันต่อปี อัตราส่วนระหว่างถั่วต่อเปลือกถั่วประมาณ 1 : 0.3 คิดเป็นพลังงานความร้อน 1.685×10^{11} kcal/ปี

1.3 ทฤษฎีการเผาไหม้ [4]

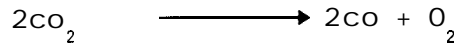
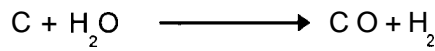
การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีชนิดหนึ่งซึ่งปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาพร้อมกันกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งเป็นการรวมตัวของออกซิเจนเข้ากับคาร์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน ก็คือ



ซึ่งอาจเขียนรวมกันได้เป็น



นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาปฏิกิริยาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้อีกมากเช่น



โดยปกติแล้วจะสมมุติว่าไม่เกิดขึ้นในฟลูอิดไดซ์เบด เพราะอุณหภูมิของปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่ำ และเพื่อความสะดวกในการคำนวณทางด้านการเผาไหม้

การเผาไหม้จะเกิดได้ต้องมีสภาวะเหมาะสม นั่นก็คือต้องมีอากาศที่เพียงพอ มีอุณหภูมิสูงพอ มีเวลามากพอสำหรับปฏิกิริยา และมีการผสมผสานของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดี ในการเผาไหม้ เพื่อที่จะให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ จึงต้องเพิ่มปริมาณอากาศขึ้นจนเพียงพอ ซึ่งจะได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงสูงกว่าอัตราส่วนตามทฤษฎี อากาศที่เกินจากที่ต้องการนั้นเรียกว่า อากาศมากเกินพอ คำนวณได้จาก

$$\% \text{ excess air} = \frac{(\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง}-\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี}) \times 100}{\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี}}$$

1.4 เทคนิคทางฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidization) [4]

ฟลูอิดไดซ์เบดเป็นปรากฏการณ์ที่ของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้อยู่ในสภาพคล้ายของไหล ด้วยการพองโดยก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านเบดของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง โดยอาจจะมีการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และ/หรือปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในขณะที่มีการสัมผัสระหว่างของแข็งกับของไหลนั้น Kunii และ Levenspiel [5] ได้แบ่งเทคนิคทางฟลูอิดไดซ์เบดออกเป็น 2 ประเภท คือ ฟลูอิดไดซ์เบดของของเหลว (liquid-solid fluidization) และฟลูอิดไดซ์เบดของก๊าซ (gas-solid fluidization)

ลักษณะการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด [6] มีขั้นตอนดังนี้ คือ ในขณะที่ของไหลไหลผ่านเบดของอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กในทิศทางจากด้านล่างสู่ด้านบนด้วยอัตราการไหลค่อนข้างต่ำ เบดจะอยู่ในสภาพนิ่ง (fixed bed) การไหลของของไหลจะก่อให้เกิดแรงดูด (drag force) กระทำบนผิวของอนุภาคของแข็ง และมีทิศทางตามการไหลของของไหล แรงดูดที่เกิดขึ้นจะพยายามทำให้อนุภาคของแข็งลอยตัวขึ้น แต่แรงโน้มถ่วง (น้ำหนักของอนุภาค) ซึ่งกระทำในทิศทางตรงข้ามมีมากกว่าจึงทำให้เบดอยู่กับที่ เมื่ออัตราการไหลของของไหลที่ผ่านเบดสูงขึ้นจะมีผลให้แรงดูดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ กระทั่งถึงความเร็วค่าหนึ่ง แรงทั้งสองที่กระทำบนอนุภาคของของแข็งจะสมดุลกัน ภายใต้ภาวะการนี้อนุภาค

ของของแข็งแต่ละตัวมีอิสระในการเคลื่อนที่เนื่องจากของไหลช่วยพยุงเอาไว้ เบดที่อยู่ในสภาพนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed) และที่จุดนี้เรียกว่าจุดต่ำสุดในการฟลูอิดไดซ์ (minimum fluidization) การเพิ่มขึ้นของการไหลที่สูงกว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไดซ์ ในระบบก๊าซ-ของแข็งมักจะมีพฤติกรรมต่างจากระบบของเหลว-ของแข็งคือพบว่ามี การเกิดฟองอากาศ (bubble fluidization bed) หรือฟลูอิดไดซ์เบดของก๊าซ ซึ่งต่างไปจากระบบฟลูอิดไดซ์เบดของของแข็งกับของเหลว ซึ่งการขยายตัวของชั้นของแข็งจะสม่ำเสมอจึงเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสม่ำเสมอหรือฟลูอิดไดซ์เบดของของเหลว

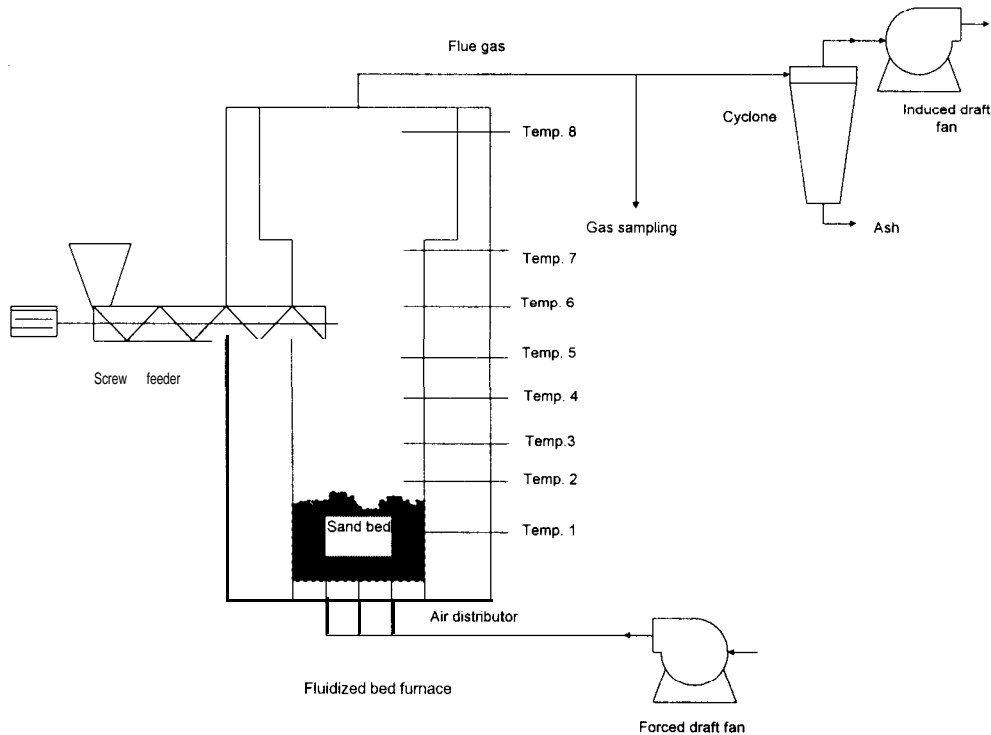
1.5 กระบวนการเผาไหม้ชีวมวลในเตาฟลูอิดไดซ์เบดมีขั้นตอนดังนี้ [7]

- ก. drying เป็นการกำจัดความชื้นในอนุภาคชีวมวลขณะเริ่มต้นรับความร้อนในเตาเผา
- ข. devolatilization เป็นขั้นตอนการสลายตัวของชีวมวลเกิดเป็นสารระเหย
- ค. ignition of volatile เป็นขบวนการที่ทำให้เกิดการจุดประกายของสารระเหยที่ถูกปล่อยออกมา และอยู่ล้อมรอบอนุภาคชีวมวล
- ง. combustion of volatile เป็นขบวนการเผาไหม้สารระเหย ทำให้เกิดเปลวไฟขึ้นรอบอนุภาคชีวมวล
- จ. ignition of char particle เป็นขบวนการจุดประกายบนผิวหน้าของถ่านที่เหลือ โดยเริ่มจากเป็นจุดเล็กๆ ที่ผิวด้านนอก แล้วค่อยๆ ขยายออกไปจนเกิดทั่วทั้งอนุภาค
- ฉ. combustion of residual char particle เป็นขบวนการเผาไหม้อนุภาคถ่านที่เหลือ หลังจากที่สารระเหยระเหยออกจากอนุภาคชีวมวลบางส่วนหรือหมดแล้ว เมื่อเผาไหม้หมดจะเหลือขี้เถ้า

ระบบการเผาไหม้โดยใช้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเผาไหม้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้ดี ให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ดี สามารถควบคุมมลพิษได้ง่าย

การเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไดซ์เบดเกิดขึ้นโดยเชื้อเพลิงจะถูกพองให้ลอยตัวด้วยก๊าซหรืออากาศที่เข้าสู่เตาโดยผ่านแผ่นกระจายลม เชื้อเพลิงจะมีสภาพคล้ายของไหล ภายในเตาเผาจะมีเบดที่ร้อน เช่น ทราย หรือเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ เพื่อช่วยทำให้เกิดการผสมผสานของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดี และช่วยทำให้เถ้าที่เกาะกับผิวเชื้อเพลิงนั้นหลุด ผิวของเชื้อเพลิงจึงสามารถสัมผัสกับออกซิเจนได้ตลอดเวลาทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี ซึ่งจะต่างจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งทั่วไป ซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ที่ผิวของเชื้อเพลิงก่อน จากนั้นบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาก็จะค่อยๆ เคลื่อนเข้าไปข้างใน โดยส่วนที่เหลือที่เกิดจากการเผาไหม้คือ เถ้าซึ่งเป็นสารเฉื่อยทำให้เชื้อเพลิงมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนลดลง ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเผาไหม้จะค่อยๆ ลดลงจนเผาไหม้หมดทั้งก้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของการเผาไหม้ของชีวมวล ซึ่งได้แก่ ฟางข้าว เปลือกถั่วลิสง และกากมันสำปะหลัง ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

2. อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง



รูปที่ 1 เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด

ระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ประกอบด้วย

- เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ดังแสดงดังรูปภาพที่ 1 เป็นเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 45 x 45 ซม. มีเบด ทราฮายสูง 15 ซม. เนื้อที่กระจายลม สามารถปรับอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงได้โดยการเปลี่ยนความเร็วรอบของสกรูป้อนเชื้อเพลิง
- อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิในเบดและเหนือเบด
- อุปกรณ์วัดอัตราการไหล ใช้ Orifice
- Bomb Calorimeter เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ แบบ adiabatic jacket ยี่ห้อ IKA รุ่น C4000
- เครื่องตรวจก๊าซแบบ Chemical Cell ยี่ห้อ ENERAC Model 2000 E เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบส่วนผสมของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยก๊าซที่วิเคราะห์หาได้แก่ O_2 , CO , CO_2 , NO , NO_x และ SO_2
- เตาเผาไฟฟ้า เป็นเตาเผาที่สามารถปรับอุณหภูมิและสามารถตั้งเวลาได้ ยี่ห้อ "LENTON FURNACE" รุ่น UAF 1714 เพื่อใช้วิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์สารระเหยและเปอร์เซ็นต์เถ้า

ขั้นตอนการทดลอง

ตอนที่ 1 หาคคุณสมบัติของเบดและเชื้อเพลิง

- ก. หาคคุณสมบัติทางกายภาพของเบด
 - หาสัดส่วนช่องว่างของเบด (ϵ_m)
 - หาคความหนาแน่นของทรายที่เป็นเบด
- ข. หาคคุณสมบัติของเชื้อเพลิง
 - หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง โดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ชนิดอะเดียบาติก
 - หาองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง
 - วิเคราะห์หาองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยวิธี PROXIMATE

ตอนที่ 2 หาคความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์

ตอนที่ 3 การเผาไหม้ชีวมวลในฟลูอิดไดซ์เบดโดยศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีต่อการเผาไหม้ชีวมวล

- ก. ทำการอุ่นเบดซึ่งเป็นอนุภาคของทรายขณะเกิดฟลูอิดไดซ์ด้วยก๊าซ LPG จนอุณหภูมิของเบด มีค่าประมาณ 300°C จึงค่อยๆ เริ่มป้อนเชื้อเพลิงลงไป ในเบด อุณหภูมิเบดจะค่อยๆ สูงขึ้นจนได้อุณหภูมิประมาณ 700°C จึงหยุดการให้ความร้อนด้วยก๊าซ LPG ขณะเดียวกันก็เพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงให้สูงขึ้นจนถึงค่าที่กำหนดไว้
- ข. ปรับอัตราการป้อนของอากาศให้คงที่ค่าหนึ่งที่ต้องการ รอจนเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) แล้วบันทึกค่าต่างๆ พร้อมเก็บตัวอย่าง ดังนี้
 - อัตราการป้อนอากาศ ต่อ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง
 - อุณหภูมิในเบด ที่ตำแหน่งต่างๆ
 - ก๊าซไอเสียตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ หา CO , CO_2 , O_2 , NO และ NO_x ที่ออกจากเตาเผา
 - ปริมาณเถ้าที่ออกจากเตาเผา และใน Cyclone
- ค. ทำการเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศ อีก 5 ค่าโดยไม่เปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิง
- ง. จากนั้นเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิง แล้วทำการทดลองใหม่ตั้งแต่ข้อ ก-ค ตามลำดับ พร้อมวัดค่าต่างๆ เช่นเดิม

ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิต่าง ๆ เป็นดังนี้

ตำแหน่งที่ 1	วัดอุณหภูมิในเบด	ที่ระยะ	20 เซนติเมตร	เหนือท่อกระจายลม
ตำแหน่งที่ 2	วัดอุณหภูมิในเตา	ที่ระยะ	40 เซนติเมตร	เหนือท่อกระจายลม
ตำแหน่งที่ 3	วัดอุณหภูมิในเตา	ที่ระยะ	55 เซนติเมตร	เหนือท่อกระจายลม
ตำแหน่งที่ 4	วัดอุณหภูมิในเตา	ที่ระยะ	80 เซนติเมตร	เหนือท่อกระจายลม
ตำแหน่งที่ 5	วัดอุณหภูมิในเตา	ที่ระยะ	100 เซนติเมตร	เหนือท่อกระจายลม
ตำแหน่งที่ 6	วัดอุณหภูมิในเตา	ที่ระยะ	110 เซนติเมตร	เหนือท่อกระจายลม
ตำแหน่งที่ 7	วัดอุณหภูมิในเตา	ที่ระยะ	140 เซนติเมตร	เหนือท่อกระจายลม
ตำแหน่งที่ 8	วัดอุณหภูมิในเตา	ที่ระยะ	210 เซนติเมตร	เหนือท่อกระจายลม

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลของการหาคุณสมบัติของเบดที่เป็นทราย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเบดทรายที่ใช้

ข้อมูล	ผลการทดลอง
เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเบดทราย (μ_m)	322.75
ความหนาแน่น (g/cm^3)	2.22
สัดส่วนช่องว่าง (ϵ_m)	0.38
ค่าความกลม (ϕ)	0.95

ผลการหาคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

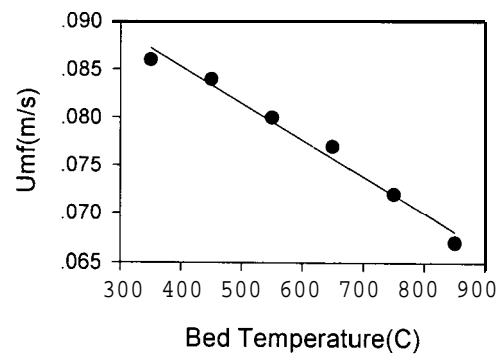
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ด้วย proximate analysis (as received)

คุณลักษณะ	สารชีวมวล		
	ฟางข้าว (ยาว 1.82 cm)	เปลือกถั่วลิสง (ซีก)	กากมันสำปะหลัง (ก้อน, เม็ด)
ความชื้น (%)	10.10	11.40	12.21
เถ้า (%)	17.64	4.97	3.19
สารระเหย (%)	60.00	73.72	78.55
คาร์บอนคงตัว (%)	12.26	9.91	6.05
ค่าความร้อน (db kcal/kg)	3690.25	4438.37	4197.07

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของธาตุในสารชีวมวล (ultimate analysis)

ธาตุ	สารชีวมวล		
	ฟางข้าว (ยาว 1.82 cm)	เปลือกถั่วลิสง (ซีก)	กากมันสำปะหลัง (ก้อน, เม็ด)
C	38.38	41.71	39.39
H	6.19	6.23	6.90
N	0.91	1.06	0.33
S	0.92	0.33	0.14
O	25.86	34.30	37.84
Ash	17.64	4.97	3.19

ผลการหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด

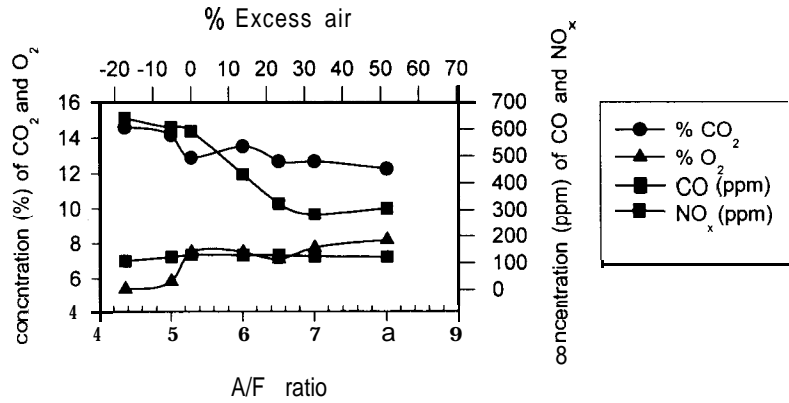


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ (Umf) กับอุณหภูมิเบด

4. วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ที่มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้

เมื่อทดลองป้อนเชื้อเพลิงกากมันสำปะหลังที่ 15 กิโลกรัม ต่อชั่วโมง จากผลการทดลองซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 พบว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมีค่า 4.36 : 1 - 8 : 1 มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซที่ออกจากเตาดังนี้



รูปที่ 3 ปริมาณก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กากมันสำปะหลัง

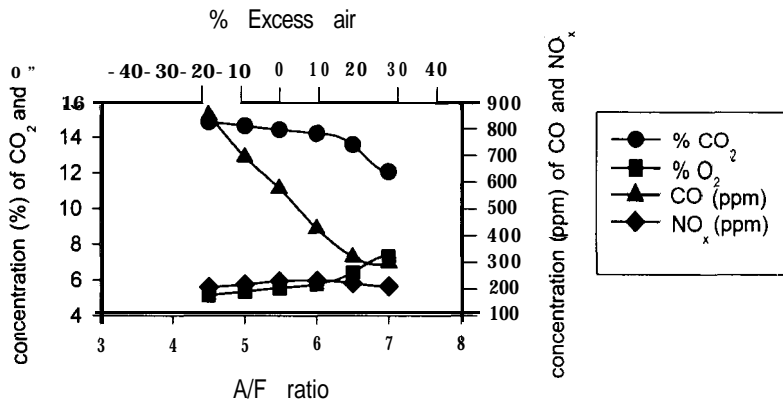
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มค่อนข้างจะลดลงเล็กน้อยในช่วง 14.59 -12.24 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น ปริมาณก๊าซออกซิเจน และปริมาณ ก๊าซไนโตรเจนในไอเสียจะมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จึงทำให้ %CO₂ ลดลงเล็กน้อย

ก๊าซออกซิเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 5.42-8.19 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากการป้อนอากาศ เข้าเตาเผาเพิ่มจนเกินพอดีตั้งแต่ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 5.28

ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งคงที่ที่ประมาณ 300 ppm ทั้งนี้เพราะเมื่อ อัตราการไหลของอากาศมากขึ้น การเผาไหม้จะเกิดสมบูรณ์มากขึ้น ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิด บริเวณผิวของเชื้อเพลิงก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่เกินพอเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทน ส่วนเหตุผลที่เมื่ออากาศเพิ่มขึ้นแล้วจนถึงค่าค่าหนึ่ง ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ค่อนข้างจะคงที่แทนที่จะลดลงโดยทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อาจ เป็นเพราะเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ซึ่งทำให้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์กับออกซิเจนสั้นลงไม่เพียงที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้จนหมด ดังนั้น ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จึงเหลืออยู่มากขึ้น (ระยะเวลาสั้นลงมากขึ้น) ในขณะที่อากาศมีมากขึ้น ในอัตราที่ทำให้ความเข้มข้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ออากาศมีค่าค่อนข้างคงที่

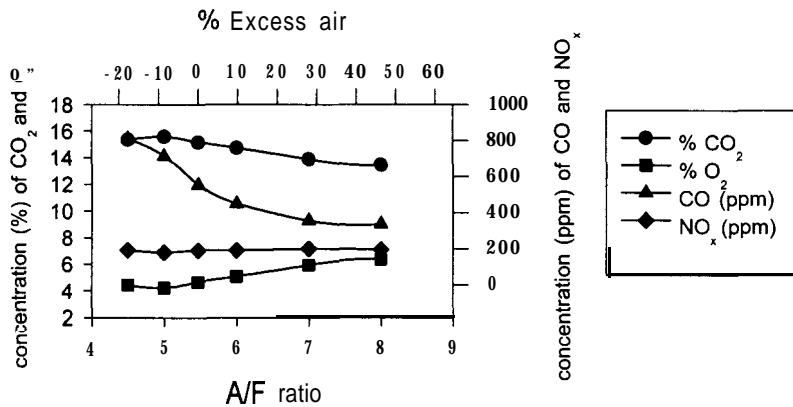
ก๊าซ NO_x มีปริมาณน้อยอยู่ในระดับต่ำที่ค่าประมาณ 120 ppm จะเห็นว่ามีค่าอยู่ในระดับต่ำ อันเนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้ไม่สูงเกินไป (ก๊าซไนโตรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็น NO_x ได้จะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000°C)

สำหรับการเผาไหม้ถั่วลิสงผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 4.5-7.0 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มคงที่ถึงลดลงเล็กน้อยในช่วง 14.87-12.09 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มสูงขึ้นตั้งแต่ 5.14-7.35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เหตุผลเช่นเดียวกับผลการศึกษากาหมันสำปะหลัง ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงและคงที่เท่ากับ 290 ppm ปริมาณก๊าซ NO_x มีปริมาณต่ำอยู่ในระดับ 200 ppm



รูปที่ 4 ปริมาณก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เปลือกถั่วลิสง

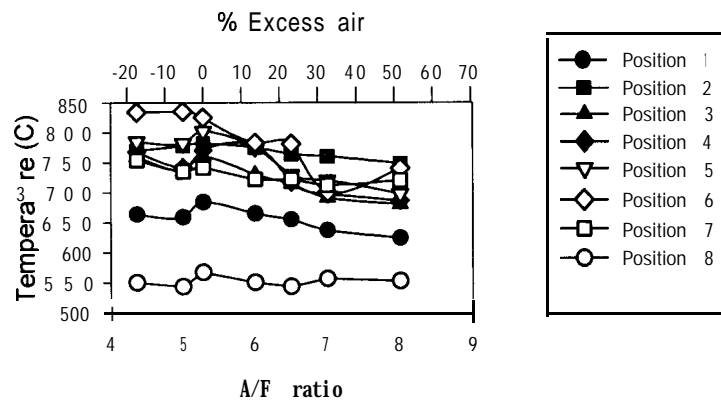
และจากผลการทดลองตามรูปที่ 5 ที่อัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นฟางข้าว อยู่ในช่วง 4.5-8.0% โดยปริมาตร ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงในช่วง 15.36-13.44% โดยปริมาตร ปริมาณก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 4.43-6.35% โดยปริมาตร สามารถอธิบายเหมือนการเผาไหม้กากมันสำปะหลัง ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งคงที่ที่ 340 ppm ปริมาณก๊าซ NO_x มีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 200 ppm แม้ว่าจะเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิง



รูปที่ 5 ปริมาณก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ฟางข้าว

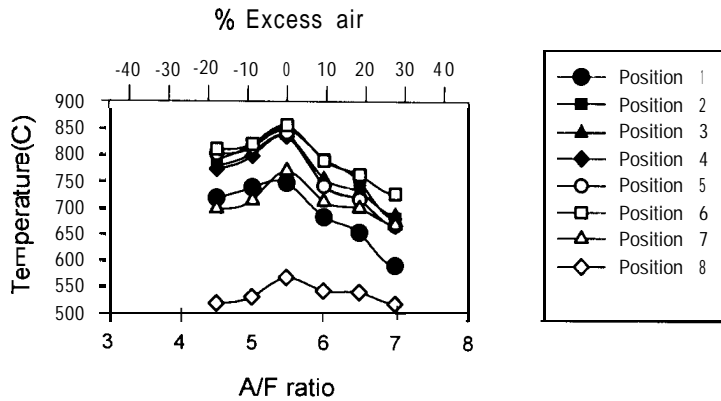
4.2 อิทธิพลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในเตาเผา

จากรูปที่ 6 เมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของกากมันสำปะหลังที่ 5.28 : 1 (ณ จุด stoichiometric) อุณหภูมิภายในเตาขณะนั้นจะสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ค่านี้ ก๊าซออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาพอดีกับปริมาณเชื้อเพลิงจึงทำให้เกิดความร้อนจากการเผาไหม้ได้สูงสุด อุณหภูมิภายในเบตจึงสูง แต่เมื่ออัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงมีค่าเกินจากนี้ไป อุณหภูมิภายในเบตมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนบางส่วนสูญเสียไปกับอากาศ โดยปริมาณความร้อนที่สูญเสียนี้จะแปรตามปริมาณอากาศที่มากเกินไป ส่วนที่อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ค่าต่ำกว่าจุดนี้ อุณหภูมิจะลดลง โดยจะแปรตามปริมาณอากาศที่ลดลง เนื่องจากเมื่ออากาศลดลงทำให้การเดินของเบตรุนแรงและปั่นป่วนน้อยลง ออกซิเจนจึงทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับเชื้อเพลิงได้ช้าลงและออกซิเจนไม่เพียงพอเมื่อปริมาณอากาศต่ำกว่าที่จุด stoichiometric ในการพิจารณาดำเนินการต่างๆ ในเตาเผาจะพบว่าที่ตำแหน่งที่ 5 และ 6 อุณหภูมิสูงที่สุด เนื่องจากเชื้อเพลิงมีปริมาณสารระเหยมากถึง 78% สารระเหยอยู่ในรูปก๊าซจึงถูกอากาศพาขึ้นไปเผาไหม้บริเวณเหนือเบตที่ตำแหน่ง 5 และ 6 ดังนั้นที่ตำแหน่งนี้จึงมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น เพราะองค์ประกอบของสารระเหยในเชื้อเพลิงมีค่าสูงกว่าองค์ประกอบที่อยู่ในรูปของแข็งซึ่งเผาไหม้อยู่ในเบต



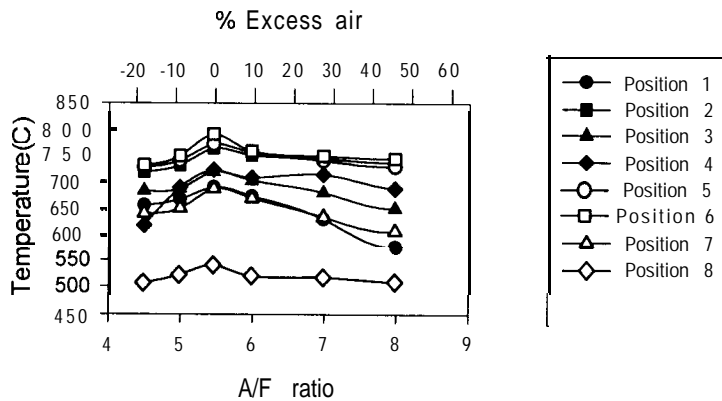
รูปที่ 6 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาจากการเผาไหม้กากมันสำปะหลัง

ทำนองเดียวกันเมื่อเชื้อเพลิงเป็นเปลือกถั่วลิสงผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7 อัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงตรงจุด stoichiometric ที่ 5.48 : 1 อุณหภูมิภายในเตาขณะนั้นจะสูงที่สุด อุณหภูมิภายในเบตอยู่ในช่วง 849-720°C



รูปที่ 7 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาจากการเผาไหม้เปลือกถั่วลิสง

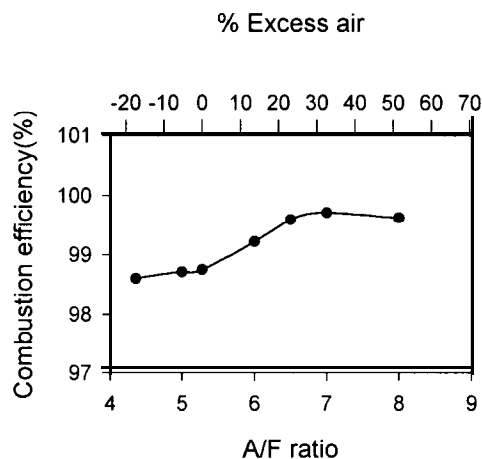
และจากผลการทดลองตามรูปที่ 8 พบว่าที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงฟางข้าวตาม stoichiometric 5.47 : 1 อุณหภูมิภายในเตาเผาขณะนั้นสูงที่สุดและอุณหภูมียู่ในช่วง 764-719°C



รูปที่ 8 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาจากการเผาไหม้ฟางข้าว

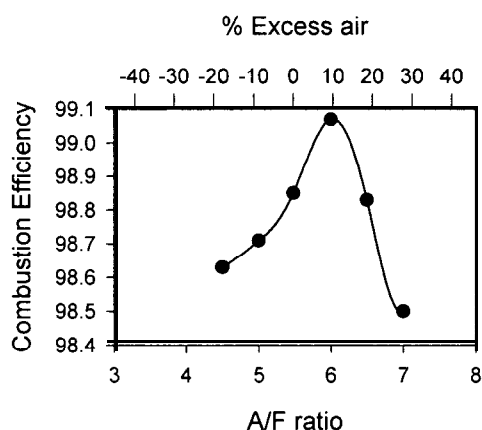
4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

จากรูปที่ 9 เมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของกากมันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะสูงขึ้น จนถึงค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 7.25 : 1 จะทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 99.71% ทั้งนี้เพราะถ้าความเร็วของอากาศเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้เบดถูกกวาดอย่างรุนแรงขึ้น มีการหมุนเวียนสัมผัสกับเชื้อเพลิงดีขึ้นการเผาไหม้ย่อมเกิดได้ดีขึ้น เมื่ออัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงเกินจากนี้ ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ก็เกือบเท่าเดิม หรือลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะความเร็วอากาศที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงบางส่วนในเบดหลุดลอยออกไปยังไซโคลนก่อนที่จะเผาไหม้สมบูรณ์ จึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงนั่นเอง



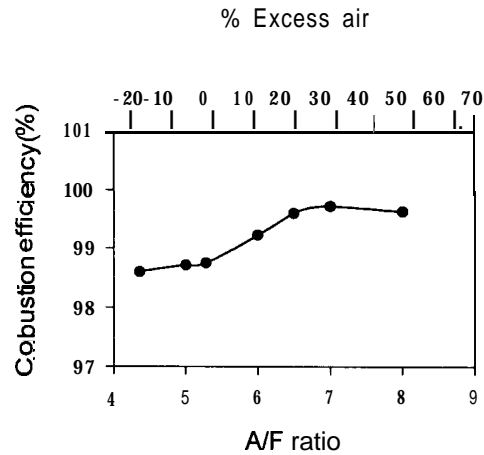
รูปที่ 9 ประสิทธิภาพการเผาไหม้กากมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงกากมันสำปะหลังค่าต่างๆ (kg/kg)

จากรูปที่ 10 เมื่ออัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสงมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะสูงขึ้นตามจนถึงที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 6.0:1 จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 99.07% จากนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้ก็จะลดลงเมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นอธิบายได้เช่นเดียวกับการเผาไหม้กากมันสำปะหลัง



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเปลือกถั่วลิสง ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสงค่าต่างๆ (kg/kg)

และจากรูปที่ 11 เมื่ออัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงฟางข้าวมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะสูงขึ้น จนถึงอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสม 7.15:1 ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด 97.92% ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกากมันสำปะหลัง เปลือกถั่วลิสงและฟางข้าว



รูปที่ 11 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของฟางข้าว
ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงฟางข้าวค่าต่างๆ (kg/kg)

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้สูงสุดของกากมันสำปะหลัง เปลือกถั่วลิสงและฟางข้าวเท่ากับ 99.71%, 99.07% และ 97.94% ตามลำดับซึ่งจะเห็นได้ว่ากากมันสำปะหลังเผาไหม้ได้ประสิทธิภาพสูงกว่าเปลือกถั่วลิสงและฟางข้าว ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักจำเพาะของกากมันสำปะหลังมากกว่าน้ำหนักจำเพาะของเปลือกถั่วลิสงและฟางข้าว ตามลำดับ จึงทำให้กากมันสำปะหลังมีเวลาเผาไหม้อยู่ในเบดได้นานกว่าเปลือกถั่วลิสงและฟางข้าวก่อนที่จะถูกพัดพาออกจากเตา ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงสูงกว่า

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาสมรรถนะของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด โดยทดลองเผาชีวมวลต่างๆ ในสภาวะที่กำหนด ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ กากมันสำปะหลังลักษณะเป็นเม็ดเปลือกถั่วลิสงลักษณะเป็นซีก และฟางข้าวตัดเป็นท่อนยาว 1.82 ซม. ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ของกากมันสำปะหลัง มีค่าเท่ากับ 7.25:1 และประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ 99.71% ที่อุณหภูมิเบดมีค่าเท่ากับ 760°C ชนิดของเชื้อเพลิงเองก็มีผลต่ออุณหภูมิของการเผาไหม้ โดยมีอิทธิพลต่ออัตราการเผาไหม้ และอาจทำให้อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดต่างกันออกไปบ้าง ในกรณีที่เผาเปลือกถั่วลิสงอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 6.0:1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ 99.07% อุณหภูมิ 780°C และกรณีที่เผาฟางข้าวอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 7.15:1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 97.92% อุณหภูมิเบด 740°C

2. มลภาวะที่เกิดจากเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ นั้น ปริมาณก๊าซพิษ NO_x ที่ปล่อยออกจากเตามีปริมาณต่ำ โดยไม่เกิน 250 ppm ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิของการเผาไหม้ไม่สูงเกินไปนั่นเอง

เอกสารอ้างอิง

1. ฐานันดร สดแสงสุข, 2537, การศึกษาหม้อไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดขนาดเล็ก วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 18.
2. เฉลิมพร อยู่ประเทศ, 2537, จลนศาสตร์ของการไฟโลไรซิสสารชีวมวล วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 1-3.
3. Bhattacharya, S.C. and Ran M. Shrestha, 1990, "Biocoal Technology and Economic," pp. 282-290, 249.
4. เบ็ญจวรรณ วณิชยาเอนทร์, 2537, การพัฒนาระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
5. Kunii, D. and Levenspiel, O., 1969, *Fluidization Engineering*, New York, John Wiley & Sons, pp. 108-137.
6. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2524, ฟลูอิดไดซ์เซชัน, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) หน้า 161-189.
7. ณฤทัย มงคลเลิศศิริกุล, 2537, การศึกษาคูณลักษณะเฉพาะของลิกไนต์ในประเทศไทยสำหรับเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 5.