

ผลของอัตราส่วนระหว่างซิลิกาและอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบ
ฟลูอิดไธด์เบตของฟางข้าว

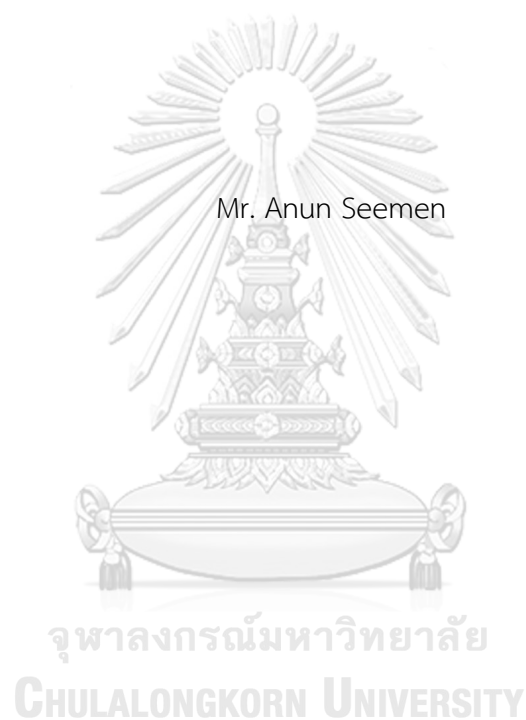


บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of silica and alumina ratio on bed agglomeration during fluidized bed gasification
of rice straw



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของอัตราส่วนระหว่างซิลิกาและอะลูมินาต่อการรวมตัว
กันของเบตไนในกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์
เบตของฟางข้าว
โดย นายอานันท์ สีหม่น
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ดวงเดือน อางองค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เชาวกิจเจริญ)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ดวงเดือน อางองค์)
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.คณิต สูงประสิทธิ์)

อานันท์ สีหะมน : ผลของอัตราส่วนระหว่างซิลิกาและอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบดในกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบดของฟางข้าว (Effect of silica and alumina ratio on bed agglomeration during fluidized bed gasification of rice straw) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.ดวงเดือน อางองค์, 91 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างซิลิกาและอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบดในกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบดของฟางข้าว ทำการศึกษาที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ฟางข้าวขนาด 425 ถึง 850 ไมโครเมตร อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 700 ถึง 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 โดยวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบดที่เกิดการรวมตัวกันด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ (SEM/EDX) ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส สามารถรักษาสภาพฟลูอิดไคซ์เบดได้ในเวลานานที่สุดที่ 60 นาที นอกจากนี้ เมื่อศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบดพบว่า อัตราส่วนสมมูลส่งผลต่อการรวมตัวกันของเบดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเท่านั้น และจากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบดที่เกิดการรวมตัวกัน พบองค์ประกอบของ Si K และ Ca เป็นองค์ประกอบหลักตรงบริเวณจุดที่มีการเชื่อมต่อของอนุภาคเบดในทุกอัตราส่วนของอะลูมินาเบดและทุกอุณหภูมิ ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบของสารจุดหลอมเหลวต่ำ $K_2O-CaO-SiO_2$ ขณะที่บริเวณพื้นผิวของอะลูมินาพบองค์ประกอบของ Si K และ Ca ในปริมาณเล็กน้อย และเมื่อศึกษาก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันของฟางข้าว ซึ่งประกอบไปด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน พบว่าเมื่อทำการทดสอบอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน แต่ทำให้เวลาในการรักษาสภาพฟลูอิดไคซ์เบดสั้นลง ซึ่งผลจากการทดลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการเดินระบบระบบฟลูอิดไคซ์เบดในระดับอุตสาหกรรมได้ เพื่อลดการรวมตัวกันของเบดและช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5770483021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: AGGLOMERATION / FLUIDIZED BED / GASIFICATION / SILICA AND ALUMINA / RICE STRAW

ANUN SEEMEN: Effect of silica and alumina ratio on bed agglomeration during fluidized bed gasification of rice straw. ADVISOR: ASSOC. PROF. VIBOON SRICHAROENCHAIKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: DUANGDUEN ATONG, Ph.D., 91 pp.

Bed agglomeration is one of an interesting phenomenon during fluidized bed gasification. In this study, the effect of the proportion of silica to alumina bed (0, 25, 50, 75 and 100 %) to bed behavior during fluidized bed gasification of rice straw was investigated. Operating parameters were rice straw particle size of 425-850 μm , reaction temperature of 700 to 900°C, and equivalence ratio of 0.2 and 0.4. The results indicated that alumina bed proportion of 100 % at 700 °C had extended defluidization time of 60 minutes. Moreover, the effect of equivalence ratio on bed agglomeration apparently heightened at 900°C. The result of SEM/EDX analysis showed that major elements at linkage point of agglomerated particle were Si K and Ca at any proportion of alumina bed and temperature. These elements were ingredients in low melting point eutectic mixtures of $\text{K}_2\text{O-CaO-Si}_2\text{O}$. In contrast, small composition of Si K and Ca were detected on alumina surface. Finally, gas product from this thermal conversion process mainly consisted of CO, CO_2 , H_2 and CH_4 . Higher temperature led to greater CO and H_2 yields. The results from this investigation can be applied to industrial biomass fluidized bed gasification where bed agglomeration is frequent and required costly maintenance.

Department: Environmental
Engineering

Student's Signature

Advisor's Signature

Field of Study: Environmental
Engineering

Co-Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือ ตลอดจนช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวงกตเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล และ ดร. คณิต สูงประสิทธิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยอบรม สั่งสอนและถ่ายทอดวิชาความรู้ต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย ตลอดจนขอบคุณนักวิจัยและช่างเทคนิคทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการวิจัย

ขอบคุณมิตรภาพดี ๆ จากพี่ ๆ และเพื่อน ๆ ลูกศิษย์อาจารย์วิบูลย์ทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอบคุณเพื่อน ๆ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและทุกคนในครอบครัว สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนประสบความสำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermo-chemical Processes).....	3
2.1.1 การเผาไหม้ (Combustion).....	3
2.1.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	3
2.1.3 แกซิฟิเคชัน (Gasification).....	4
2.2 กลไกของแกซิฟิเคชันและปฏิกิริยาเคมี.....	4
2.3 ประเภทเตาแกซิฟาย.....	5
2.3.1 เตาแกซิฟายระบบฟิกส์เบด (Fixed bed).....	5
2.3.2 เตาแกซิฟายระบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed).....	7
2.4 ฟลูอิดไคเซชัน (Fluidization).....	9
2.4.1 ระบบของฟลูอิดไคเซชัน (Regime of fluidization).....	10

2.4.2 การคำนวณความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเดชัน (Minimum fluidizing velocity).....	12
2.5 การรวมตัวกัน (Agglomeration)	14
2.5.1 กลไกของการรวมตัว.....	15
2.5.2 วิธีการตรวจวัดแนวโน้มการรวมตัวกันของเบด.....	20
2.6 วัสดุเบด (Bed material)	21
2.6.1 อะลูมินา (Al ₂ O ₃).....	21
2.6.2 ซิลิกา (SiO ₂).....	22
2.7 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.8.1 ศึกษาการนำฟางข้าวมาใช้ในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไอเดชันเบด.....	25
2.8.2 ศึกษาวัสดุเบดที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไอเดชันเบด	27
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	31
3.1.1 วัสดุและสารเคมี.....	31
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	33
3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์.....	34
3.2 การเตรียมวัตถุดิบ.....	35
3.3 การเตรียมเตาแก๊สไฟ.....	36
3.4 การดำเนินการทดลอง	38
3.4.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านความร้อนของฟางข้าว	38
3.4.2 ศึกษาการรวมตัวกันของเบดในกระบวนการแก๊สเคชันของฟางข้าวที่สภาวะต่างๆ.....	38
3.4.3 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบดที่เกิดการรวมตัวกัน	39

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.1 ผลองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านความร้อนของฟางข้าว	40
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว	40
4.1.2 คุณสมบัติด้านความร้อนของฟางข้าว	42
4.2 ผลการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซีฟิเคชันของฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ.....	42
4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการรวมตัวกันของเบต	42
4.2.2 ผลของอัตราส่วนอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบต	44
4.2.3 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบต.....	47
4.3 ผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบตที่เกิดการรวมตัวกัน.....	49
4.3.1 อัตราส่วนสมมูล 0.2.....	50
4.3.2 อัตราส่วนสมมูล 0.4.....	54
4.4 ผลวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันของฟางข้าวที่สภาวะต่างๆ.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
รายการอ้างอิง	75
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	84
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	91

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1	เตาแก๊สฟายระบบฟลักซ์เบดแบบไหลขึ้น	6
ภาพที่ 2.2	เตาแก๊สฟายระบบฟลักซ์เบดแบบไหลลง	7
ภาพที่ 2.3	เตาแก๊สฟายระบบฟลูอิดไคซ์เบดฟองอากาศ	8
ภาพที่ 2.4	เตาแก๊สฟายระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน	9
ภาพที่ 2.5	ระบบอุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดไคซ์	10
ภาพที่ 2.6	แสดงการรวมตัวกันของเบดจากการเคลือบ	14
ภาพที่ 2.7	แสดงการรวมตัวกันของเบดจากการการหลอมเหลว	15
ภาพที่ 2.8	การแบ่งกลุ่มขนาดอนุภาคของ	16
ภาพที่ 2.9	กระบวนการการแยกชั้นและการเสียสภาพฟลูอิดไคซ์	17
ภาพที่ 2.10	ระบบของ $K_2O-CaO-SiO_2$	18
ภาพที่ 2.11	ระบบของ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$	19
ภาพที่ 2.12	กลไกการรวมตัวกันของเถ้าและวัสดุเบด	20
ภาพที่ 2.13	การเปลี่ยนแปลงความความดันในระบบฟลูอิดไคซ์เบด	21
ภาพที่ 3.1	ซิลิกา (ก) และอะลูมินา (ข)	32
ภาพที่ 3.2	ฟางข้าว	32
ภาพที่ 3.3	มานอมิเตอร์	33
ภาพที่ 3.4	เครื่องแปลงสัญญาณเพื่อแสดงผลอุณหภูมิ	33
ภาพที่ 3.5	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Portable infrared Coal gas Analyzer)	34
ภาพที่ 3.6	เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
ภาพที่ 3.7	ฟางข้าวขนาด 425-850 ไมโครเมตร	35
ภาพที่ 3.8	แผนผังเตาแก๊สฟลักซ์ฟลูอิดไคซ์เบด	37
ภาพที่ 3.9	ส่วนประกอบของเตาแก๊สฟลักซ์ฟลูอิดไคซ์เบด	37

ภาพที่ 3.10	แผนภาพการทดลองกระบวนการแกซีพีเคชั้นของฟางข้าว.....	39
ภาพที่ 4.1	ผลของของอุณหภูมิต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และอัตราส่วน อะลูมินาต่าง ๆ.....	43
ภาพที่ 4.2	ผลของของอุณหภูมิต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และอัตราส่วน อะลูมินาต่าง ๆ.....	43
ภาพที่ 4.3	ผลของอัตราส่วนอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และที่ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	45
ภาพที่ 4.4	ผลของอัตราส่วนอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และที่ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	45
ภาพที่ 4.5	ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และที่อัตราส่วนอะลูมินาต่าง ๆ.....	47
ภาพที่ 4.6	ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และ ที่อัตราส่วนอะลูมินาต่าง ๆ.....	48
ภาพที่ 4.7	ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และ ที่อัตราส่วนอะลูมินาต่าง ๆ.....	48
ภาพที่ 4.8	SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบดรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50.....	50
ภาพที่ 4.9	SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบดรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75.....	51
ภาพที่ 4.10	SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบดรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25.....	52
ภาพที่ 4.11	SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบดรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50.....	52
ภาพที่ 4.12	SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบดรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 100.....	53
ภาพที่ 4.13	SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบดรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0.....	54

ภาพที่ 4.14 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบรรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50.....	55
ภาพที่ 4.15 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบรรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25.....	55
ภาพที่ 4.16 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบรรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75.....	56
ภาพที่ 4.17 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบรรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50.....	57
ภาพที่ 4.18 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบรรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75.....	57
ภาพที่ 4.19 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบรรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 100.....	58
ภาพที่ 4.20 แผนภาพ $K_2O-CaO-SiO_2$ แสดงอุณหภูมิยูเทคติกที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 โดยจุดสีแดง จุดสีเขียวและจุดสีน้ำเงิน แสดงถึงอุณหภูมิในการทดลองที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ.....	61
ภาพที่ 4.21 แผนภาพ $K_2O-CaO-SiO_2$ แสดงอุณหภูมิยูเทคติกที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 โดยจุดสีแดง จุดสีเขียวและจุดสีน้ำเงิน แสดงถึงอุณหภูมิในการทดลองที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ.....	62
ภาพที่ 4.22 แผนภาพ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ แสดงอุณหภูมิยูเทคติกที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 โดยจุดสีแดง จุดสีเขียวและจุดสีน้ำเงิน แสดงถึงอุณหภูมิในการทดลองที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ	63
ภาพที่ 4.23 แผนภาพ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ แสดงอุณหภูมิยูเทคติกที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 โดยจุดสีแดง จุดสีเขียวและจุดสีน้ำเงิน แสดงถึงอุณหภูมิในการทดลองที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ	64
ภาพที่ 4.24 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 0	65

ภาพที่ 4.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 25.....	66
ภาพที่ 4.26 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 50.....	66
ภาพที่ 4.27 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 75.....	67
ภาพที่ 4.28 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 100.....	67
ภาพที่ 4.29 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 0.....	68
ภาพที่ 4.30 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 25.....	69
ภาพที่ 4.31 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 50.....	69
ภาพที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 75.....	70
ภาพที่ 4.33 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 100.....	70

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ลักษณะและสมบัติของซิลิกาและอะลูมินา	22
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านความร้อนของฟางข้าว.....	24
ตารางที่ 2.3	การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของชีวมวล.....	24
ตารางที่ 2.4	องค์ประกอบเถ้าของชีวมวล.....	25
ตารางที่ 3.1	สมบัติของซิลิกาและอะลูมินาที่ใช้ในการทดลอง.....	32
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของฟางข้าว	41
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	41
ตารางที่ 4.3	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบสารอินทรีย์ของฟางข้าว	41
ตารางที่ 4.4	ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของฟางข้าว	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ จะเห็นได้จากรายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทยประจำปี 2557 พบว่า ชีวมวลมีศักยภาพในการเป็นแหล่งพลังงานมากกว่าแหล่งพลังงานทดแทนอื่น ๆ เช่น แสงอาทิตย์ ลม ชยะและก๊าซชีวภาพ เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) โดยชีวมวลเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย ชังข้าวโพด แกลบ และฟางข้าว เป็นต้น จากข้อมูลการเพาะปลูกปี 2556 มีการนำฟางข้าวไปใช้ประโยชน์เพียงร้อยละ 43 จากปริมาณฟางข้าวทั้งหมด 19 ล้านตัน ทำให้มีฟางข้าวมากกว่า 10 ล้านตันที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นฟางข้าวจึงเป็นชีวมวลชนิดหนึ่งสมควรส่งเสริมให้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อหลีกเลี่ยงก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศจากเผาฟางข้าวของเกษตรกรหลังจากฤดูกาลเก็บเกี่ยวและส่งเสริมให้นำมาใช้ในด้านพลังงานทดแทนมากยิ่งขึ้น

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีระบบฟลูอิดไคซ์เบดมาแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงานทั้งในรูปพลังงานความร้อนและก๊าซ เนื่องจากระบบฟลูอิดไคซ์เบดมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิในระบบเตาปฏิกรณ์ได้ดี และมีงานวิจัยที่ศึกษาการนำฟางข้าวมาแปรสภาพเป็นพลังงานโดยระบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยการเผา (Combustion) และการแกซิฟิเคชัน (Gasification) (Chaivatamaset และคณะ, 2014; Liu และคณะ, 2009; Yu และคณะ., 2011; Calvo และคณะ, 2012) แต่อย่างไรก็ตามการนำฟางข้าวมาแปรสภาพด้วยระบบฟลูอิดไคซ์เบดยังมีข้อจำกัดคือ เกิดการรวมกันของเบด (Bed agglomeration) ซึ่งปัญหานี้เกิดจากเถ้าของฟางข้าว ซึ่งมี SiO_2 K_2O และ CaO เป็นองค์ประกอบ จับตัวกับทรายซิลิกาซึ่งเป็นวัสดุเบดที่นิยมใช้ จึงก่อให้เกิดการรวมตัวกัน ทำให้ระบบอุดตันส่งผลให้ต้องหยุดเดินระบบเพื่อทำการเปลี่ยนเบดใหม่ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายและการบำรุงรักษาเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีการศึกษาแนวทางในการลดการเกิดการรวมตัวกันของเบด การใช้เบดทางเลือก (Alternative bed material) เป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหา โดยการนำเบดทางเลือกใช้แทนที่ทรายซิลิกาซึ่งเป็นเบดที่นิยมใช้เนื่องจากมีราคาถูก เช่น โดโลไมท์ (Dolomite) แคลไซต์ (Calcite) และอะลูมินา (Alumina) เป็นต้น

อะลูมินาเป็นเบดทางเลือกหนึ่งที่มีองค์ประกอบของซิลิกาน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จึงลดความน่าจะเป็นในการเกิดการรวมตัวของเบดได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามราคาของอะลูมินาซึ่งสูงกว่าซิลิกามาก จึงควรนำมาใช้ทดแทนเท่าที่จำเป็นเพื่อลดต้นทุนและในปริมาณเหมาะสม และขณะเดียวกันจะไม่ลดประสิทธิภาพการแปรสภาพชีวมวลอีกด้วย

จากที่ได้กล่าวมาแล้วงานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมระหว่างทรายซิลิกาและอะลูมินาที่เหมาะสมกับการเดินระบบเตาฟลูอิดไธด์โดยใช้ฟางข้าว เพื่อลดปัญหาการเกิดการรวมตัวกันของเบตและยังเป็นการนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.1.1 เพื่อศึกษาสภาวะการรวมตัวกันของเบตทรายซิลิกาและอะลูมินาในกระบวนการแกซีไฟเคชันแบบฟลูอิดไธด์ของฟางข้าว

1.1.2 เพื่อศึกษาสัดส่วนผสมของทรายซิลิกาและ/หรืออะลูมินาที่เหมาะสมกับการเดินระบบแกซีไฟเคชันแบบฟลูอิดไธด์ของฟางข้าว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างซิลิกาและอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซีไฟเคชันแบบฟลูอิดไธด์ ซึ่งเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยดำเนินการวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และห้องปฏิบัติการชั้น 4 ตึกปฏิบัติการรวม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัย คือฟางข้าว วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และศึกษาคุณสมบัติด้านความร้อน

1.3.2 ทำการแปรสภาพฟางข้าวเป็นก๊าซด้วยกระบวนการแกซีไฟเคชันแบบฟลูอิดไธด์เบต เพื่อศึกษาผลการรวมตัวกันของเบตเมื่อใช้ทรายซิลิกาและอะลูมินา

1.3.3 ตรวจสอบวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของการรวมตัวกันของเบตด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ (Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X-Ray Analysis, SEM and EDX)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางเลือกในการลดปัญหาการรวมตัวกันของเบตในการเดินระบบเตาแกซีไฟแบบฟลูอิดไธด์เบต

1.4.2 สามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายในส่วนการบำรุงรักษาเมื่อเกิดการรวมตัวกันของเบตในเตาแกซีไฟระบบฟลูอิดไธด์เบต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวเกี่ยวกับทฤษฎีของกระบวนการเคมีความร้อนที่เกี่ยวกับการแปรสภาพชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวกับชีวมวลรวมถึงเตาปฏิกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังต่อไปนี้

2.1 กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermo-chemical Processes)

กระบวนการแปรสภาพทางเคมีความร้อนใช้ในการแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงาน กระบวนการแปรสภาพทางเคมีความร้อนนี้มี 3 รูปแบบได้แก่ การเผาไหม้ (Combustion) การไพโรไลซิส (Pyrolysis) และแกซิฟิเคชัน (Gasification) ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 การเผาไหม้ (Combustion)

การเผาไหม้เป็นกระบวนการแปรสภาพชีวมวลโดยการใช้ออกซิเจน (ในอากาศ) เพื่อแปรสภาพพลังงานเคมีที่สะสมภายในชีวมวลเป็นความร้อน นอกจากนี้ยังเกิดผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) การเผาไหม้เป็นรูปแบบการแปรสภาพชีวมวลที่นิยมนำมาใช้ผลิตพลังงานในรูปความร้อนทั้งในระดับอุตสาหกรรมหรือการใช้งานทั่วไป โดยชีวมวลหลายชนิดที่สามารถเผาได้โดยในทางปฏิบัติชีวมวลต้องมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 50 นอกจากความชื้นที่เป็นตัวกำหนดการเผาไหม้แล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ได้แก่ อุณหภูมิและปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

2.1.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิสเป็นการสลายตัวทางความร้อนโดยปราศจากออกซิเจน ไม่มีการเติมไอน้ำ ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาปฏิกรณ์ ไพโรไลซิสเป็นขั้นตอนแรกของการเผาไหม้และการแกซิฟายซึ่งจะตามมาด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนหรือทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยา ไพโรไลซิสของชีวมวลเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 350-550 องศาเซลเซียสและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 700 องศาเซลเซียสจะนำไปสู่การผลิตผลิตภัณฑ์ในรูปของเหลวคือน้ำมันทาร์ (Tar) และผลิตภัณฑ์ของแข็งคือถ่านชาร์ (Char) และก๊าซ

2.1.3 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

แก๊สซิฟิเคชันเป็นการแปรสภาพชีวมวลด้วยกระบวนการทางเคมีความร้อน โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะที่จำกัดอากาศ ออกซิเจนหรือไอน้ำ เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซที่เรียกว่า ก๊าซสังเคราะห์ (Syngas or Gas product) ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และมีเทน (CH₄) (Huber และคณะ, 2006)

2.2 กลไกของแก๊สซิฟิเคชันและปฏิกิริยาเคมี

โดยทั่วไปแก๊สซิฟิเคชันประกอบด้วยกลไกมากมาย ซึ่งเกิดในบริเวณต่าง ๆ ดังนี้ คือ บริเวณทำให้แห้ง (Drying zone) บริเวณไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) บริเวณการเผาไหม้ (Oxidation zone) และ บริเวณปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction zone)

1. บริเวณทำให้แห้ง (Drying zone)

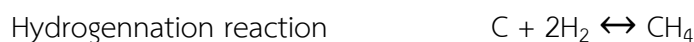
บริเวณทำให้แห้งเป็นขั้นตอนแรกของการแก๊สซิฟิเคชัน การทำให้ชีวมวลที่มีความชื้นร้อยละ 20-50 กลายเป็นชีวมวลแห้งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ชีวมวลที่ถูกให้ความร้อน ความชื้นในชีวมวลจะถูกเปลี่ยนไปไอน้ำ กระบวนการให้ความร้อนและการทำให้แห้งจะเริ่มจากพื้นผิวภายนอกของอนุภาคชีวมวลมาภายใน

2. บริเวณไพโรไลซิส (Pyrolysis zone)

บริเวณไพโรไลซิสคือบริเวณที่มีการย่อยสลายด้วยอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในสภาวะไร้ออกซิเจนด้วยกระบวนการไพโรไลซิส แม้ว่าบางปฏิกิริยาเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิต่ำที่ 225 องศาเซลเซียส กระบวนการเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเสร็จสมบูรณ์ที่อุณหภูมิช่วง 400-500 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้มาพร้อมกับการปลดปล่อยสารระเหย ที่มีสภาพเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำดำเนินการ โดยสารระเหยเมื่ออุณหภูมิลดลงจะแบ่งเป็นส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวคือ น้ำมันทาร์ (Tar) ซึ่งเป็นสารระเหยที่ควบแน่นได้ ส่วนก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไฮโดรเจน (H₂) และไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำ (Light-Hydrocarbons) และผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งคือ ถ่านชาร์

3. บริเวณเผาไหม้ (Oxidation)

เป็นบริเวณที่เกิดกลไกของปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยเกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการไพโรไลซิส โดยปฏิกิริยาหลักซึ่งเปลี่ยนคาร์บอนของแข็งไปเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์



ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนเกิดผลิตภัณฑ์เป็นมีเทนซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ช้าที่สุด ดังนั้นแก๊สซิเคชันจึงมีผลิตภัณฑ์เป็นมีเทนเพียงร้อยละ 5 โดยปริมาตร

4. บริเวณรีดักชัน (Reduction Zone)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เมื่อไหลเข้าสู่บริเวณรีดักชันจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนซึ่งเผาไหม้ได้เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน โดยก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนเกิดปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดเป็นก๊าซมีเทนและน้ำดังสมการ



ปฏิกิริยา Boudouard จะเกิดขึ้นน้อยเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยา water gas shift มีส่วนสำคัญในการเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนภายในก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) ขณะที่ปฏิกิริยา Methanation มีผลอย่างมากต่อก๊าซมีเทนในก๊าซสังเคราะห์

2.3 ประเภทเตาแก๊สฟาย

2.3.1 เตาแก๊สฟายระบบฟิกส์เบด (Fixed bed)

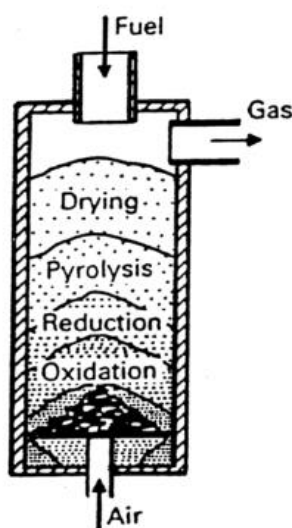
เตาแก๊สฟายระบบฟิกส์เบดโดยทั่วไปผลิตก๊าซสังเคราะห์ค่าความร้อนต่ำ เตาประเภทนี้เหมาะสำหรับการทำให้ใช้งานขนาดกลางและขนาดเล็ก เนื่องจากไม่มีการกวนผสมภายในเตา จึงทำให้อุณหภูมิปฏิกิริยาบริเวณต่างๆภายในเตาไม่เหมือนกัน เตาแก๊สฟายระบบฟิกส์เบดประกอบด้วยแบบไหลขึ้น แบบไหลลง และแบบไหลตามขวาง ซึ่งอธิบายในส่วนต่อไป (Zhang และคณะ, 2010)

2.3.1.1 เตาแก๊สฟายระบบฟิกส์เบดแบบไหลขึ้น (Updraft Gasifier)

เตาแก๊สฟายแบบไหลขึ้นเป็นเตาแก๊สฟายที่ชีวมวลถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตา ขณะที่อากาศถูกป้อนเข้าทางด้านล่าง ชีวมวลและอากาศเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกัน (Countercurrent) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ชีวมวลเคลื่อนที่ลงจะถูกทำให้แห้งเป็นลำดับแรกเมื่อผ่าน

บริเวณทำให้แห้งหลังจากนั้นชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแปรรูปเป็นก๊าซระเหยและถ่านในบริเวณไพโรไลซิส ก๊าซระเหยและถ่านจะเปลี่ยนไปเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนโดยผ่านบริเวณรีดักชัน นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในสถานะก๊าซถูกสร้างจากการเผาไหม้ถ่านเตาแกซีฟายแบบไหลขึ้นสามารถใช้ได้กับชีวมวลที่มีความชื้นสูงได้ (มากกว่าร้อยละ 60) แต่อย่างไรก็ตามก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีน้ำมันทาร์ เนื่องจากจากน้ำมันทาร์เกิดขึ้นในระหว่างไพโรไลซิส โดยไม่มีโอกาสผ่านบริเวณเผาไหม้

Countercurrent



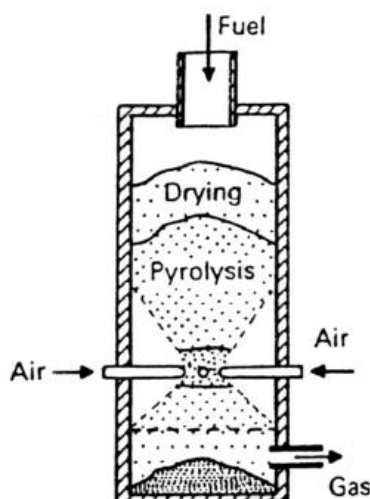
ภาพที่ 2.1 เตาแกซีฟายระบบฟลักซ์เบดแบบไหลขึ้น (Warnecke, 2000)

2.3.1.2 เตาแกซีฟายระบบฟลักซ์เบดแบบไหลลง (Updraft Gasifier)

เตาแกซีฟายแบบไหลลงเป็นเตาระบบฟลักซ์เบดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แตกต่างจากเตาแกซีฟายแบบไหลขึ้น อากาศในเตาแกซีฟายแบบไหลลงถูกนำเข้าสู่เตาบริเวณส่วนกลาง ดังแสดงในภาพที่ 2.2 การออกแบบนี้เพื่อไม่ให้เกิดการย้อนกลับของบริเวณเผาไหม้และบริเวณรีดักชัน ภายในเตานี้ อากาศและชีวมวลที่ถูกป้อนเข้าไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งทำให้บริเวณทำให้แห้งและบริเวณไพโรไลซิส ถูกให้ความร้อนเป็นลำดับแรกด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากชั้นบริเวณเผาไหม้ เมื่อถ่านถูกเผาหลังจากผ่านบริเวณเผาไหม้ ถ่านที่เหลือจะอยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะถูกแปรรูปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน เมื่อเปรียบเทียบกับเตาแกซีฟายแบบไหลขึ้น การสร้างถ่าน

จากการไพโรไลซิสโดยผ่านบริเวณรีดักชันสามารถถูกทำลายโดยการแตกตัวด้วยอุณหภูมิ ในที่สุดแล้วจะได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ ที่มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณน้ำมัน

Cocurrent



ภาพที่ 2.2 เตาแก๊สไฟระบบฟลักซ์เบดแบบไหลลง (Warnecke,2000)

2.3.1.3 เตาแก๊สไฟระบบฟลักซ์เบดแบบไหลตามขวาง (Crossdraft gasifier)

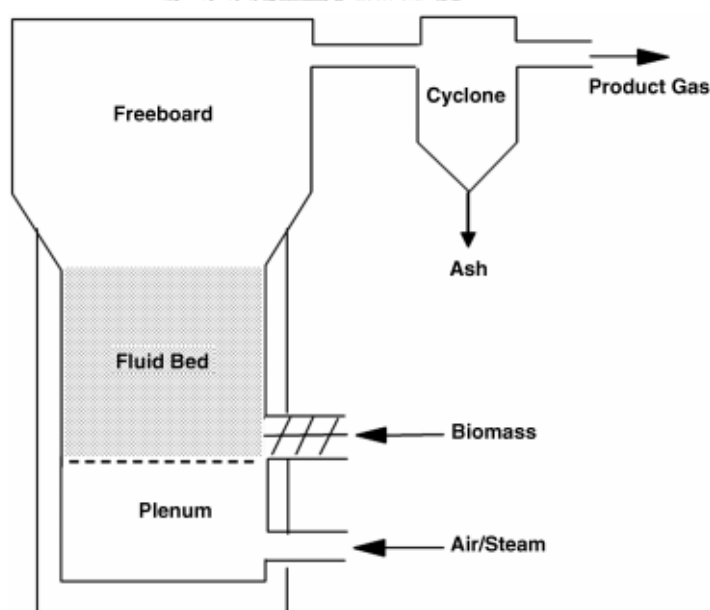
เตาแก๊สไฟแบบไหลตามขวาง ชีวมวลถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตาและเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่าง อากาศถูกป้อนเข้าจากด้านหนึ่งของเตาและก๊าซผลิตภัณฑ์ถูกปล่อยออกอีกทางด้านหนึ่งของเตาในระนาบเดียวกัน บริเวณเผาไหม้ (Combustion Zone) อยู่ในบริเวณที่อากาศถูกป้อนเข้า ส่วนบริเวณทำให้แห้งและบริเวณไพโรไลซิสอยู่เหนือที่อนำเข้าอากาศ

2.3.2 เตาแก๊สไฟระบบฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized bed)

เตาแก๊สไฟระบบฟลูอิดไธซ์เบดเป็นเตาที่ถูกใช้อย่างกว้างขวาง เตาแบบนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized bed) และแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed)

2.3.2.1 เตาแก๊สฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized bed)

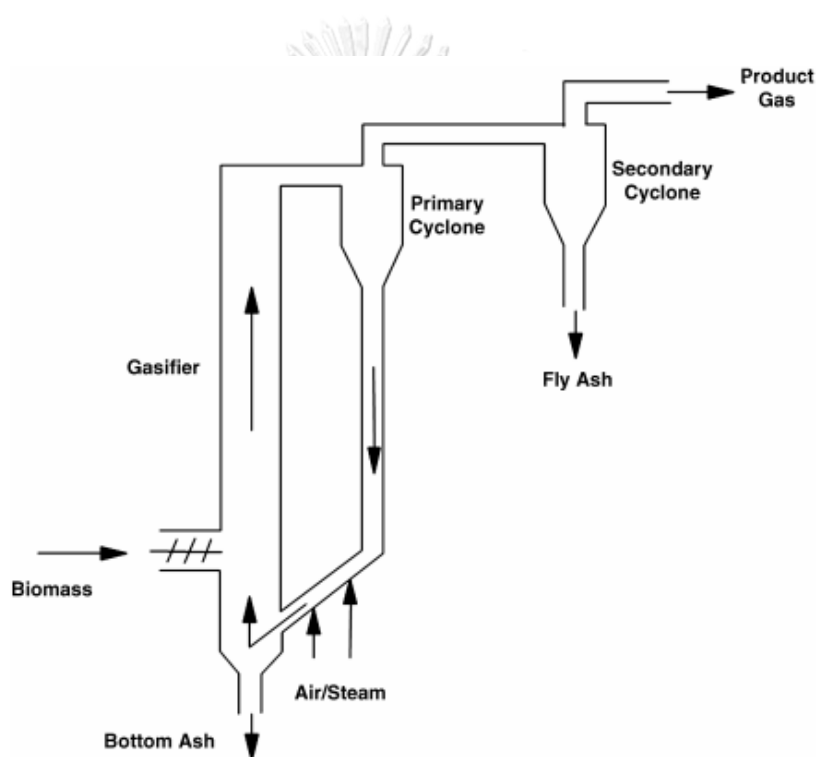
เตาแก๊สฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟองอากาศ อากาศจะไหลขึ้นผ่านเบดด้วยความเร็ว ก๊าซที่สูงเพียงพอต่อการทำให้เบดเกิดการปั่นป่วนระหว่างอนุภาคและฟองก๊าซ ฟลูอิดไธซ์เบดแบบ ฟองอากาศมีลักษณะคล้ายกับของเหลวกำลังเดือดและมีสมบัติทางกายภาพหลายอย่างคล้ายกับของ ไหล (Fluid) ในเตาแก๊สฟลูอิดไธซ์เบด superficial velocity (ปริมาตร/พื้นที่หน้าตัด) ของก๊าซในบริเวณ ส่วนล่างของเตาเป็นตัวควบคุมสถานะฟลูอิดไธซ์ ชีวมวลจะถูกนำป้อนเข้าสู่เตาไปยังบริเวณเหนือเบด หรือในเบด การป้อนเข้าสู่บริเวณในเบดมีข้อดีกว่าเพราะมีช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยาของชีวมวล เพราะฉะนั้นหากป้อนชีวมวลบริเวณเหนือเบด ชีวมวลบางส่วนจะลอยออกไปพร้อมกับก๊าซไหลโดยไม่ แปรรูปในเบด เมื่อชีวมวลเข้าสู่เบดจะได้ความร้อนจากการกวนผสมของชีวมวลและวัสดุเบด ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 เตาแก๊สฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟองอากาศ (Brown, 2011)

2.3.2.2 เตาแกซีฟายฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed)

เตาแกซีฟายฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน มีก๊าซไหลผ่านเร็ว มีช่องว่างของวัสดุเบดมากขึ้นและเกิดการปั่นป่วนของเบด ซึ่งความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้นมากพอที่จะทำให้อนุภาคเบดจะลอยขึ้นและถูกไซโคลนจับอนุภาคเบดย้อนกลับมายังบริเวณส่วนล่างของเตาแกซีฟายซึ่งเป็นการหมุนเวียนของเบด ด้วยการทำให้พฤติกรรมเช่นนี้จึงกล่าวได้ว่าเป็นระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 เตาแกซีฟายระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Brown, 2011)

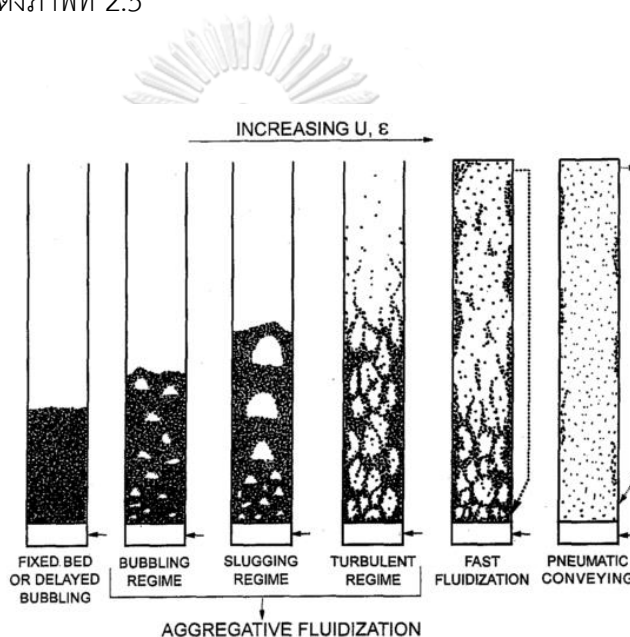
2.4 ฟลูอิดไคเซชัน (Fluidization)

ฟลูอิดไคเซชัน (Fluidization) คือพฤติกรรมที่ของแข็งลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น (อนุภาคเบด) เมื่อสัมผัสกับอากาศแล้วอนุภาคเบดเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล เมื่อนำอนุภาคเบดไว้บนตะแกรงหรือตัวกระจายลมในหอทดลองแล้วทำให้ของไหลที่เป็นก๊าซหรือของเหลวผ่านขึ้นไปจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับอนุภาคเบดและไหลผ่านชั้นอนุภาคเบดไปยังออกทางส่วนบนของหอทดลอง

เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อความเร็วของไหลมากกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดิเซชัน (Minimum fluidizing velocity) ในที่สุดจะเห็นอนุภาคเบดขยับตัวและลอยไปพร้อมกับของไหลและแยกตัวเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน พฤติกรรมของอนุภาคเบดในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล จึงเรียกสถานะนี้ว่า ฟลูอิดิเซชัน (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

2.4.1 ระบบของฟลูอิดิเซชัน (Regime of fluidization)

ระบบของฟลูอิดิเซชัน มีรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคเบดที่แตกต่างกันโดยขึ้นกับความเร็วก๊าซ โดยแสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ระบบอุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดิเซชัน (Grace และคณะ, 1986)

2.4.1.1 ระบบ Fixed bed

ระบบเบดนิ่ง คือ อนุภาคเบดไม่มีการขยับ อยู่นิ่งบนตัวกระจายลมแม้มีการเพิ่มความเร็วก๊าซ เมื่อก๊าซผ่านเบดนิ่งอนุภาคเบดจะเกิดแรงต้านต่ออนุภาคจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความดันตกคร่อมเบด (Pressure cross bed) โดยสมการ อธิบายความสัมพันธ์ของความดันต่อความสูงของชั้นเบด $\frac{\Delta P}{L}$ ขนาดของอนุภาค d_p ได้ดังนี้ (Ergun, 1952)

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U}{\phi^2 d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U^2}{\phi d_p} \quad (2.1)$$

เมื่อ ΔP = ความดันลดของเบด

L = ความสูงของเบด

U = ความเร็วของของไหล เมื่อหน้าตัดเบดว่างเปล่า

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดอนุภาค

μ = ความหนืดของของไหล

ρ_g = คือความหนาแน่นของไหล

ϕ = คือค่าความกลมของอนุภาค

ε_{mf} = คือ ช่องว่างภายในเบด

2.4.1.2 ระบบ Bubbling bed

ระบบเบดแบบฟองอากาศคือ อนุภาคเบดเกิดการผสมกันทั่วเบด เกิดจากการเพิ่มความเร็วก้ำจนความเร็วก้ำขามากกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดิเซชัน (Minimum fluidizing velocity, U_{mf}) ที่ความเร็วนี้ทำให้แรงต้านการไหลของอนุภาคมีค่าเท่ากับน้ำหนักอนุภาคจึงทำให้อนุภาคในสภาวะนี้จะแสดงพฤติกรรมคล้ายของไหล โดยระบบนี้ความดันตกคร่อมเบดมีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบด แสดงดังสมการ

$$\Delta F_D = \Delta PA = AL(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (2.2)$$

เมื่อ ΔF_D = คือ แรงต้านการไหลของอนุภาค

A = คือ พื้นที่หน้าตัดของเบด

ρ_g = คือ ความหนาแน่นของไหล

ρ_p = คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

g = คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

ε_{mf} = คือ ช่องว่างภายในเบด

2.4.1.3 ระบบ Slugging

ระบบ Slugging คือ ระบบที่ฟองอากาศขยายใหญ่เท่ากับขนาดของท่อปฏิกรณ์ จึงทำให้อนุภาคเบตไม่สัมผัสกันทั่วถึง ซึ่งเป็นปัญหาหลักในเตาแก๊สพายและหม้อไอน้ำระบบ ฟลูอิไดซ์เบต

2.4.1.4 ระบบ Turbulent bed

ระบบ Turbulent bed คือ ระบบที่อนุภาคเบตเกิดการปั่นป่วน ทำให้เกิดการ หายไปของฟองอากาศในชั้นเบต โดยการปั่นป่วนของเบตเกิดจากความเร็วก๊าซที่เพิ่มขึ้น

2.4.1.5 ระบบ Fast fluidized bed

ระบบ Fast fluidized bed คือ ระบบที่ความเร็วก๊าซมากกว่าความเร็วตกอิสระของ อนุภาค (Terminal velocity of individual) อนุภาคจะลอยขึ้นหลุดออกจากเบตและตกกลับมา โดยระบบนี้นำไปใช้กับเตาฟลูอิไดซ์แบบหมุนเวียน

2.4.1.6 ระบบ Pneumatic conveying

ระบบ Pneumatic conveying คือ ระบบที่มีการพัดพาด้วยอากาศเพิ่มขึ้นและมี ความหนาแน่นของอนุภาคเบตลดลง

2.4.2 การคำนวณความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum fluidizing velocity)

ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum fluidizing velocity, U_{mf}) เป็น ความเร็วก๊าซที่ทำให้แรงต้านการไหลของอนุภาค (ΔF_D) มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบต

$$\Delta F_D = \Delta PA = AL(1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (2.2)$$

แรงต้านการไหล = น้ำหนักเบต

ความดันตกคร่อมเบต x ขนาดพื้นที่หน้าตัด = ปริมาตรเบตโดยไม่รวมช่องว่าง x น้ำหนักจำเพาะ ของเบต

จัดรูปสมการที่ 2.2 จะได้

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g$$

รวมสมการที่ 2.1 และ 2.2 เข้าด้วยกัน

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu U_{mf}}{\phi^2 d_p^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g U_{mf}^2}{\phi d_p} \quad (2.3)$$

$$\frac{\rho_g d_p^3}{\mu^2 (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (2.4)$$

นำสมการที่ 2.3 คูณด้วย สมการ 2.4 จะได้

$$\frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} \frac{d_p U_{mf} \rho_p}{\mu_g} + \frac{1.75}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_p}{\mu_g} \right)^2 \quad (2.5)$$

ตัวเลขอาคิมิติส $Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2}$

ตัวเลขเรย์โนลด์ $Re_{mf} = \frac{U_{mf} d_p}{\mu}$

แทนค่าตัวเลขอาคิมิติสและตัวเลขเรย์โนลด์ ของในสมการที่ 2.5 จะได้

$$Ar = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf} + \frac{1.75}{\phi \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 \quad (2.6)$$

2.4.2.1 สมการคาดการณ์ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน

จากการทดลองของ Kunii และ Levenspiel (1969) Pillai และ Raja Rao (1971) และLeva (1959) ได้แสดงสมการคาดการณ์ความเร็วของก๊าซที่สภาวะความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันในกรณีที่ไม่ทราบค่าความกลมของอนุภาคและค่าช่องว่างภายในเบด ดังสมการที่ 2.6 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (p_p - p_g) g}{(1650 \mu)} \quad (Re_{mf} < 20) \quad (2.6)$$

$$U_{mf} = \frac{7.01 \times 10^{-4} d_p^2 (p_p - p_g) g}{\mu} \quad (2.7)$$

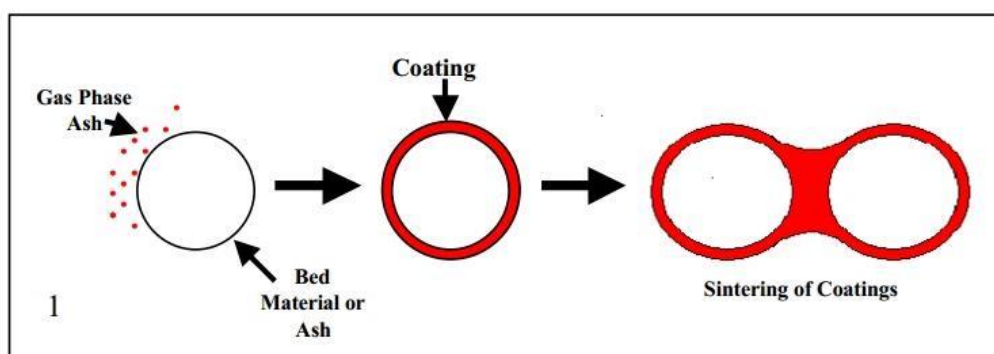
$$U_{mf} = \frac{0.0093 d_p^{1.82} (p_p - p_g)^{0.94}}{\mu^{0.88} p_g^{0.06}} \quad (2.8)$$

2.5 การรวมตัวกัน (Agglomeration)

การรวมตัวของเบตเป็นปัญหาหลักในกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งในระบบฟลูอิดเบต กระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งของระบบฟลูอิดเบตประกอบด้วย วัสดุเบต (ทรายซิลิกา) และเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งเถ้าของเชื้อเพลิงแข็งมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อัลคาไลน์ ได้แก่ โพแทสเซียมและโซเดียม ซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดการรวมตัวของเบต สารอนินทรีย์เหล่านี้จะพบปริมาณมากในเชื้อเพลิงโดยเฉพาะชีวมวลและถ่านหินคุณภาพต่ำ เมื่อทำการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็งด้วยระบบฟลูอิดเบตโดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบตและใช้เชื้อเพลิงที่มีโพแทสเซียมและโซเดียมเป็นองค์ประกอบ สามารถสร้างสารประกอบโพแทสเซียมซิลิเกตซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารแต่ละชนิด จึงทำให้อนุภาคทรายซิลิกาถูกเคลือบด้วยสารที่มีความหนืด โดยอนุภาคทรายซิลิกาที่ถูกเคลือบนี้จะนำไปสู่การจับเป็นก้อนใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการสร้างพันธะที่ติดแน่นในขณะที่เกิดการชนกันของอนุภาคทราย ถ้ากระบวนการนี้ไม่ได้รับการแก้ไข ในที่สุดจะนำมาสู่การเสียดสภาพฟลูอิดเบตบางส่วนหรือทั้งหมดของชั้นเบต ซึ่งเป็นผลให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง

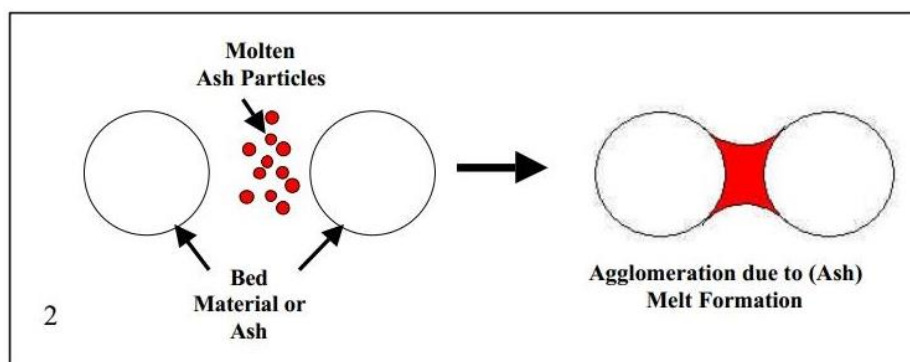
การเกิดการรวมตัวของเบตสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบดังนี้

1. การรวมตัวกันจากการเคลือบ (Coating-induced) เป็นกระบวนการที่เกิดจากการเคลือบซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยมาจากการสะสมจากสารประกอบอนินทรีย์ในสถานะก๊าซบนพื้นผิวของอนุภาค เป็นรูปแบบที่สังเกตเห็นได้โดยทั่วไปในเตาเผาในระบบฟลูอิดเบตระดับอุตสาหกรรม ซึ่งในสภาพวิกฤติ สามารถเกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคที่ถูกเคลือบในระหว่างเกิดการชนกันทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้น



ภาพที่ 2.6 แสดงการรวมตัวกันของเบตจากการเคลือบ (Coating-induced) (Visser และคณะ, 2004)

2. การรวมตัวกันจากการหลอมเหลว (Melt-induced) เป็นกระบวนการที่เกิดจากอนุภาค
 ฝ้าหลอมเหลวอยู่ระหว่างการชนกันของอนุภาค ซึ่งทำหน้าที่เป็นกาวในการเชื่อมอนุภาคเหล่านั้นเข้า
 ด้วยกัน



ภาพที่ 2.7 แสดงการรวมตัวกันของเบตจากการหลอมเหลว (Melt-induced) (Visser และคณะ, 2004)

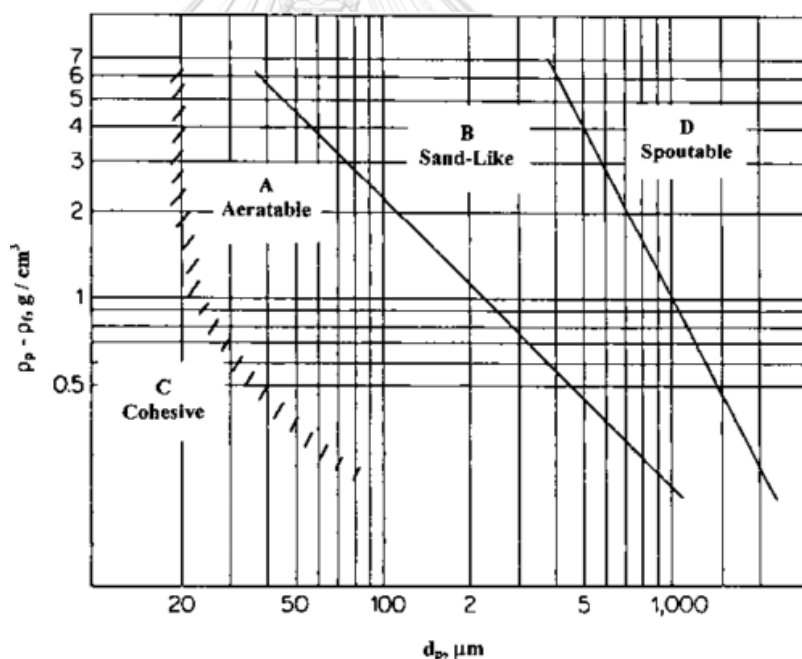
2.5.1 กลไกของการรวมตัว

ปรากฏการณ์การรวมตัวกันหรือการเสถียรภาพฟลูอิดไดซ์สามารถพบได้ในการเผาไหม้และ
 การแกซีฟิเคชันของตัวระบบฟลูอิดไดซ์เบตที่อุณหภูมิสูง เช่น การเผาไหม้ของถ่านหินปิโตรเลียม
 การเผาไหม้หรือแกซีฟิเคชันของชีวมวล กระบวนการการเผาไหม้ของชีวมวลและถ่านหิน เป็นต้น
 แนวโน้มการรวมตัวกันในระบบฟลูอิดไดซ์เบตเป็นผลโดยตรงจากความหนืดหรือความเหนียวของเบต
 ซึ่งส่งผลต่อการไหลของก๊าซและของแข็ง

กลไกการรวมตัวกันของเบตมีความสัมพันธ์กับการปฏิสัมพันธ์ของอนุภาค (inter-particle
 interaction) และการชนกันระหว่างอนุภาคในระดับไมโครเมตร ซึ่งสามารถพิจารณาโดยผลของการ
 รวมตัวกันของเบตที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) ของเบตขนาดระดับไมโครเมตร และ
 ปฏิริยาทางเคมีของเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้และการแกซีฟิเคชัน โดย
 กลไกการรวมตัวกันของเบตมีองค์ประกอบ 3 ด้านดังนี้

1. อุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic)

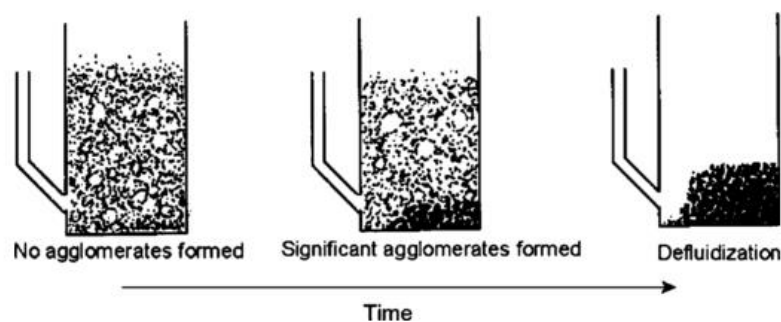
ระบบฟลูอิดไดซ์เบดประกอบด้วยกลุ่มอนุภาคเบดถูกเป่าขึ้นด้วยกระแสของก๊าซไหลซึ่งมีปฏิสัมพันธ์ของก๊าซ-อนุภาค และอนุภาค-อนุภาค โดยแรงระหว่างอนุภาคสามารถส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะของการไหลของก๊าซ-อนุภาค ในระบบการไหล โดย Geldart ได้แบ่งแยกอนุภาคไว้ 4 กลุ่มคือ A B C และ D ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของการไหล ขนาดและความหนาแน่นของแข็งเหล่านั้นดังภาพที่ 2.8 โดยทฤษฎีของ Geldart แบ่งกลุ่มของอนุภาคด้วยการเอาแรงระหว่างอนุภาค (inter-particle force) มาคำนวณ สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก แรงระหว่างอนุภาคมาจากแรงวานเดอวาล์วและแรงทางไฟฟ้าเป็นหลัก ส่วนแรงระหว่างอนุภาคอื่นๆ มาจากของเหลวและการซินเทอริง (sintering) ซึ่งของเหลวเหล่านี้จะออกแรงกระทำต่ออนุภาค ทำให้รูปแบบการไหลของก๊าซเปลี่ยน ยิ่งไปกว่านั้น อนุภาคมีแนวโน้มที่จะติดกันในขณะชนกันเมื่อแรงระหว่างอนุภาคแข็งแรง



ภาพที่ 2.8 การแบ่งกลุ่มขนาดอนุภาคของ Geldart (Yang, 2003)

การรวมตัวกันของเบดและอุทกพลศาสตร์ของเบดมีความสัมพันธ์กันที่อุณหภูมิสูง เมื่ออนุภาคเกิดการรวมตัวกันขึ้นในระบบฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิสูงสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมของระบบการไหลได้ เช่น เปลี่ยนพฤติกรรมระบบการไหลของอนุภาคกลุ่ม B ไปเป็นกลุ่ม A ซึ่งส่งผลให้เสีย

สภาพฟลูอิดซ์ ผลที่ได้ตามมาคือ ประสิทธิภาพในการผสมกันของเบตลดลง เป็นเหตุให้อุณหภูมิของเบตมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ยิ่งไปกว่านั้น การรวมกลุ่มกันของอนุภาคเบต ทำให้มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคกว้างขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการแยกชั้นของเบต โดยการแยกชั้นของเบตเป็นสาเหตุทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมออีกด้วยภาพที่ 2.9 เป็นตัวอย่างแสดงกระบวนการการแยกชั้นและการเสียสภาพฟลูอิดไตซ์ในกระบวนการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไตซ์เบตของฟางข้าว

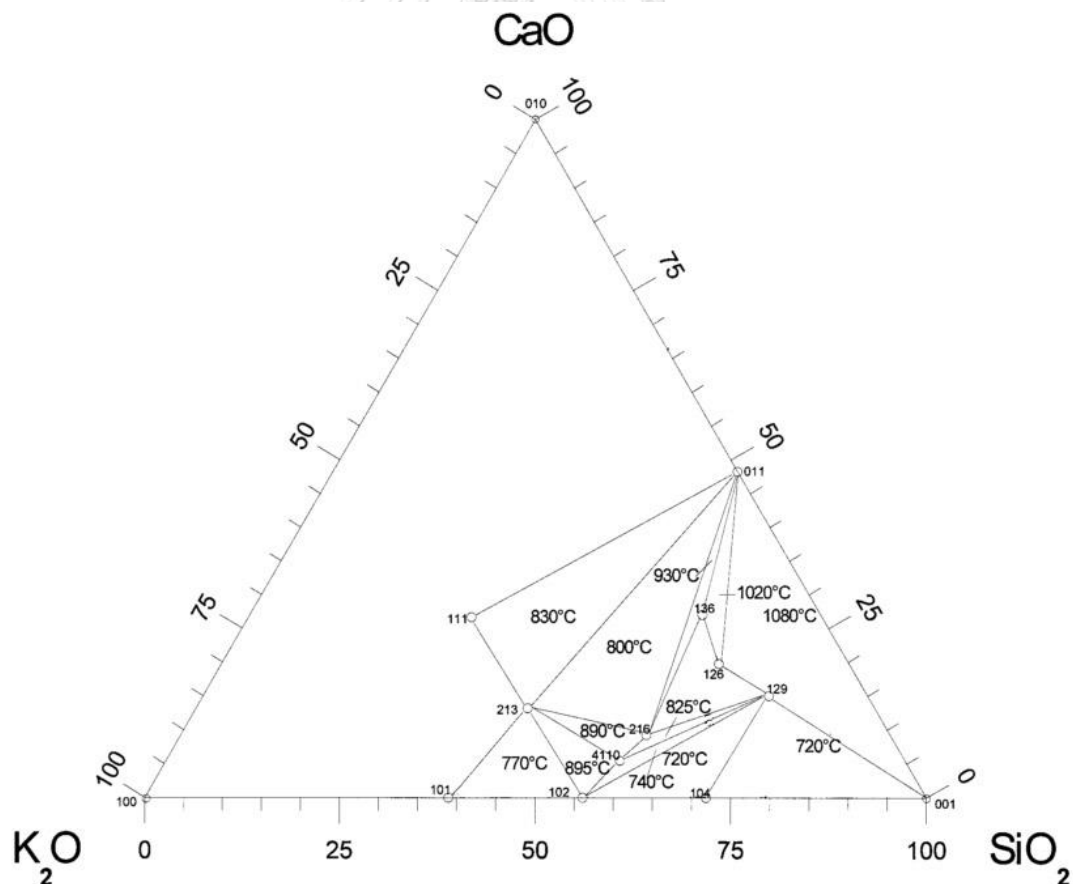


ภาพที่ 2.9 กระบวนการการแยกชั้นและการเสียสภาพฟลูอิดไตซ์ (Bartels และคณะ, 2008)

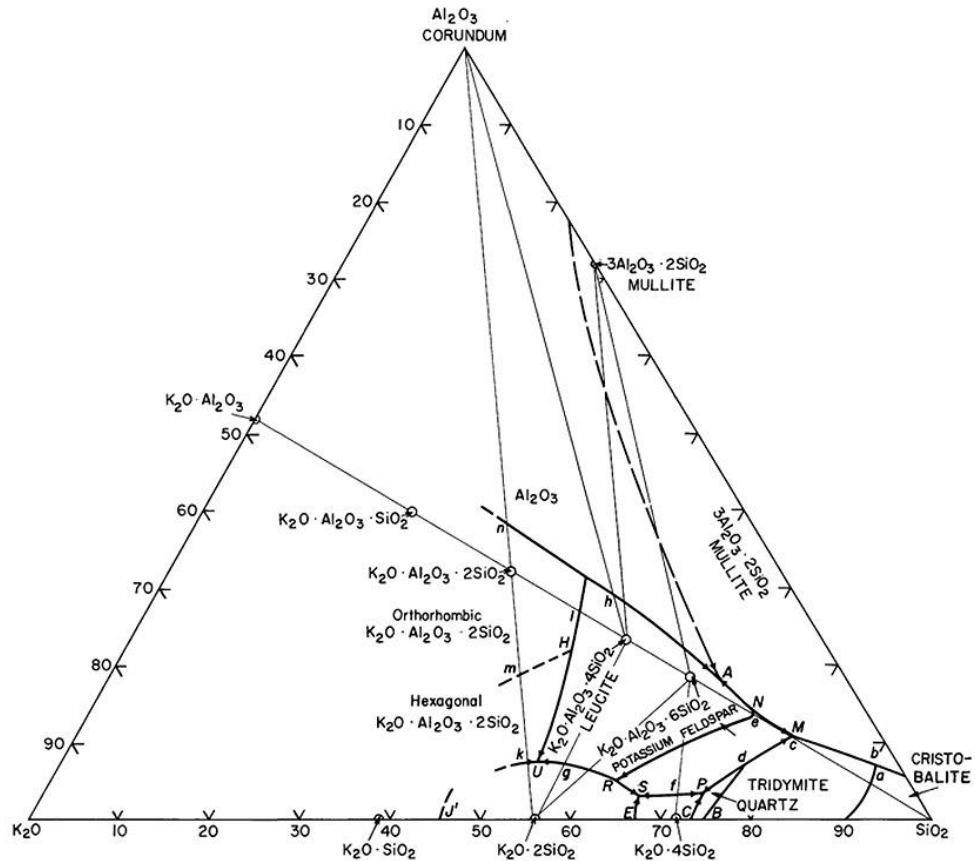
2. กลไกของปฏิกิริยาทางเคมี

การรวมตัวกันของเบตในเตาเผาและก๊าซซีไฟเออร์แบบฟลูอิดไตซ์เบต มีสาเหตุมาจาก หลอมเหลวของเถ้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคเบต โดยทั่วไปเถ้าของเชื้อเพลิงที่มีอัลคาไลน์ (โพแทสเซียม และ โซเดียม) เป็นองค์ประกอบสูงจะมีจุดหลอมเหลวต่ำ ซึ่งเถ้าชีวมวลส่วนใหญ่ประกอบด้วย โพแทสเซียม ซิลิกอน แคลเซียม โดยโพแทสเซียมอยู่ในชีวมวลในหลายรูปแบบ เช่น เคมีโลหะอินทรีย์ (Organometallic) และเกลือในระหว่างเผาไหม้ โพแทสเซียมมีแนวโน้มที่จะเป็นสารระเหยพร้อมกับ อินทรีย์สาร โดยอาจถูกปลดปล่อยเป็นโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เมื่อเชื้อเพลิงมีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้ องค์ประกอบประเภทซิลิกาในพืชล้มลุกส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนเป็นสถานะก๊าซของโพแทสเซียม โดยทั่วไปเถ้าเชื้อเพลิงที่เกิดการหลอมเหลวขึ้นในการเผาไหม้ และการแก๊สซิฟิเคชันของระบบฟลูอิดไตซ์เบต ส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตในรูปหลอมเหลวจาก สารประกอบโซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียม ซึ่งสารประกอบที่มีโพแทสเซียมและโซเดียม เป็นสาเหตุในการของการรวมตัวกันในระบบฟลูอิดไตซ์เบต โดยโพแทสเซียมและโซเดียมสามารถทำให้เกิดการเชื่อมติดทางกายภาพกับวัสดุอื่นได้

ในการเผาชีวมวลด้วยระบบฟลูอิดไดซ์เบดพบว่า การรวมตัวกันของเบตส่วนใหญ่มาจากองค์ประกอบของซิลิกอน (Si) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) ซึ่งพบได้ในเถ้าของชีวมวล โดย 3 องค์ประกอบนี้สามารถเป็นสารยูเทคติก (Eutectic) ได้ ซึ่งยูเทคติก หมายถึง สารผสมสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารบริสุทธิ์แต่ละชนิดที่มาผสมกัน ดังนั้นเถ้าของชีวมวลจึงสามารถเกิดการหลอมเหลวได้ง่าย เนื่องจากการหลอมเหลวจากสารประกอบอยู่ในรูป K_2O-SiO_2 หรือ $K_2O-CaO-SiO_2$ ซึ่งมีอุณหภูมิยูเทคติก ของ K_2O-SiO_2 นั้นต่ำกว่า 770 องศาเซลเซียสและ $K_2O-CaO-SiO_2$ มีค่าอุณหภูมิยูเทคติกต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิโดยทั่วไปที่ใช้ในการเผาระบบฟลูอิดไดซ์เบดคือ 800-850 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการหลอมละลายของซิลิเกตเป็นสารที่มีความหนืดและเหนียว แต่เมื่อมีองค์ประกอบที่เป็นอะลูมินาปริมาณมาก ทำให้เกิดการสร้างของอัลคาไลน์อะลูมินนิมซิลิเกต ($K_2O-Al_2O_3-SiO_2$) ซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงกว่าอุณหภูมิโดยทั่วไปที่ใช้ในการเผาระบบฟลูอิดไดซ์เบด ดังภาพที่ 2.11



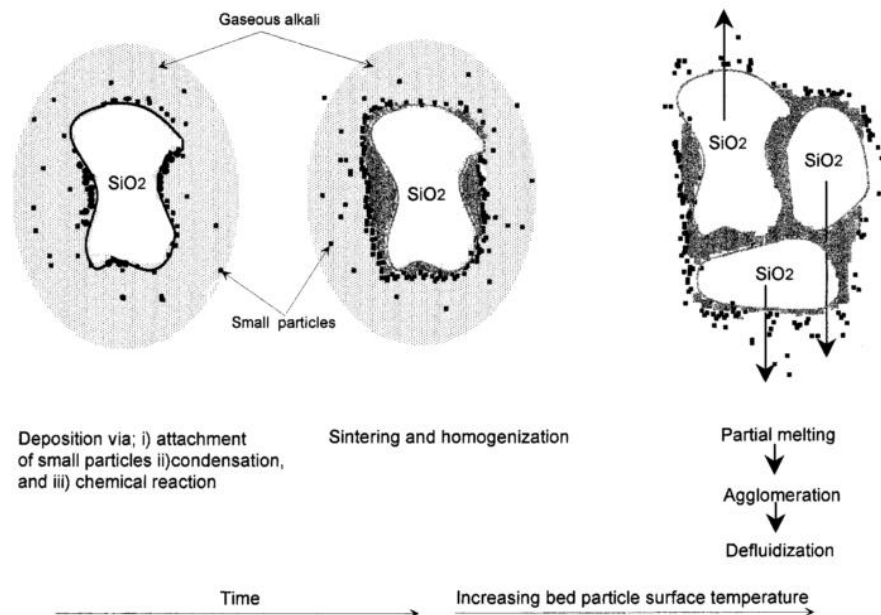
ภาพที่ 2.10 ระบบของ $K_2O-CaO-SiO_2$ (Öhman และคณะ, 2000)



ภาพที่ 2.11 ระบบของ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ (Morey, 1964)

3. กลไกของปฏิกิริสัมพันธ์ระหว่างแก้วและวัสดุเบต

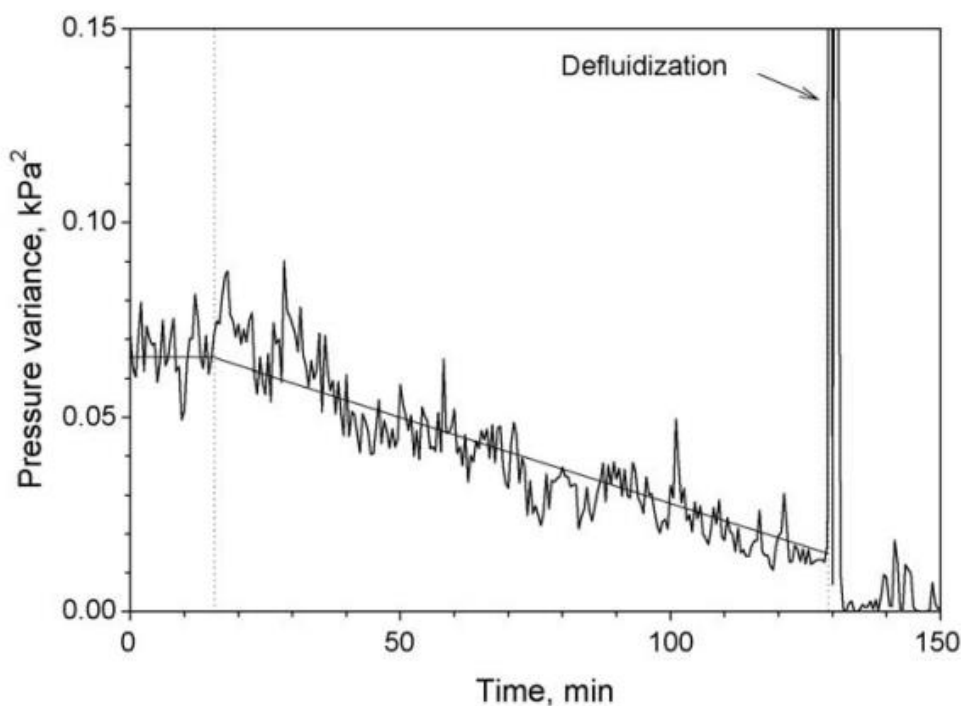
โดยทั่วไปทรายซิลิกา/ควอตซ์นิยมใช้เป็นวัสดุเบต ซึ่งมักเกิดการรวมกันของเบตและแก้ว ขณะทำการแกซีฟายจะก่อให้เกิดการอุดตันดังที่ได้กล่าวไปแล้ว กลไกต่าง ๆ ของการปฏิกิริสัมพันธ์ระหว่างแก้วและวัสดุเบต ได้สรุปไว้ดังนี้ ขั้นแรก แก้วสะสมบนพื้นผิวของวัสดุเบตโดยการรวมกันของอนุภาคแก้วขนาดเล็กบนพื้นผิวของวัสดุเบตและการควบแน่นของก๊าซอัลคาไลน์แล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของวัสดุเบต ขั้นที่ 2 ในขณะที่มีการสะสมอย่างต่อเนื่องบนพื้นผิวอนุภาคของวัสดุเบต โดยชั้นในของผิวที่เคลือบอาจจะเป็นเนื้อเดียวกันและมีความแข็งแรงโดยการซินเทอริง ขั้นที่ 3 การรวมตัวกันของอนุภาคที่ถูกเคลือบผิวควบคุมด้วยแรงระหว่างอนุภาคที่ยึดติดกัน ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 กลไกการรวมตัวกันของเถ้าและวัสดุเบต (Öhman และคณะ, 2000)

2.5.2 วิธีการตรวจวัดแนวโน้มการรวมตัวกันของเบต

ความดันแตกต่าง (Differential pressure) ถือเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการติดตามตรวจสอบระบบฟลูอิดซ์เบต เนื่องจากวิธีนี้สะท้อนถึงผลของอุทกพลศาสตร์ของระบบฟลูอิดซ์เบต โดยทั่วไปปริมาณเถ้าในเบตสามารถตรวจวัดได้โดยความดันของระบบ จากการวัดความดัน 2 จุดคร่อมเบต โดยเมื่อความดันคร่อมเบตลดลงปริมาณมากแสดงถึงปริมาณเถ้าในชั้นเบตที่เพิ่มมากขึ้น จากการทดลองของ Chirone และคณะ (2006) ศึกษาความเปลี่ยนแปลงของความผันผวนของความดันในกระบวนการเผาไหม้ของเปลือกเมล็ดสน พบว่า เกิดการเสียสภาพฟลูอิดซ์ของเบตเมื่อความดันคร่อมเบตลดลงร้อยละ 60-70 ของความดันที่ใช้ในการเดินระบบโดยปกติ ดังภาพที่ 2.13 ซึ่งนี่ถือเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถตรวจสอบการรวมตัวกันของเบตที่เกิดขึ้นจริงในระบบ



ภาพที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงความดันในระบบฟลูอิดไคซ์เบด (Chirone และคณะ, 2006)

2.6 วัสดุเบด (Bed material)

วัสดุเบด (Bed material) เป็นส่วนสำคัญที่สุดในเตาแก๊สฟายระบบฟลูอิดไคซ์ เนื่องจากเบดทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อน และเบดมีบทบาทหลักเกี่ยวข้องกับการแตกตัวของน้ำมันทาร์ (Tar cracking) โดยวัสดุที่ใช้ทำเบดมี 2 ชนิดคือ อะลูมินาและซิลิกา ซึ่งคุณสมบัติดังรายละเอียดต่อไปนี้ (Alauddin และคณะ, 2010)

2.6.1 อะลูมินา (Al_2O_3)

อะลูมินา เป็นเบดทางเลือกที่มีหลายรูปเช่น อะลูมินา คอร์รันดัม (Corundum) ตลอดจนทรายอะลูมินา (Alumina sand) ทรายอะลูมินามีองค์ประกอบดังนี้ อะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 85-90 ซิลิการ์้อยละ 8-10 และองค์ประกอบอื่นๆ ทรายอะลูมินาถูกใช้เป็นเบดในกระบวนการแปรสภาพของแข็งเป็นเชื้อเพลิงต่างๆ เช่น จากงานวิจัยของ Ergudenler และ Ghaly (1993) ใช้ในกระบวนการแก๊สไฟเคชันระบบฟลูอิดไคซ์เบดของฟางอัดก้อนในเตาแก๊สฟายขนาด 400 กิโลวัตต์ โดยการใช้อะลูมินาเริ่มเกิดการรวมตัวกันของเบดเมื่ออุณหภูมิ 920 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิเกิน 920

องศาเซลเซียส เขตทั้งหมดจะเกิดการรวมตัวเป็นก้อนใหญ่ ส่วนในการทดลองของ Ergudentler และ Ghaly (1993) ดำเนินการทดลองโดยใช้ทรายซิลิกา (Silica sand) พบว่าเริ่มเกิดการรวมตัวกันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าอะลูมินามีความเป็นไปได้ในการเพิ่มอุณหภูมิการดำเนินการ นอกจากนี้อะลูมินาถูกเลือกเพื่อใช้แทนทรายซิลิกาในกระบวนการเผาไหม้ของเปลือกถั่ว ซึ่งผลการทดลองพบว่า ไม่เกิดการรวมตัวกันเมื่อใช้อะลูมินาเป็นเบด

2.6.2 ซิลิกา (SiO₂)

ทรายซิลิกา (Silica sand) มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกา (SiO₂) ร้อยละ 98-99 และมีแร่ธาตุประเภท ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และไอรอนออกไซด์ (Fe₂O₃) อีกเล็กน้อย ซิลิกาถูกใช้อย่างกว้างขวางในการนำไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม ในกระบวนการแกซีฟิเคชันหรือการเผาไหม้ (Ghaly และคณะ, 1994) ทรายซิลิกานิยมใช้เป็นเบดในเตาระบบฟลูอิดไคซ์เนื่องจากมีความทนทานต่อการสึกกร่อนสูง อุณหภูมิคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้การดำเนินการ สามารถรับแรงดันและมีการผสมกันของความหนาแน่นอนุภาค การกระจายตัวของขนาดและรูปร่างให้ลักษณะที่ดีในการฟลูอิดไคซ์ (Rozainee และคณะ, 2008)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะและสมบัติของซิลิกาและอะลูมินา

ลักษณะและสมบัติ	ซิลิกา ¹	อะลูมินา ²
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	2510	3450
ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
SiO ₂	99.55	8.00-10.00
Al ₂ O ₃	0.16	85.00-90.00
CaO	0.02	0.50-2.00
MgO	0.008	0.50-1.50
Na ₂ O	-	0.10-0.40
Fe ₂ O ₃	0.05	0.10-0.30
TiO ₂	-	0.05-0.15
K ₂ O	-	0.01-0.05

* หมายเหตุ ¹Chaivatamaset และคณะ (2014) ²Arromdee และ Kuprianov (2012)

2.7 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ฟางข้าว (Rice Straw) คือ ลำต้นหรือก้านแห้งของข้าวที่เหลือหลังจากเก็บเกี่ยวข้าวและนำเมล็ดออกแล้ว ซึ่งถือเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ในประเทศไทย ปริมาณฟางข้าวส่วนใหญ่ถูกทิ้งและไม่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และมีเพียงปริมาณน้อยเท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ เช่น เป็นวัสดุคลุมดิน ทำปุ๋ยหมัก (Chaivatamaset และคณะ, 2014) เนื่องจากฟางข้าวเป็นชีวมวลที่ค่าความหนาแน่นรวมต่ำ จึงมีปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในการขนส่ง จากงานวิจัยของ Suramaythangkoor และ Gheewala (2010) พบว่า ค่าใช้จ่ายในกระบวนการขนส่งฟางข้าวเกิดจากหลายขั้นตอน ได้แก่ การอัดก้อน (ราคา 66 บาทต่อตัน) การขนถ่าย (ราคา 125 บาทต่อตัน) และการขนส่ง (ราคา 1.25 บาทต่อตันต่อกิโลเมตร) ขณะที่ฟางข้าวราคา 63 บาทต่อตัน จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายในกระบวนการขนส่งมีราคาสูงเมื่อเทียบกับราคาฟางข้าว ด้วยเหตุนี้จึงอาจเป็นสาเหตุให้มีการนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์ในปริมาณน้อยและถูกเผาทิ้งในนาข้าวเพื่อจำกัด

โดยจากการสำรวจในประเทศไทยพบว่าร้อยละ 90 ของฟางข้าวถูกเก็บรวบรวมสูงสุดในระหว่างเดือนพฤศจิกายนและธันวาคมและถูกเผาในที่โล่งแจ้ง (Tipayarom และ Oanh, 2007) ซึ่งการเผาฟางข้าวนี้ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ ไนโตรเจนไดออกไซด์ และอนุภาคฝุ่น เป็นต้น โดยมลพิษทางอากาศเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และเป็นสาเหตุของมะเร็ง (Lim และคณะ, 2012)

จากข้อมูลสถิติการเกษตรของประเทศไทยพบว่า ในปี 2559 ประเทศไทยมีปริมาณผลผลิตข้าว 28 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) แสดงว่าจะเกิดปริมาณฟางข้าวมากถึง 23 ล้านตัน ซึ่งอาจไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ ถูกเผาทิ้งในนาข้าวและก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศต่อประชาชน

ฟางข้าวประกอบไปด้วย เซลลูโลส (cellulose) ร้อยละ 32-47 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ร้อยละ 19-27 และลิกนิน (Lignin) ร้อยละ 5-24 (Binod และคณะ, 2010) และมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านความร้อนดังตารางที่ 2.2 โดยฟางข้าวมีองค์ประกอบของเถ้าปริมาณมากเมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่นๆ เช่น แกลบ ทะลายปาล์ม ใยปาล์ม ชานอ้อยและขี้เลื่อย ดังตารางที่ 2.3 นอกจากนี้ เถ้าของฟางข้าวมีโพแทสเซียมและโซเดียมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นตัวการที่ก่อให้เกิดการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการเผาไหม้และแกซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไรซ์ โดยรายละเอียดองค์ประกอบเถ้าของฟางข้าวเปรียบกับชีวมวลชนิดอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านความร้อนของฟางข้าว

การวิเคราะห์	Liu และคณะ, 2009	Chaivatamaset และคณะ, 2014	Alauddin และคณะ, 2010	
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	ความชื้น	4.99	10.09	5.58
	คาร์บอนคงตัว	16.09	16.38	16.55
	สารระเหยได้	65.05	69.49	65.23
	เถ้า	13.87	14.13	12.64
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	C	41.93	28.62	38.61
	H	5.64	3.76	4.28
	O	36.66	52.49	37.16
	N	1.09	0.89	1.08
	S	0.08	0.09	0.65
	Chlorine	-	0.02	-
ค่าความร้อน (เมกกะจูล/กิโลกรัม)	13.86	15.22	15.09	

*หมายเหตุ - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของชีวมวล

ชีวมวล	การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	สารระเหยได้	คาร์บอนคงตัว	ความชื้น	เถ้า
ฟางข้าว	59.40	14.40	7.60	18.60
แกลบ	56.10	17.20	10.60	16.10
ทะลายปาล์ม	19.29	19.29	74.48	6.22
ใยปาล์ม	46.30	12.00	36.40	5.30
ชานอ้อย	76.60	11.10	10.40	1.90
ขี้เลื่อย	55.10	9.30	34.90	0.70

ที่มา: (Vassilev และคณะ, 2010 ; Chaivatamaset และคณะ, 2014)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบแก้วของซีเมนต์

องค์ประกอบของแก้ว ซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ฟางข้าว	แกลบ	ทะเลสาบปาล์ม	ใยปาล์ม	ชานอ้อย	ซีลี้อย
SiO ₂	77.20	94.48	51.80	63.20	46.79	26.17
CaO	2.46	0.97	0.95	9.00	4.91	44.11
K ₂ O	12.59	2.29	21.39	9.00	6.95	10.83
P ₂ O ₅	0.98	0.54	4.06	2.80	3.87	2.27
Al ₂ O ₃	0.55	0.21	0.47	4.50	14.60	4.53
MgO	2.71	0.19	18.06	3.80	4.56	5.34
Fe ₂ O ₃	0.50	0.22	0.72	3.90	11.12	1.82
SO ₃	1.18	0.92	-	2.80	3.57	2.05
Na ₂ O	1.79	0.16	0.33	0.80	1.61	2.48
Ti ₂ O	0.04	0.02	-	0.20	2.02	0.40
อื่นๆ	-	-	2.22	-	-	-

* หมายเหตุ – ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ที่มา: (Vassilev และคณะ, 2010 ; Chaivatamaset และคณะ, 2014)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 ศึกษาการนำฟางข้าวมาใช้ในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไคต์เบด

Liu และคณะ (2009) ศึกษาผลของความเร็วของการฟลูอิดไคต์ อุนทอมิเบด และ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง ต่อเวลาการเสียดสภาพฟลูอิดไคต์และสัดส่วนการรวมตัวกันในการเผาไหม้แบบ ฟลูอิดไคต์เบดของฟางข้าว ผลการทดลองพบว่า ความหนืดของอนุภาคเบดเกิดจากชั้นเคลือบเป็น เหตุผลโดยตรงสำหรับการเสียดสภาพฟลูอิดไคต์ของเบดอัลคาไลน์ เช่น โพแทสเซียมและโซเดียมยังคง เป็นตัวหลักในผิวชั้นนอกของอนุภาคฟางข้าวระหว่างการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงเป็นเหตุให้อัลคาไลน์ หลอมเหลวและเคลือบพื้นผิวของอนุภาคแก้ว ด้วยเหตุนี้อนุภาคแก้วกลายเป็นสารที่มีความหนืดและ นำไปสู่การติดพื้นผิวของอนุภาคเบด อนุภาคแก้วขนาดใหญ่อาจทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมในการเกิดการ รวมตัวกันและอนุภาคแก้วขนาดเล็กอาจนำมาสู่การเกิดชั้นเคลือบ

Yu และคณะ (2011) ศึกษาการใช้ฟางข้าวในกระบวนการเผาไหม้ในเตาปฏิกรณ์ระบบฟลูอิดไธด์เบด โดยฟางข้าวที่ใช้มีขนาด 0.5 มิลลิเมตร (มีปริมาณเถ้าร้อยละ 10.65 โดยน้ำหนัก) ใช้ซิลิกาขนาดระหว่าง 300 และ 800 ไมโครเมตร ทำการทดลองอุณหภูมิระหว่าง 650 และ 910 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ไม่พบการรวมตัวของเบดเมื่อเดินระบบ 5 ชั่วโมง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเดินระบบพบว่าการรวมตัวกันของเบดเกิดขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 825 องศาเซลเซียส เบดเกิดการเสถียรภาพฟลูอิดไธด์ในเวลา 25 นาที โดยตรวจวัดจากการลดลงอย่างรวดเร็วของความดัน

Calvo และคณะ (2012) ประเมินพฤติกรรมของฟางข้าวภายใต้กระบวนการแกซิฟิเคชันระบบฟลูอิดไธด์และประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ในการเดินระบบเพื่อประเมินค่าที่เหมาะสมในระบบการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำแบบปิดคู่ (Close-coupled boiler-gasifier reburn system) ทำการศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพการดำเนินการของการแปรสภาพเป็นก๊าซของฟางข้าวในแกซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไธด์เบด ดำเนินการที่อุณหภูมิระหว่าง 700 และ 850 องศาเซลเซียส ใช้อัตราส่วนอากาศ-เชื้อเพลิง (A/F) สำหรับฟางข้าวคือ 4.28 และมีอากาศไหลเวียนในระบบเตาประมาณร้อยละ 7-25 ของสตอยชิโอเมตริกของการเผา ใช้อะลูมินา-ซิลิกาและแมกนีเซียมออกไซด์เป็นเบดในการทดลอง ผลการทดลองพบว่า มีการรวมตัวของเบดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส การรวมตัวกันในระหว่างกระบวนการแกซิฟิเคชันของฟางข้าวโดยใช้เบดผสมกันระหว่างอะลูมินา-ซิลิกาและแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และสามารถป้องกันการรวมตัวกันของเบดได้โดยการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ในระหว่างทำการทดลอง

Chaivatamaset และคณะ (2014) ศึกษาการรวมตัวกันของอนุภาคเบดและการเสถียรภาพของเบดในกระบวนการเผาไหม้ของทะเลสาบปาล์มเปล่าและฟางข้าวในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธด์เบด โดยชีวมวลที่ใช้ในการทดลองมีขนาดอยู่ในช่วง 5-8 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 750 และ 900 องศาเซลเซียส ใช้ซิลิกาเป็นวัสดุเบดโดยมีขนาดอยู่ในช่วง 300-355 และ 425-500 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่า การเสถียรภาพฟลูอิดไธด์เบดมีสาเหตุมาจากการรวมตัวกันของเบดและองค์ประกอบของชีวมวลมีผลต่อการรวมตัวกันของเบดอย่างมีนัยสำคัญ โดยการรวมตัวกันของเบดสามารถวัดได้จากการลดลงของความดันคร่อมเบด การเสถียรภาพฟลูอิดไธด์เกิดขึ้นเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มความอุณหภูมิ ขนาดอนุภาคเบด และลดความเร็วก๊าซในการทดลอง ในส่วนการวิเคราะห์การรวมตัวกันของเบดด้วย SEM/EDX พบว่า การรวมตัวกันเกิดจากสารหลอมเหลวที่มี

องค์ประกอบของซิลิกอนและชีวมวลที่มีโพแทสเซียมสูง เช่น สารประกอบโพแทสเซียมซิลิเกต ซึ่งพบในบริเวณที่อนุภาคเบตเชื่อมต่อกันและเคลือบอนุภาคเบต

Duan และคณะ (2015) ศึกษาลักษณะการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการเผาไหม้ของฟางข้าวในเตาฟลูอิดไคซ์เบตแบบเวอร์เท็กซ์ โดยใช้ฟางข้าวอัดแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรและความยาวโดยเฉลี่ย 9.6 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 750 ถึง 850 องศาเซลเซียส ใช้ควอทซ์ (ซิลิการ้อยละ 99.5) เป็นวัสดุเบตโดยมีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค 540 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่า เวลาการเดินระบบโดยปราศจากการเสียสภาพฟลูอิดไคซ์เมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซและลดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และผลการทดลองในส่วนการวิเคราะห์การรวมตัวของเบตใน 2 บริเวณพบว่า บริเวณการรวมตัวที่เกิดจากการเคลือบที่ผิวของอนุภาค แคลเซียมร้อยละ 10 ซิลิกอนร้อยละ 64 และโพแทสเซียมร้อยละ 25 โดยประมาณส่วนบริเวณที่รวมตัวกันจากการหลอมเหลวพบว่าประกอบด้วยอะลูมิเนียม แมกนีเซียม แคลเซียม ซิลิกอน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณแรกพบว่าโพแทสเซียมลดลงเหลือเพียงร้อยละ 20

Unchaisri และ Fukuda (2017) ศึกษาการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและฟางข้าวอัดแท่งในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียน ใช้ฟางข้าวในการเผาไหม้ร่วมที่อัตราส่วนร้อยละ 25 และ 50 ใช้ซิลิกาเป็นวัสดุเบตขนาด 476 ไมโครเมตร เตาปฏิกรณ์เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 5.4 เมตร อัตราป้อนเชื้อเพลิง 14 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ไม่เกิดการรวมตัวกันของเบตขึ้นในการใช้ฟางข้าวเผาไหม้ร่วมอัตราส่วนร้อยละ 50 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนร้อยละของฟางข้าวที่ใช้เผาไหม้ร่วมส่งผลให้ขนาดของอนุภาคเบตมีแนวโน้มใหญ่ขึ้น

2.8.2 ศึกษาวัสดุเบตที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบต

Kuo และคณะ (2014) ศึกษาผลของอุณหภูมิและสารเติมแต่ง (Additive) ต่อผลิตภัณฑ์ก๊าซและมลพิษที่เกิดขึ้นในกระบวนการแกซิฟิเคชันของเศษไม้เมื่อมีการรวมตัวกันหรือการเสียสภาพของเบต ทำการทดลองอุณหภูมิระหว่าง 600 และ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูล 0.5 ใช้ซิลิกาเป็นวัสดุเบตโดยมีขนาดระหว่าง 700 และ 840 ไมโครเมตรและใช้แคลเซียมออกไซด์และอะลูมินาเป็นสารเติมแต่งโดยมีขนาดระหว่าง 590 และ 700 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่า พบการรวมตัวกันของเบตที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ซิลิกาโดยปราศจากสารเติมแต่ง และพบว่าเวลาในการเสียสภาพฟลูอิดไคซ์เบตเพิ่มขึ้นเมื่อใส่แคลเซียมออกไซด์และอะลูมินา

Lahijani และ Zainai (2011) ศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันของทะเลสาบปาล์มเปล่าด้วยเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธซ์เบต โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 650 และ 1050 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูลระหว่าง 0.17 และ 0.32 ใช้ซิลิกาเป็นวัสดุเบตโดยมีขนาด 600 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่า การรวมตัวกันของเบตเป็นปัญหาหลักในกระบวนการแกซีฟิเคชันของทะเลสาบปาล์มเปล่าที่อุณหภูมิสูง อุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบควรต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกิดการรวมตัวกันของเบต

Manya และคณะ (2005) ศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนด้วยเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธซ์เบต ทำการทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 750 และ 850 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูลระหว่าง 0.25 และ 0.35 ใช้ซิลิกาเป็นวัสดุเบตโดยมีขนาดระหว่าง 250 และ 500 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่า กากตะกอนน้ำเสียชุมชนมีประสิทธิภาพในการนำมาใช้ในกระบวนการแกซีฟิเคชันเพื่อนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ โดยการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆไม่พบการรวมตัวกันของเบต

Arromdee และ Kuprianov (2012) ศึกษาการเผาไหม้เปลือกถั่วในเตาปฏิกรณ์ทรงกรวยแบบฟลูอิดไธซ์เบตโดยใช้อะลูมินาเป็นเบต โดยใช้อะลูมินาขนาดระหว่าง 300 และ 500 ไมโครเมตร ทำการทดลองอุณหภูมิระหว่าง 631-880 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ไม่พบการรวมตัวกันของเบตเมื่อทำการทดลองผ่านไป 30 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของวัสดุเบตมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการทดลอง

Mansaray และคณะ (1999) ศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันระบบฟลูอิดไธซ์เบตของแกลบ โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 0.25 0.30 และ 0.35 และดำเนินการที่อุณหภูมิระหว่าง 665 และ 830 องศาเซลเซียส ความเร็วก๊าซที่ใช้ในการทดลอง 0.22 0.28 และ 0.33 เมตรต่อวินาที ใช้อะลูมินาเป็นวัสดุเบต พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองมีอัตราส่วนสมมูล 0.25 และความเร็วก๊าซ 0.22 เมตรต่อวินาที มีค่าความร้อนของก๊าซระหว่าง 3.09 และ 5.03 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งในทุกการทดลองไม่พบการรวมตัวกันของเบต

Fryda และ คณะ (2008) ศึกษาแนวโน้มการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซีฟิเคชันของ ต้นอ้อ ข้าวฟ่าง และกากน้ำมันมะกอก โดยใช้ควอทซ์และโอลิวินเป็นวัสดุเบต ทำการทดลองอุณหภูมิระหว่าง 700 และ 1200 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า เกิดการเสียดสภาพฟลูอิดไธซ์ของเบตเมื่อใช้ต้นอ้อและข้าวฟ่างเป็นชีวมวลที่อุณหภูมิ 790 และ 810 องศาเซลเซียส

ตามลำดับ ทั้งในกรณีที่ใช้ควอทซ์หรือโอลิวินเป็นเบต ขณะที่กากน้ำมันมะกอกเกิดการเสียสภาพ ฟลูอิดซ์ที่อุณหภูมิ 830 และมากกว่า 850 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ควอทซ์และโอลิวินเป็นเบตตาม ลำดับ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์การรวมตัวกันของเบตด้วย SEM/EDX พบว่า การเคลือบและการ เชื่อมกันของอนุภาคเบตเกิดจากแก้วที่มีองค์ประกอบของโพแทสเซียมซิลิเกต ซึ่งจากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า กากน้ำมันมะกอกมีอุณหภูมิการเสียสภาพฟลูอิดซ์เบตสูงกว่าชีวมวลชนิดอื่นเนื่องจาก มีองค์ประกอบของโพแทสเซียมต่ำและแคลเซียมสูง

Serrano และคณะ (2015) ศึกษาการรวมตัวกันของเบตในระหว่างกระบวนการ แกกซีฟิเคชันของ *Cynara cardunculus* L. โดยใช้ซีฟิโอไลต์ เป็นวัสดุเบต ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยใช้เตาปฏิกรณ์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 52.8 มิลลิเมตร อัตราส่วนสมมูล ระหว่าง 0.28 ถึง 0.30 ความเร็วก๊าซที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 6.38 ถึง 19.60 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่า ซีฟิโอไลต์ช่วยรักษาสภาพฟลูอิดซ์ของเบตได้นานกว่าซิลิกาเบต แต่ซีฟิโอไลต์ เกิดเบตรวมตัวกันที่มีขนาดใหญ่กว่าซิลิกาเมื่อดำเนินการทดลองที่สภาวะเดียวกัน

Ninduangdee และ Kuprianov (2016) ศึกษาการเผาไหม้ของทะเลสาบปาล์มเปล่าใน เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบตโดยใช้อะลูมินา โดโลไมท์ และหินปูน ผลการทดลองพบว่า อะลูมินา โดโลไมท์ และหินปูนสามารถป้องกันการเกิดการรวมตัวกันของเบตในการเผาไหม้ด้วยเตาปฏิกรณ์แบบ ฟลูอิดซ์เบตของทะเลสาบปาล์มเปล่าและสามารถเดินระบบได้ 30 ชั่วโมงโดยไม่พบการรวมตัวกันของ เบต นอกจากนี้ยังพบว่าที่พื้นผิวของอนุภาคเบตอะลูมินามีการเคลือบของโพแทสเซียม ซิลิกอน แคลเซียมและแมกนีเซียม แต่พบอะลูมิเนียมปริมาณมาก ซึ่งการมีองค์ประกอบอะลูมิเนียมปริมาณ มากส่งผลให้ลดการเกิดการรวมตัวกันของเบต ขณะที่โดโลไมท์และหินปูนไม่พบการเคลือบเบต ดังนั้น จึงไม่มีความเสี่ยงในการเกิดการรวมตัวกันของเบต

สรุปจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่มีปริมาณมากในประเทศไทยและมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อย จึงทำให้ฟางข้าวถูกเผาทิ้งในนาข้าวก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นมีการนำฟางข้าวมาแปรสภาพเป็นพลังงานด้วยกระบวนการเผาไหม้ และแกซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไธซ์เบด โดยใช้ซิลิกาเป็นเบดและพบปัญหาการรวมตัวกันของเบดเกิดขึ้น เนื่องจากเถ้าของฟางข้าวมีปริมาณ ซิลิกอนและโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบสูง จึงทำปฏิกิริยากับเบด ซิลิกาเกิดเป็นสารหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการเคลือบและการเชื่อมต่อกันของเบด จึงก่อให้เกิดการรวมตัวกันของเบดขึ้น โดยเกิดการรวมตัวกันของเบดมีอุณหภูมิต่ำกว่า 850 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้โดยทั่วไปในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธซ์เบด นอกจากนี้งานวิจัยที่ใช้ เศษไม้และทะเลสาปาล์มเปล่าโดยใช้ซิลิกาเป็นเบด ก็พบการรวมตัวกันของเบดที่อุณหภูมิต่ำกว่ากับ อุณหภูมิข้างต้นเช่นกัน ขณะที่งานวิจัยที่ใช้ โดโลไมท์ ซีพีโอไลต์ และอะลูมินาเป็นเบดพบว่า สามารถ ยืดเวลาสภาพฟลูอิดไธซ์ของเบดและลดการรวมตัวกันของเบดได้ โดยเบดที่มีองค์ประกอบของอะลูมินา ปริมาณมากสามารถลดการเกิดการรวมตัวกันของเบดได้ เนื่องจากสารหลอมเหลวที่เกิดจากการทำ ปฏิกิริยาของอะลูมินา โพแทสเซียม และซิลิกอนของเถ้าชีวมวลมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้โดยทั่วไป ในการเดินระบบ จึงทำให้ไม่เกิดสารหลอมเหลวในระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุในการรวมตัวกันของเบด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของอัตราส่วนการผสมระหว่างซิลิกาและอะลูมินาต่อการ รวมตัวกันของเบดในการแกซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไธซ์เบดโดยใช้ฟางข้าว เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการ เดินระบบและลดปัญหาการรวมตัวกันของเบดในกระบวนการแกซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไธซ์เบดของฟางข้าว และยังเป็นแนวทางในการนำมาฟางข้าวมาใช้ประโยชน์เพื่อลดการเผาฟางข้าวหลังฤดูการเก็บเกี่ยว ซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการรวมตัวกันของเบตและผลของอัตราส่วนของทรายซิลิกาและอะลูมินาที่เหมาะสมในการเดินระบบเตาฟลูอิด์เบต ทำการทดลองด้วยเตาแก๊สฟายระบบฟลูอิด์เบตโดยใช้ฟางข้าว ซึ่งดำเนินการ ณ วิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และห้องปฏิบัติการชั้น 4 ตึกปฏิบัติการรวม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. การเตรียมฟางข้าวโดยการใช้เครื่องปั่น
2. การวิเคราะห์ของประกอบของฟางข้าว
3. ศึกษาผลการรวมตัวกันของเบตจากการแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิด์เบต เมื่อใช้อัตราส่วนของทรายซิลิกาและอะลูมินาต่าง ๆ ที่สภาวะการเดินระบบต่าง ๆ
4. วิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและกายภาพของเบตที่เกิดการรวมตัวกัน

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

- ฟางข้าว
- ทรายซิลิกา
- อะลูมินา
- ก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99 %
- อะซิโตน



(ก)

(ข)

ภาพที่ 3.1 ซิลิกา (ก) และอะลูมินา (ข)



ภาพที่ 3.2 ฟางข้าว

ตารางที่ 3.1 สมบัติของซิลิกาและอะลูมินาที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดเบด	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร)	องค์ประกอบของเบด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	อื่น ๆ
ซิลิกา	2600	99.47	0.08	0.03	0.14	0.08	0.10	0.1
อะลูมินา	3920	0.10	98.70	0.08	0.00	0.04	0.36	0.72

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- ชุดตะแกรงร่อน ยี่ห้อ RETSCH
- เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (sieve shaker) รุ่น STS
- เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS
- ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ NDN รุ่น XF-240
- เทอร์โมคัปเปิล Type K และเครื่องแปลงสัญญาณเพื่อแสดงผลอุณหภูมิ
- มาโนมิเตอร์ (manometer)



ภาพที่ 3.3 มาโนมิเตอร์



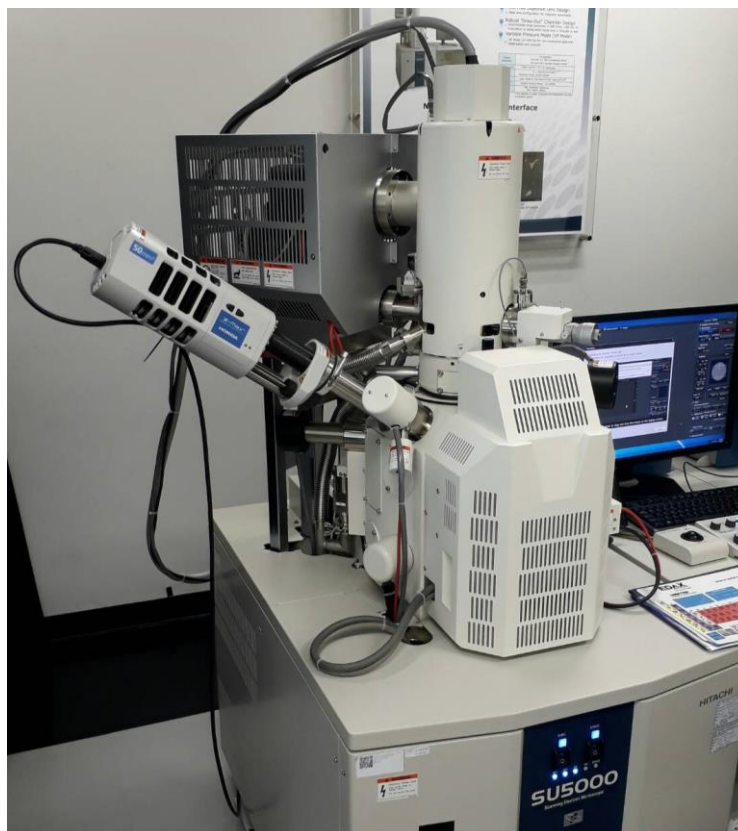
ภาพที่ 3.4 เครื่องแปลงสัญญาณเพื่อแสดงผลอุณหภูมิ

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์

- เครื่องวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ ยี่ห้อ Leco รุ่น CHNS 628
- เครื่องวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุ XRF Techniques ยี่ห้อ Philips รุ่น PW-2404
- เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน Automatic Bomb Calorimeter ยี่ห้อ Leco รุ่น AC-350
- เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น SDTA 851e
- เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น SU-5000
- เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Portable infrared Coal gas Analyzer) รุ่น Gasboard-3100P



ภาพที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Portable infrared Coal gas Analyzer)



ภาพที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.2 การเตรียมวัสดุดิบ

ตัดฟางข้าวและคัดแยกด้วยไซตะแกรงขนาด 425-850 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องเขย่าตะแกรงเพื่อทำการคัดแยก จากนั้นนำฟางข้าวที่คัดขนาดแล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงด้วยตู้อบ (Oven) เพื่อทำการไล่ความชื้น

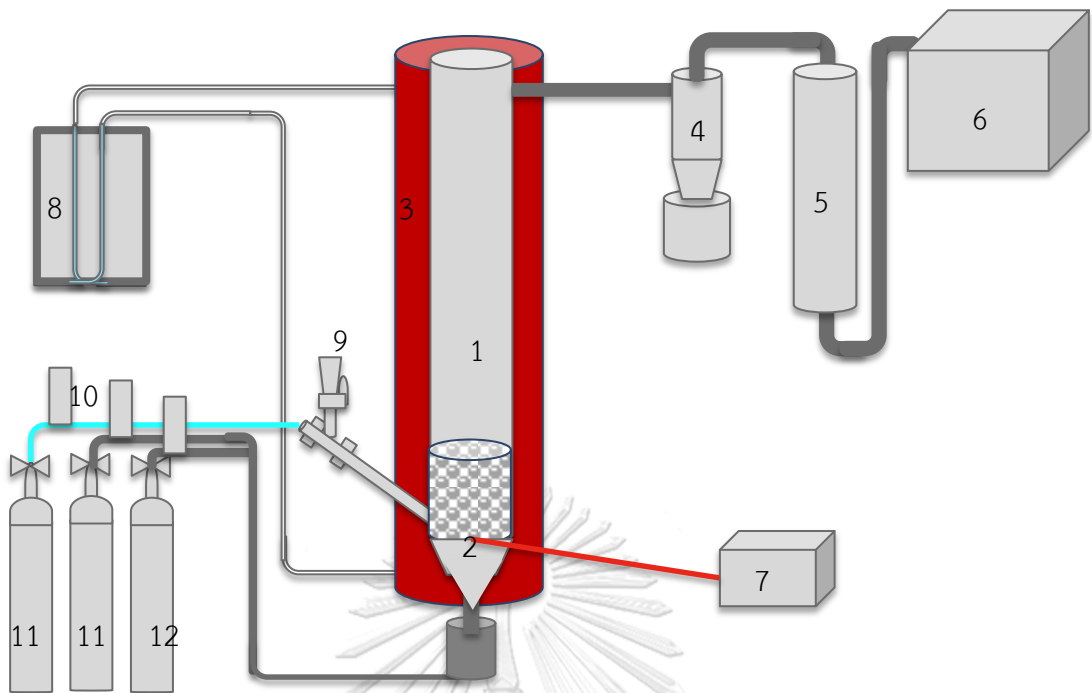


ภาพที่ 3.7 ฟางข้าวขนาด 425-850 ไมโครเมตร

3.3 การเตรียมเตาแก๊สฟาย

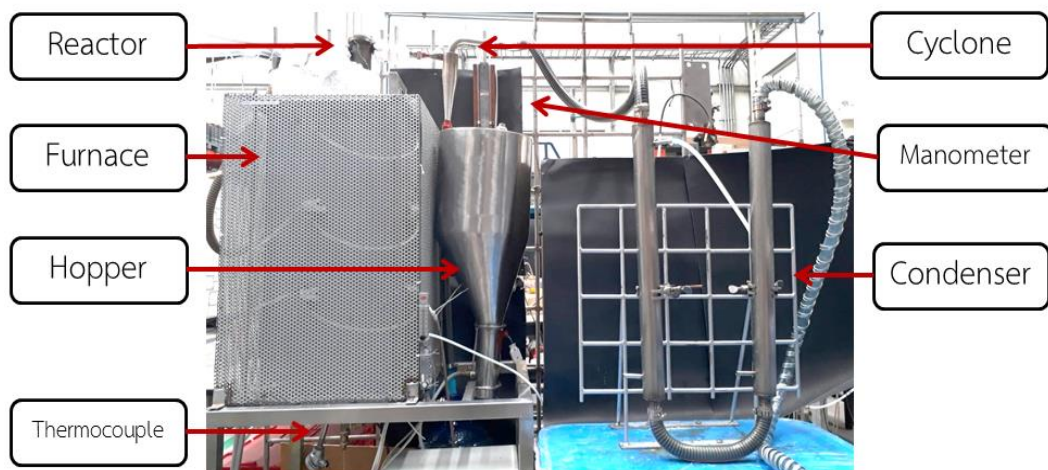
นำท่อปฏิกรณ์ที่ทำด้วยท่อสแตนเลสทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 1 เมตร ใส่ภายในเตาให้ความร้อนแบบทอกลวง ด้านล่างท่อปฏิกรณ์ต่อเข้ากับแผ่นกระจายลมเพื่อเป็นตัวกระจายลมทำให้เบดเกิดการฟลูอิดไดซ์อย่างสม่ำเสมอ ภายในท่อบรรจุด้วยชั้นเบดอะลูมินาและซิลิกาซึ่งอยู่บริเวณเหนือแผ่นกระจายลม จากนั้นต่อชุดวัดความดันคร่อมเบดโดยจุดแรกต่อเข้ากับบริเวณใต้แผ่นกระจายลมและจุดที่สองต่อบริเวณด้านบนของท่อเพื่อวัดความดันในระบบ ด้านบนท่อปฏิกรณ์ต่อเข้ากับไซโคลอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร เพื่อเป็นตัวกำจัดเถ้าลอยที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินการแก๊สฟิเคชัน หลังจากผ่านไซโคลอนก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเข้าสู่ชุดควบแน่นที่หล่อด้วยน้ำเย็นเพื่อลดอุณหภูมิของก๊าซและดักจับก๊าซผลิตภัณฑ์ส่วนที่ควบแน่นได้ หลังจากนั้นก๊าซที่ได้จะเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซเพื่อศึกษาองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์

โดยหลักการทำงานในกระบวนการแก๊สฟิเคชันมีดังนี้ เมื่อเตรียมท่อปฏิกรณ์และอุปกรณ์ต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ทำการให้ความร้อนแก่ท่อปฏิกรณ์โดยระหว่างให้ความร้อน ระหว่างให้ความร้อนจะทำการป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ท่อปฏิกรณ์ทางด้านล่าง เมื่อถึงอุณหภูมิดำเนินการ จะทำการป้อนก๊าซไนโตรเจนผสมกับอากาศที่สัดส่วนที่กำหนดเข้าสู่ท่อปฏิกรณ์และทำการป้อนชีวมวลเข้าสู่ระบบตามอัตราเร็วที่กำหนด เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนจากเบดที่อยู่ภายในท่อปฏิกรณ์จะแปรสภาพเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์และออกจากท่อปฏิกรณ์ทางด้านบน ขณะที่ชีวมวลแปรสภาพเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์แล้วของชีวมวลจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคเบดและทำให้เกิดการรวมตัวกัน ในระหว่างเดินระบบ จะทำการวัดความดันคร่อมเบดอย่างต่อเนื่อง โดยจะทำการหยุดเดินระบบเมื่อความดันคร่อมลดลงอย่างมากซึ่งเป็นการระบุว่าเบดเกิดการรวมตัวกันหรือเบดเสียสภาพฟลูอิดไดซ์



ภาพที่ 3.8 แผนผังเตาแกซีฟลูอิดไชน์เบด

- (1) ท่อปฏิกรณ์ (2) แผ่นกระจายอากาศ (3) เตาให้ความร้อน (4) ไซโคลน (5) ชุดควบแน่น
 (6) เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (7) เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (8) มาโนมิเตอร์ (9) ชุดป้อนวัตถุดิบ
 (10) เครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซ (11) ก๊าซไนโตรเจน (12) อากาศ



ภาพที่ 3.9 ส่วนประกอบของเตาแกซีฟลูอิดไชน์เบด

3.4 การดำเนินการทดลอง

3.4.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านความร้อนของฟางข้าว

นำฟางข้าวที่บดย่อยและได้อบไล่ความชื้นแล้วมาวิเคราะห์ดังนี้

3.4.1.1 วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาค่าเพื่อหาร้อยละของคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ

3.4.1.2 วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาร้อยละความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัวและเถ้า ด้วยเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อน (TGA) ยี่ห้อ Leco รุ่น SDTA 851e

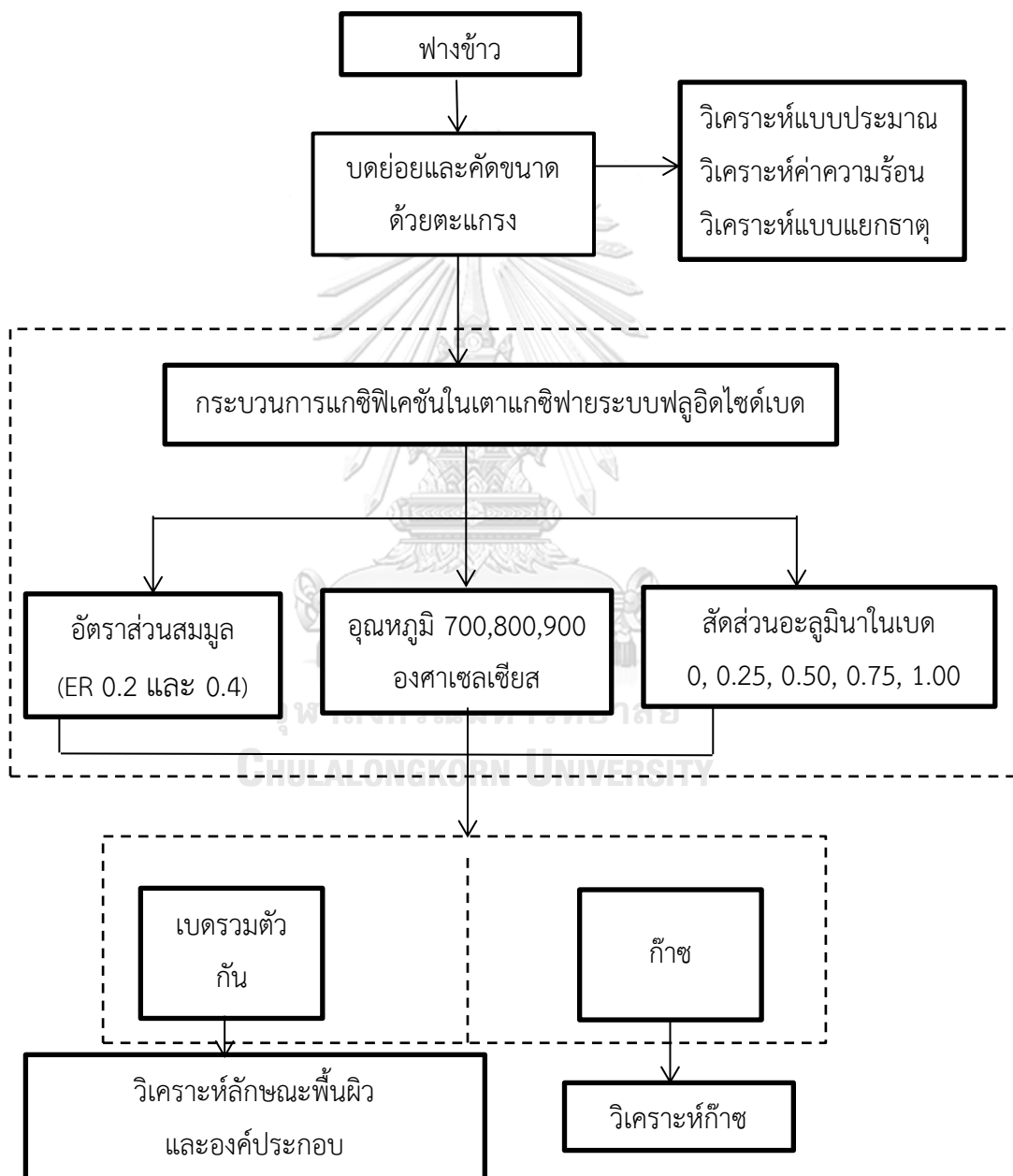
3.4.1.3 วิเคราะห์ค่าความร้อน (Low heating value: LHV) เพื่อหาค่าความร้อนของฟางข้าวด้วยเครื่อง Automatic Bomb Calorimeter; Leco model C-350

3.4.2 ศึกษาการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซีเคชันของฟางข้าวที่สภาวะต่างๆ

ดำเนินการกระบวนการแกซีฟิเคชันในเตาแกซีฟายระบบฟลูอิดไธซ์เบดโดยใช้ฟางข้าวขนาด 425-850 ไมโครเมตร ใช้ปริมาณอะลูมินาในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ของปริมาณเบตทั้งหมด (ทรายซิลิกาและอะลูมินา) อุณหภูมิที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาและป้อนอากาศในสัดส่วนของออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงหรืออัตราสมมูลเท่ากับ 0.20 และ 0.40 และใช้ความเร็วก๊าซทั้งหมดความเร็วขั้นต่ำ 15 ลิตรต่อวินาที ดำเนินการทดลองจนเบตเกิดการรวมตัว โดยการวัดค่าความดันของระบบที่ได้และบันทึกค่าความดันของระบบทุก ๆ 30 วินาที เมื่อพบว่าความดันคร่อมเบตของระบบต่ำลงแสดงถึงเกิดการรวมตัวกันของเบต ให้ปิดระบบให้ความร้อนแก่ท่อปฏิกรณ์ ปิดการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ รออุณหภูมิเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงปิดการไหลของก๊าซไนโตรเจน หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างเบตที่รวมตัวกันเพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบต

3.4.3 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบตที่เกิดการรวมตัวกัน

เบตที่เกิดการรวมตัวกันจากกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบพลูอิไดซ์เบตของฟางข้าว นำมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ (Scanning Electron Microscopy and X-ray Techniques, SEM and EDX)



ภาพที่ 3.10 แผนภาพการทดลองกระบวนการแกซีฟิเคชันของฟางข้าว

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างซิลิกาและอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบตของฟางข้าว ในการทดลองได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบตของฟางข้าว ได้แก่ อัตราส่วนอะลูมินาในเบต อัตราส่วนสมมูล และอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์

4.1 ผลองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านความร้อนของฟางข้าว

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวด้วยการวิเคราะห์แบบปรมาณ แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าฟางข้าวมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารระเหยได้ร้อยละ 66.56 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 12.31 เถ้าร้อยละ 11.84 และความชื้นร้อยละ 9.30 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลอื่น ๆ พบว่า ฟางข้าวมีเถ้าเป็นองค์ประกอบสูงกว่า ซึ่งอาจส่งผลในเรื่องการรวมตัวกันของเบตระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อน ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุพบว่า ฟางข้าวมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 44.00 ไฮโดรเจนร้อยละ 7.64 ออกซิเจนร้อยละ 48.25 และไนโตรเจนร้อยละ 0.11 เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น ๆ แล้วพบว่า ฟางข้าวมีค่าของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่เหมาะสมสำหรับการนำมาแปรสภาพเป็นก๊าซเชื้อเพลิงในกระบวนการแกซีฟิเคชันได้ ตารางที่ 4.3 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบสารอนินทรีย์พบว่า ฟางข้าวมีองค์ประกอบของ SiO_2 ร้อยละ 60.30 Al_2O_3 ร้อยละ 0.24 K_2O ร้อยละ 18.46 CaO ร้อยละ 7.62 Na_2O ร้อยละ 1.82 MgO ร้อยละ 1.56 P_2O_5 ร้อยละ 1.02 และธาตุอื่น ๆ ร้อยละ 8.98 จะเห็นได้ว่า ฟางข้าวมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ เป็น SiO_2 Al_2O_3 K_2O และ CaO ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่อาจเกิดการรวมตัวกันระหว่างดำเนินการทดลองในระบบฟลูอิดไคซ์เซชัน

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของฟางข้าว

การวิเคราะห์ แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	ฟางข้าวใน งานวิจัยนี้	ซังข้าวโพด ¹	เปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์ ²	เปลือก ถั่วลิสง ³
ความชื้น	9.30	14.70	3.83	11.12
คาร์บอนคงตัว	12.31	16.60	15.04	20.86
สารระเหยได้	66.56	66.30	73.41	65.13
เถ้า	11.84	2.40	7.53	2.89

¹Arun และคณะ (2016), ²Uamusse และคณะ (2014), ³ Natarajan และคณะ (2015)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ฟางข้าวใน งานวิจัยนี้	ซังข้าวโพด ¹	เปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์ ²	เปลือก ถั่วลิสง ³
คาร์บอน	44.00	44.70	63.20	52.96
ไฮโดรเจน	7.64	6.30	6.74	6.24
ออกซิเจน	48.25	45.20	21.90	40.20
ไนโตรเจน	0.11	1.20	0.63	0.59
ซิลเฟอร์	-	0.09	-	0.22

*หมายเหตุ - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

¹Arun และคณะ (2016), ²Uamusse และคณะ (2014), ³ Natarajan และคณะ (2015)

ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบสารอนินทรีย์ของฟางข้าว

สารอนินทรีย์	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	อื่น ๆ
ร้อยละโดย น้ำหนัก (wt%)	60.30	0.24	18.46	7.62	1.82	1.56	1.02	8.98

4.1.2 คุณสมบัติด้านความร้อนของฟางข้าว

ผลการวิเคราะห์สมบัติด้านความร้อนของฟางข้าวพบว่า มีค่าความร้อน 16.09 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม พบว่ามีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกันกับงานวิจัยอื่น ๆ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งมีค่าที่เหมาะสมสำหรับการนำไปเผาไหม้ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน เพื่อให้ได้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูง

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของฟางข้าว

ค่าความร้อน	ฟางข้าวในงานวิจัยนี้	ซังข้าวโพด ¹	เปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ²	เปลือกถั่วลิสง ³
เมกกะจูลต่อกิโลกรัม(MJ/Kg)	16.09	15.45	24.20	16.36

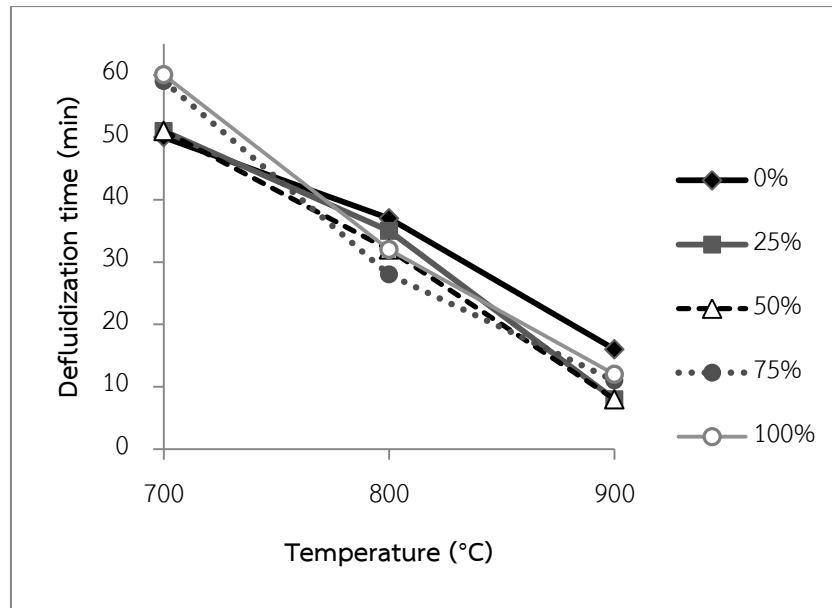
¹Arun และคณะ (2016), ²Uamusse และคณะ (2014), ³Natarajan และคณะ (2015)

4.2 ผลการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซิฟิเคชันของฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ

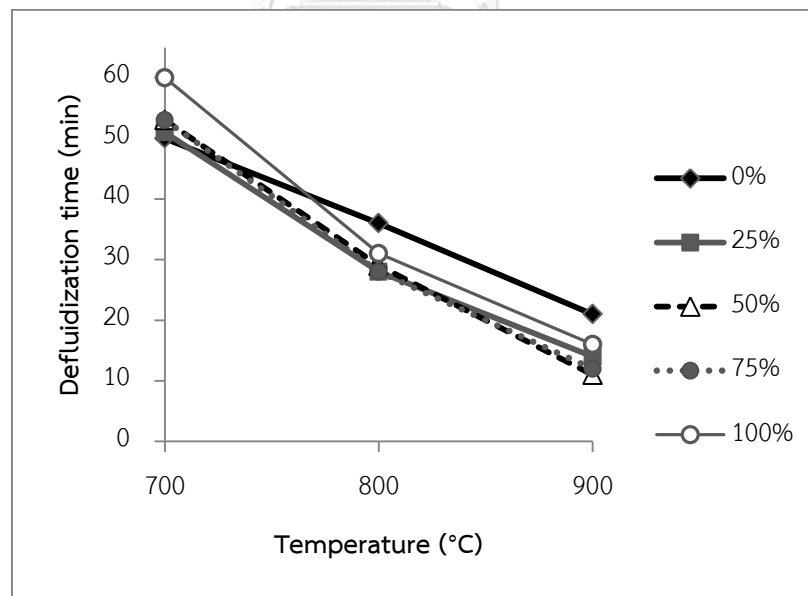
ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาดัชนีตัวแปรที่ส่งผลการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซิฟิเคชันของฟางข้าว โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนอะลูมินาเบต และอัตราส่วนสมมูล

4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการรวมตัวกันของเบต

ในกระบวนการแกซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไธด์เบตของฟางข้าวได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการรวมตัวกันของเบต ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 และที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดลองจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส เบตเกิดการรวมตัวเร็วขึ้น ดังที่แสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2



ภาพที่ 4.1 ผลของของอุณหภูมิต่อการรวมตัวกันของเบต ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และอัตราส่วนอะลูมินาต่าง ๆ



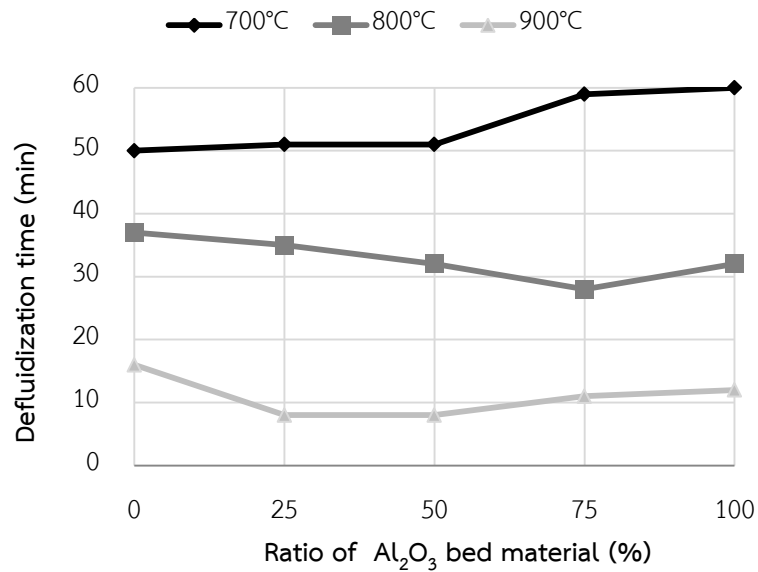
ภาพที่ 4.2 ผลของของอุณหภูมิต่อการรวมตัวกันของเบต ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และอัตราส่วนอะลูมินาต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.1 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการรวมตัวกันของเบต ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และ อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 และ 100 พบว่า อัตราส่วนอะลูมินาเบตร้อยละ 0-100 ที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เบตเสถียรภาพฟลูอิดซ์ในช่วงเวลา 50-60 นาที ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เบตเสถียรภาพฟลูอิดซ์ในช่วงเวลา 28-37 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เบตเสถียรภาพฟลูอิดซ์ในช่วงเวลา 8-16 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในทุกอัตราส่วนร้อยละของ อะลูมินาเบตมีแนวโน้มในการเสถียรภาพฟลูอิดซ์เร็วขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 ดังภาพที่ 4.2 พบว่า ทุกอัตราส่วนร้อยละของ อะลูมินาเบตมีแนวโน้มในการเสถียรภาพฟลูอิดซ์เร็วขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เบตเสถียรภาพฟลูอิดซ์ในช่วงเวลา 53-60 นาที ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เบตเสถียรภาพฟลูอิดซ์ในช่วงเวลา 28-36 นาที และที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เบตเสถียรภาพฟลูอิดซ์ในช่วงเวลา 11-21 นาที

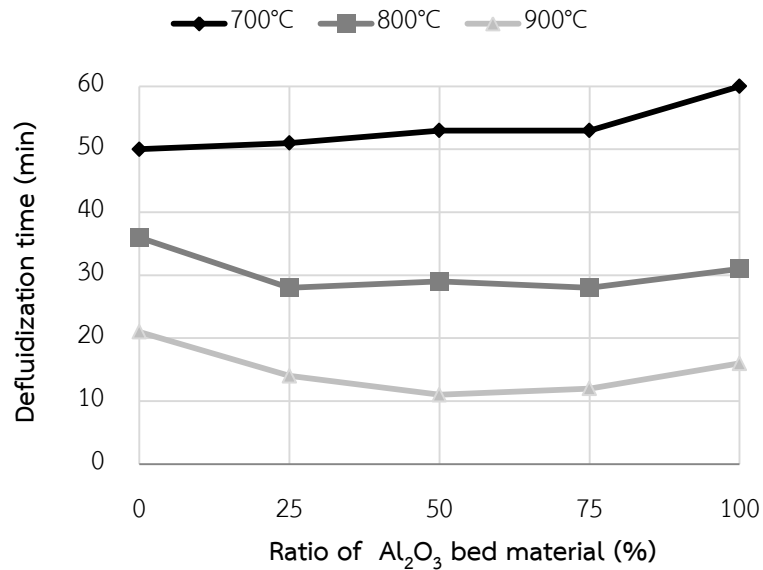
จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของการทดลองส่งผลให้เบตเสถียรภาพฟลูอิดซ์เร็วขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวของสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ($K_2O-CaO-SiO_2$) ซึ่งสารนี้มีความหนืดสามารถเชื่อมติดที่ผิวของอนุภาคเบตทำให้เบตรวมตัวกันเมื่อ เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคเบต จากการศึกษาของ Yu และคณะ (2011) ทำการทดลองศึกษาการ รวมตัวกันของเบตในกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบตของฟางข้าวโดยใช้ซิลิกาเป็นเบต ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 650-910 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เบตเสถียร ภาพฟลูอิดซ์เร็วขึ้น

4.2.2 ผลของอัตราส่วนอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบต

ในกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบฟลูอิดซ์เบตของฟางข้าวได้ศึกษาผลของอัตราส่วนอะลูมินา ต่อการรวมตัวกันของเบตที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 และที่อุณหภูมิที่ 700 800 900 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนอะลูมินาเบตส่งผลต่อเวลาที่เบตเสถียรภาพฟลูอิดซ์ ดังภาพที่ 4.3 และ 4.4



ภาพที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และที่อุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และที่อุณหภูมิต่าง ๆ

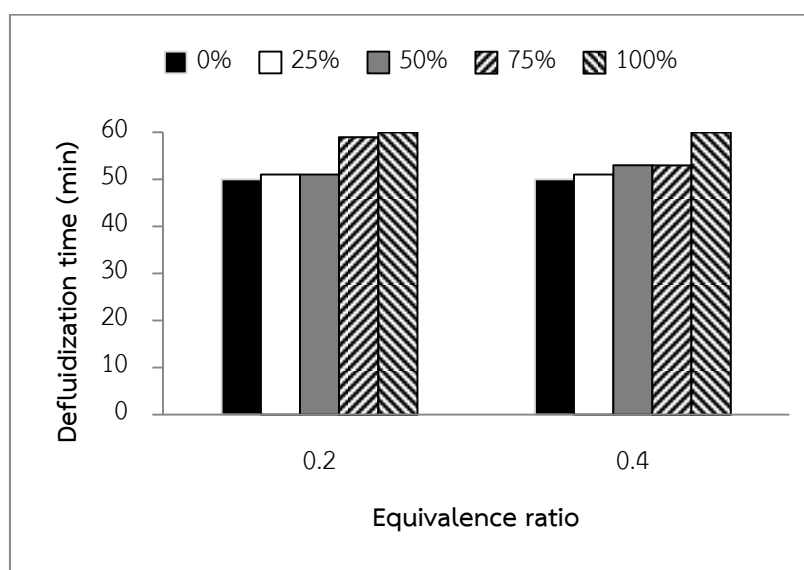
จากภาพที่ 4.3 แสดงผลของอัตราส่วนอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบตที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และที่อุณหภูมิ 700 800 900 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 50 อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25 และ 50 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 51 และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75 และ 100 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 59 และ 60 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 37 35 32 28 และ 32 ตามลำดับ และที่ 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 16 อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25 และ 50 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 8 อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 11 และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 100 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 12

จากภาพที่ 4.4 แสดงผลของอัตราส่วนอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบตที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และที่อุณหภูมิ 700 800 900 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 50 อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 51 และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50 และ 75 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 53 และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 100 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 60 ขณะที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 36 28 29 28 และ 31 ตามลำดับ และที่ 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์นาที่ที่ 21 14 11 12 และ 16 ตามลำดับ

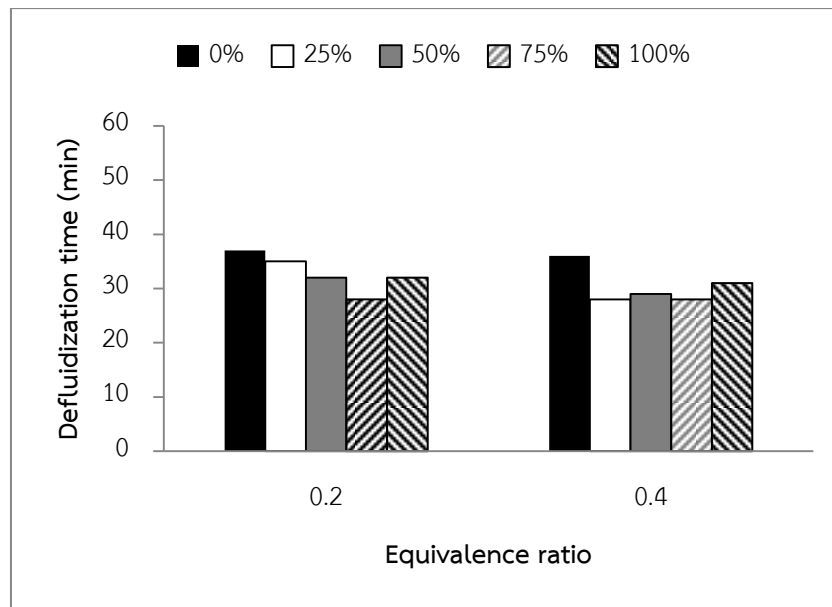
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส การเพิ่มอัตราส่วนอะลูมินาส่งผลให้เบตมีสภาพฟลูอิดซ์นาลง เนื่องจากมีปริมาณอะลูมินามากในเบต ส่งผลให้มีปริมาณซิลิกาในเบตน้อยลง จึงลดโอกาสในการเกิดสารจุดหลอมเหลวต่ำ $K_2O-CaO-SiO_2$ ขณะที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มที่คล้ายกัน คือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนอะลูมินาเบตส่งผลให้เบตมีสภาพฟลูอิดซ์นาลง เนื่องจากที่อุณหภูมิมากกว่า 750 องศาเซลเซียส เบตที่มีส่วนผสมของซิลิกาและอะลูมินาสามารถเกิดสารจุดหลอมเหลวต่ำได้ทั้ง $K_2O-CaO-SiO_2$ และ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ จึงส่งผลให้เบตมีสภาพฟลูอิดซ์นาลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของอะลูมินา ขณะที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนอะลูมินาเบตร้อยละ 100 พบว่าเบตมีสภาพฟลูอิดซ์นาลงเล็กน้อย เนื่องจากในเบตไม่มีซิลิกา จึงลดโอกาสในการเกิดของ $K_2O-CaO-SiO_2$ ซึ่งทำให้เบตเกิดการรวมตัวกัน

4.2.3 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบต

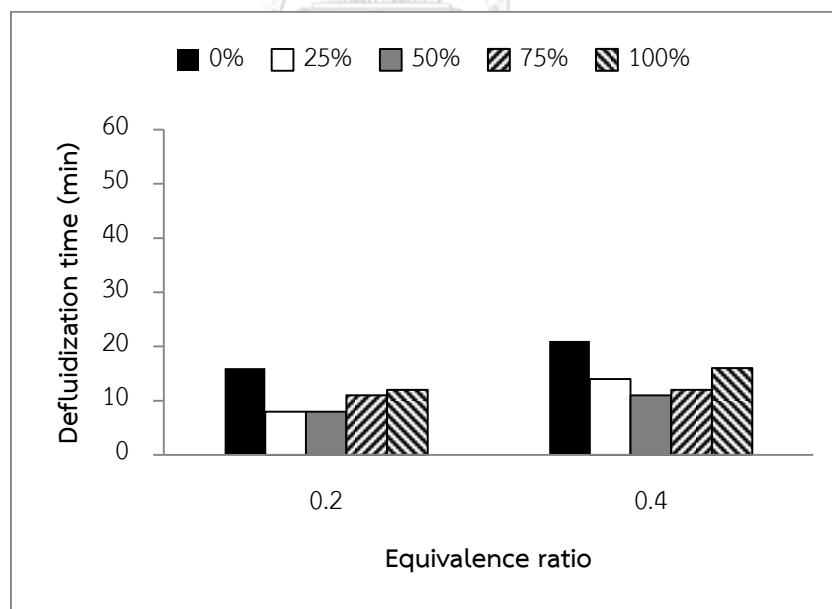
งานวิจัยนี้ทำการเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบตที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสมมูล 0.2 เป็น 0.4 ส่งผลต่อเวลาที่เบตเสียสภาพฟลูอิดซ์ ดังภาพที่ 4.5 ถึง 4.7



ภาพที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบต ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และที่อัตราส่วนอะลูมินาต่าง ๆ



ภาพที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และที่อัตราส่วนอะลูมินาต่าง ๆ



ภาพที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบด ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และที่อัตราส่วนอะลูมินาต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.5 แสดงผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบตที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 พบว่าอัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 เวลาที่เบตเกิดการเสียดสภาพฟลูอิดซ์ของอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 และ 100 มีค่าเท่ากันคือ เวลา 50 51 และ 60 นาที ตามลำดับ ขณะที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50 อัตราส่วนสมมูล 0.4 เวลาที่เบตเกิดการเสียดสภาพฟลูอิดซ์มีค่ามากกว่าอัตราส่วนสมมูล 0.2 คือใช้เวลา 53 และ 51 นาที ตามลำดับ และที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75 อัตราส่วนสมมูล 0.2 เวลาที่เบตเกิดการเสียดสภาพฟลูอิดซ์ มีค่ามากกว่าอัตราส่วนสมมูล 0.4 คือ 59 และ 53 นาทีตามลำดับ

จากภาพที่ 4.6 แสดงผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบตที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 พบว่าอัตราส่วนสมมูล 0.2 เวลาที่เบตเกิดการเสียดสภาพฟลูอิดซ์มีค่ามากกว่าอัตราส่วนสมมูล 0.4 ในอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 และ 100 ขณะที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75 อัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 เวลาที่เบตเกิดการเสียดสภาพฟลูอิดซ์เท่ากันคือใช้เวลา 28 นาที

จากภาพที่ 4.7 แสดงผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการรวมตัวกันของเบตที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 พบว่าอัตราส่วนสมมูล 0.4 มีเวลาที่เบตเกิดการเสียดสภาพฟลูอิดซ์มีค่ามากกว่าอัตราส่วนสมมูล 0.2 ในทุกอัตราส่วนอะลูมินาเบต

จากผลการทดลองเมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 ที่อุณหภูมิ 700 เวลาที่เบตเกิดการเสียดสภาพฟลูอิดซ์มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 800 เวลาที่เบตเกิดการเสียดสภาพฟลูอิดซ์มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เช่นเดียวกัน ขณะที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูล 0.4 กลับมีเวลาที่เบตเกิดการเสียดสภาพฟลูอิดซ์มากกว่าอัตราส่วนสมมูล 0.2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

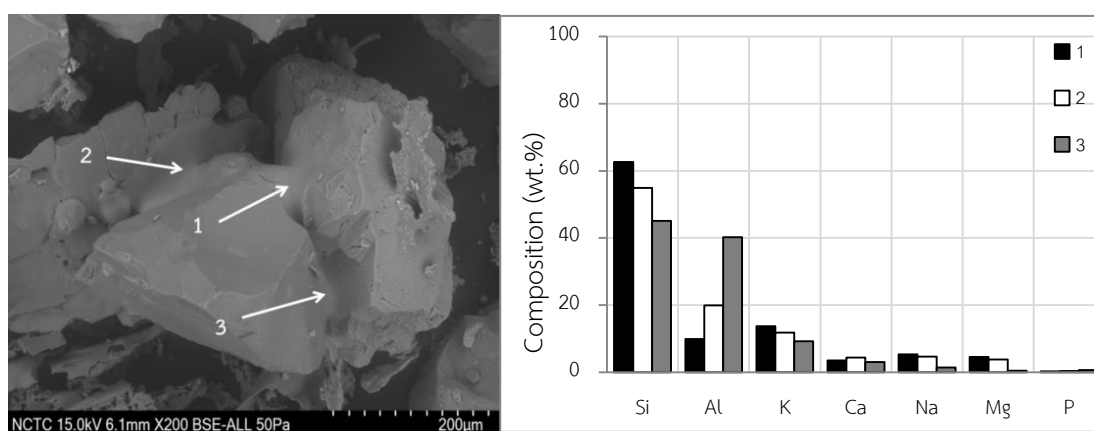
4.3 ผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบตที่เกิดการรวมตัวกัน

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบตที่เกิดการรวมตัวกันในกระบวนการแกซีไฟเคชันของฟางข้าวที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 ที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส และที่อัตราส่วนอะลูมินาเบตร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยการวิเคราะห์ลักษณะ

พื้นผิวและองค์ประกอบของเบตที่เกิดการรวมตัวกัน ทำการเลือกตัวอย่างจากเวลาที่เบตใช้ในการเสียดสภาพฟลูอิดเบตน้อยที่สุดในแต่ละอัตราส่วนผสมและในแต่ละอุณหภูมิ เพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย SEM/EDX

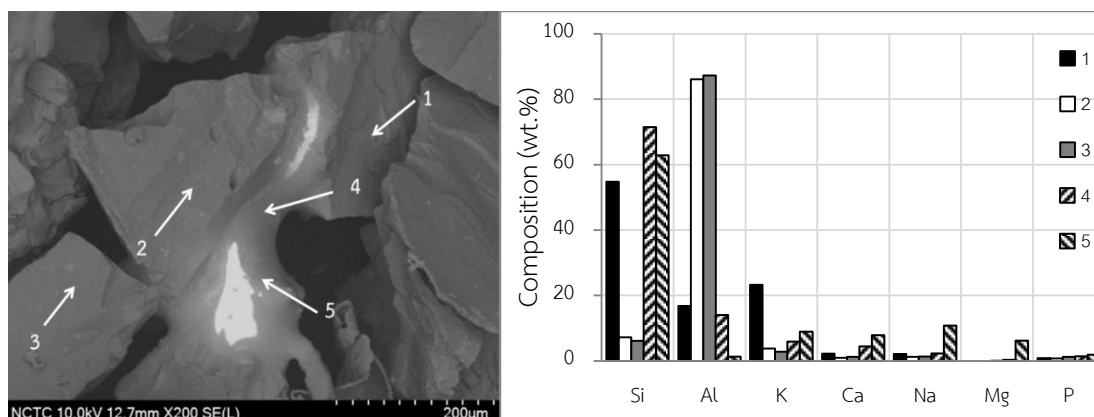
4.3.1 อัตราส่วนผสม 0.2

ผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบตที่เกิดการรวมตัวกันที่อัตราส่วนผสม 0.2 และที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ด้วย SEM/EDX แสดงดังภาพที่ 4.8 ถึง 4.12



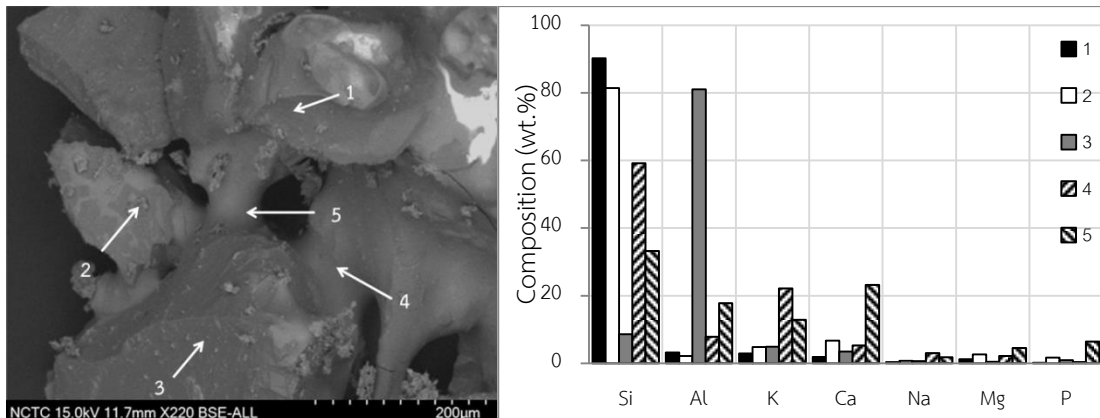
ภาพที่ 4.8 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันที่อัตราส่วนผสม 0.2 อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50

จากภาพที่ 4.8 พบว่าอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50 ซึ่งเป็นตัวแทนของเบตที่รวมตัวกันที่อัตราส่วนผสม 0.2 และอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่า ที่จุดเชื่อมต่อของเบตบริเวณจุด 1 2 และ 3 มีองค์ประกอบของ Si Al และ K เป็นหลัก ซึ่งคาดว่าเป็นจุดเชื่อมต่อของอะลูมินาและซิลิกา นอกจากนี้ยังพบ Ca Na และ Mg ในปริมาณเล็กน้อย



ภาพที่ 4.9 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75

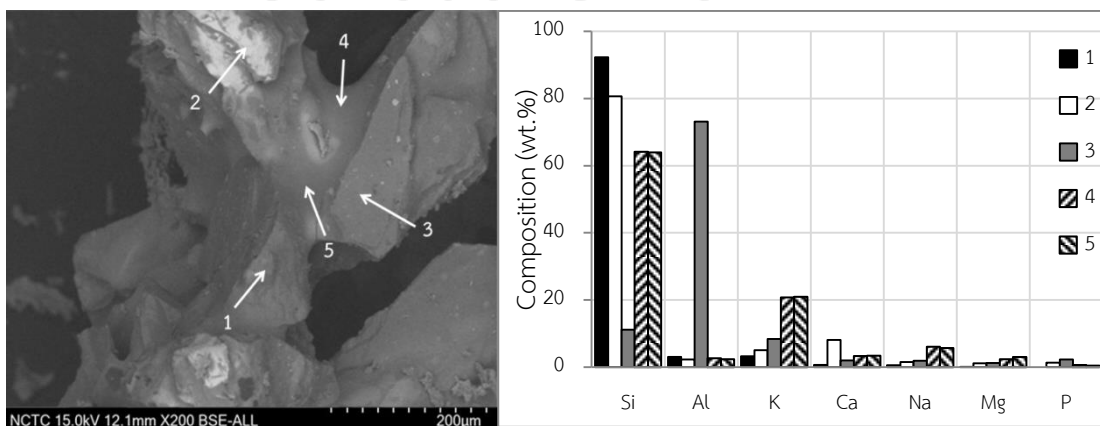
จากภาพที่ 4.9 พบว่าพื้นผิวอนุภาคเบตของการทดลองที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75 ซึ่งเป็นตัวแทนของเบตที่รวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยจุด 1 2 และ 3 เป็นตัวแทนของบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเบตและจุด 4 และ 5 เป็นตัวแทนของบริเวณจุดเชื่อมต่อของอนุภาค จากผล EDX ของจุดที่ 1 พบว่ามีองค์ประกอบของ Si และ K ในปริมาณสูง คาดว่าเป็นพื้นผิวของอนุภาคเบตซิลิกาที่เกิดจากการเคลือบของสารผสม $K_2O-CaO-SiO_2$ ซึ่งสารนี้มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส จุดที่ 2 และ 3 เป็นพื้นผิวของอนุภาคเบตที่มีปริมาณองค์ประกอบของ Al สูง คาดว่าเป็นพื้นผิวของอนุภาคเบตอะลูมินา จุดที่ 4 และ 5 เป็นบริเวณจุดเชื่อมต่อที่มีปริมาณ Si และ K สูงและมีปริมาณ Ca Na และ Mg ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในแก้วของฟางข้าวคือ SiO_2 K_2O และ CaO ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเป็นสารผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ $K_2O-CaO-SiO_2$ ทำให้เกิดการเชื่อมติดของอนุภาคเบตได้



ภาพที่ 4.10 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบรรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25

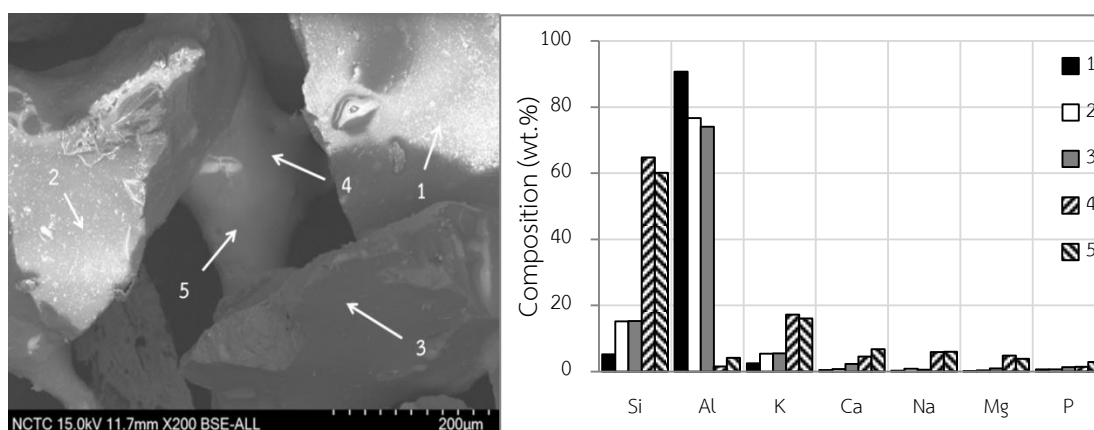
จากภาพที่ 4.10 พบว่า ผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเบรรวมตัวกันด้วย SEM และ EDX ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25 ที่จุดที่ 1 และ 2 มีปริมาณองค์ประกอบของ Si สูงและมีองค์ประกอบของ K ในปริมาณเล็กน้อย แสดงถึงพื้นผิวของซิลิกาเบรที่ไม่มีการเคลือบอยู่ของสารผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ จุดที่ 3 พบว่ามีปริมาณองค์ประกอบของ Al สูงและองค์ประกอบอื่น ๆ น้อยเช่นกัน ดังนั้นจึงแสดงถึงพื้นผิวของอนุภาคอะลูมินาเบรที่ไม่มีการเคลือบด้วยสารจุดหลอมเหลวต่ำเช่นกัน ขณะที่จุดที่ 4 และ 5 พบว่ามีปริมาณองค์ประกอบของ Si และ K ในปริมาณสูงซึ่งสามารถเกิดเป็นองค์ประกอบของสารจุดหลอมเหลวต่ำได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 4.11 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบรรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50

จากภาพที่ 4.11 พบว่าผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันด้วย SEM และ EDX ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50 ที่จุด 1 และ 2 ซึ่งเป็นบริเวณพื้นผิวของซิลิกาเบตมีองค์ประกอบของ Si สูงและ K ต่ำ ที่จุด 3 เป็นบริเวณพื้นผิวของอะลูมินาเบตมีองค์ประกอบของ Al สูงและมีองค์ประกอบของ Si และ K ต่ำ ขณะที่จุดที่ 4 และ 5 บริเวณจุดเชื่อมต่่อมี่องค์ประกอบของ Si และ K สูงตามลำดับ



ภาพที่ 4.12 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 100

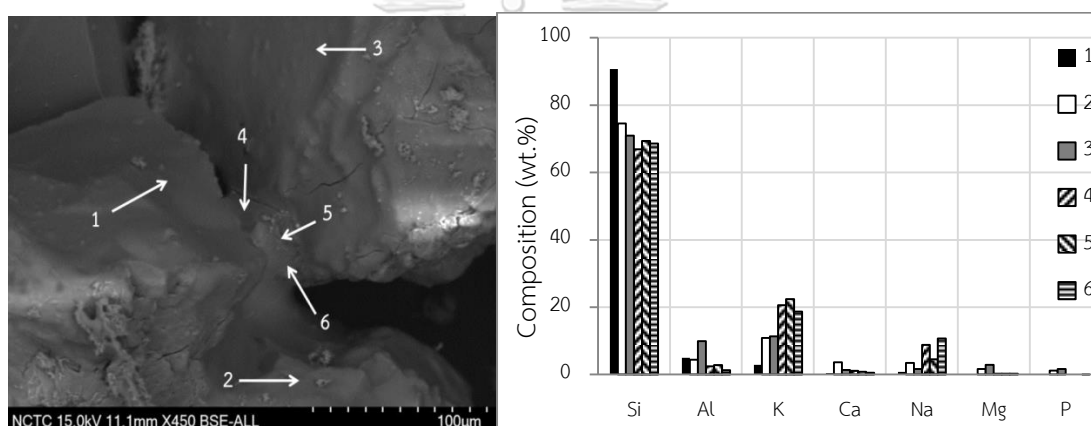
จากภาพที่ 4.12 พบว่าผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันด้วย SEM และ EDX ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 100 ที่จุด 1 2 และ 3 ซึ่งเป็นบริเวณพื้นผิวของอะลูมินาเบตมีองค์ประกอบของ Al สูงและมีองค์ประกอบของ Si และ K ต่ำ ขณะที่จุดที่ 4 และ 5 มีองค์ประกอบของ Si สูงตามด้วย K Ca Na และ Mg ตามลำดับ

จากผลการศึกษาเบตที่รวมตัวกันในตัวอย่างที่เลือกมา ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 ที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่า เบตสามารถเกิดการรวมตัวกันได้ในทุกอุณหภูมิและทุกอัตราส่วนของอะลูมินาเบตด้วยการต่อกันของสารผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ $K_2O-CaO-SiO_2$ ที่สามารถเกิดการหลอมเหลวเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 720 องศาเซลเซียสด้วยองค์ประกอบของ SiO_2 K_2O และ CaO ที่มีในฟางข้าว ขณะที่พื้นผิวของอนุภาคเบตซิลิกา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่พื้นผิวของเบตมีปริมาณองค์ประกอบของ K ลดลง นอกจากนี้ที่พื้นผิวของอะลูมินา พบองค์ประกอบของ K น้อยทั้งที่

อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เบดที่รวมตัวในกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบ ฟลูอิดไรส์เบดของฟางข้าวโดยใช้อัตราส่วนอะลูมินาต่าง ๆ เกิดการรวมตัวกันด้วยการหลอมเหลว (Melt-induced) เป็นหลัก ซึ่งเป็นการชนกันของอนุภาคเบดกับอนุภาคเถ้าที่หลอมเหลวทำให้เกิดการรวมตัวกัน ขณะที่การรวมตัวกันจากการเคลือบ (Coating-induced) ของสารหลอมเหลวที่พื้นผิวของอนุภาคเบดเกิดเพียงเล็กน้อย

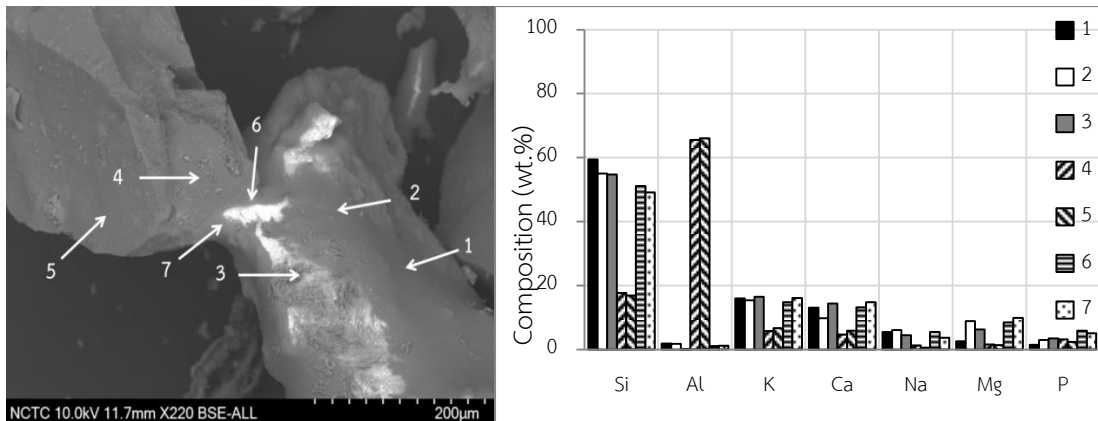
4.3.2 อัตราส่วนสมมูล 0.4

ผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบดที่เกิดการรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียสด้วย SEM/EDX แสดงดังภาพที่ 4.13 ถึง 4.19



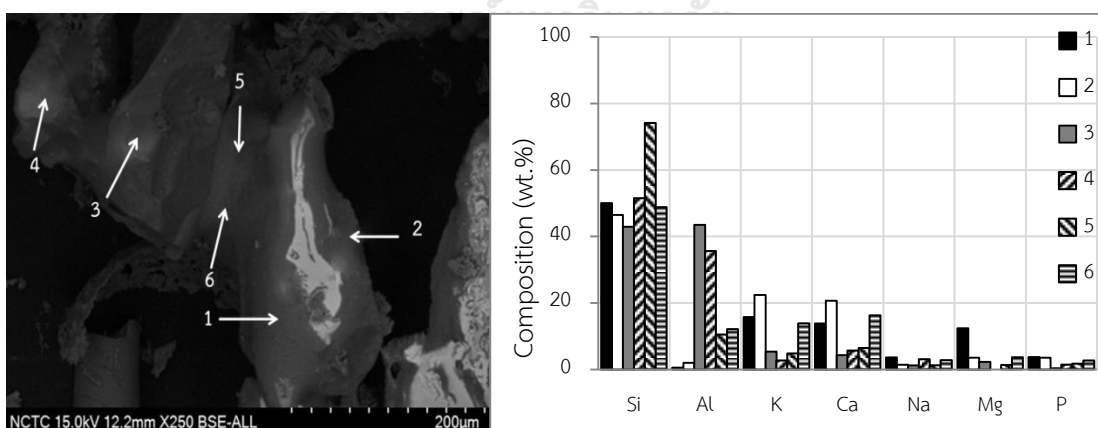
ภาพที่ 4.13 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบดรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0

จากภาพที่ 4.13 พบว่าพื้นผิวอนุภาคเบดและจุดเชื่อมต่อของเบดในการทดลองที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 ซึ่งเป็นตัวแทนของเบดที่รวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่จุด 1 2 และ 3 พบปริมาณองค์ประกอบของ Si สูงและมีองค์ประกอบของ K เล็กน้อย ขณะที่จุดที่ 4 5 และ 6 ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อมีปริมาณ K มากกว่าบริเวณพื้นผิวถึง 2 เท่า และปริมาณ Si ใกล้เคียงกับบริเวณจุดที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นบริเวณพื้นผิวของเบด



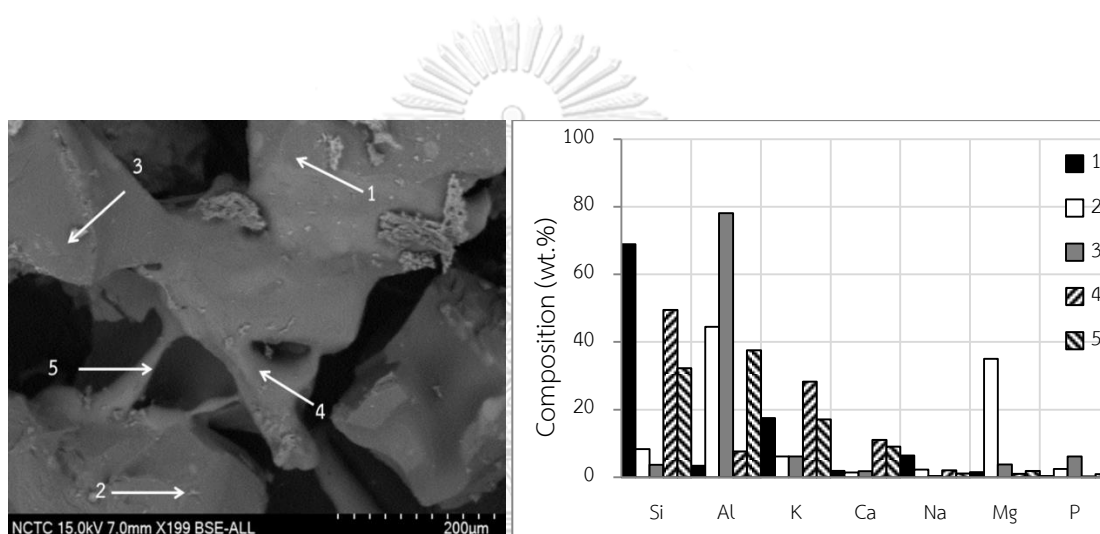
ภาพที่ 4.14 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50

จากภาพที่ 4.14 แสดงพื้นผิวนุภาคเบตและจุดเชื่อมต่อของเบตในการทดลองที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50 ซึ่งเป็นตัวแทนของเบตที่รวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่าที่จุดที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นผิวนุภาคซิลิกา มีองค์ประกอบของ Si สูง และมีองค์ประกอบของ K Ca Na และ Mg ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งคาดได้ว่าที่พื้นผิวของอนุภาคซิลิกาถูกเคลือบด้วยสารหลอมเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ ขณะที่พื้นผิวของอะลูมินาที่จุด 3 และ 4 มีองค์ประกอบของ Al สูง และมีปริมาณของ Si K และ Ca ต่ำ และจุดที่ 6 และ 7 เป็นตัวแทนของจุดเชื่อมต่อที่มีปริมาณองค์ประกอบในลักษณะคล้ายกับพื้นผิวของซิลิกา



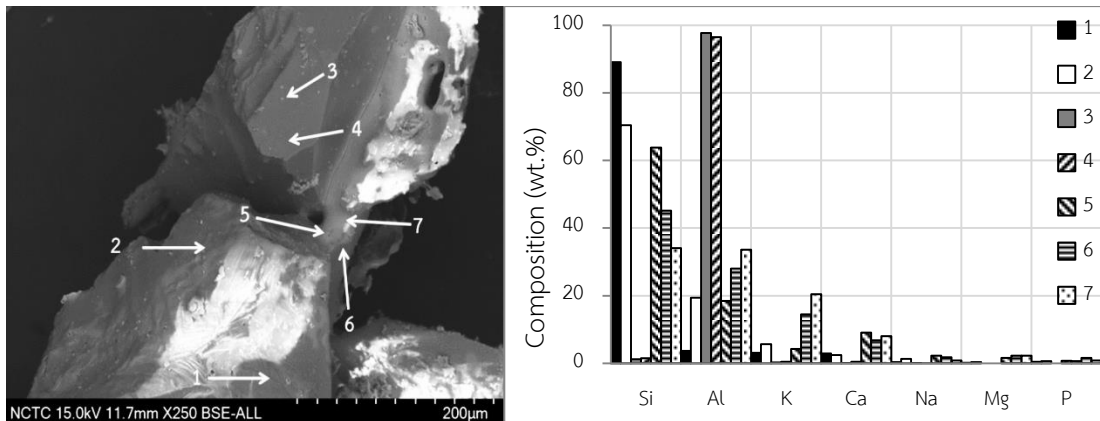
ภาพที่ 4.15 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25

จากภาพที่ 4.15 แสดงพื้นผิวอนุภาคเบตและจุดเชื่อมต่อของเบตในการทดลองที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25 ซึ่งเป็นตัวแทนของเบตที่รวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่า ที่จุด 1 และ 2 มีองค์ประกอบของ Si K และ Ca เป็นเป็นหลักและมีองค์ประกอบของ Al ปริมาณน้อยซึ่งคาดว่าบริเวณพื้นผิวของซิลิกาที่มีการเคลือบด้วยสารผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ นอกจากนี้ที่จุด 3 และ 4 พบปริมาณองค์ประกอบของ Al ปริมาณสูง และมีองค์ประกอบของ Si สูงด้วย คาดว่าเป็นบริเวณพื้นผิวของอะลูมินาที่มีสารผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำติดอยู่ และจุดที่ 5 และ 6 ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อมักประกอบหลักคือ Si K และ Ca



ภาพที่ 4.16 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75

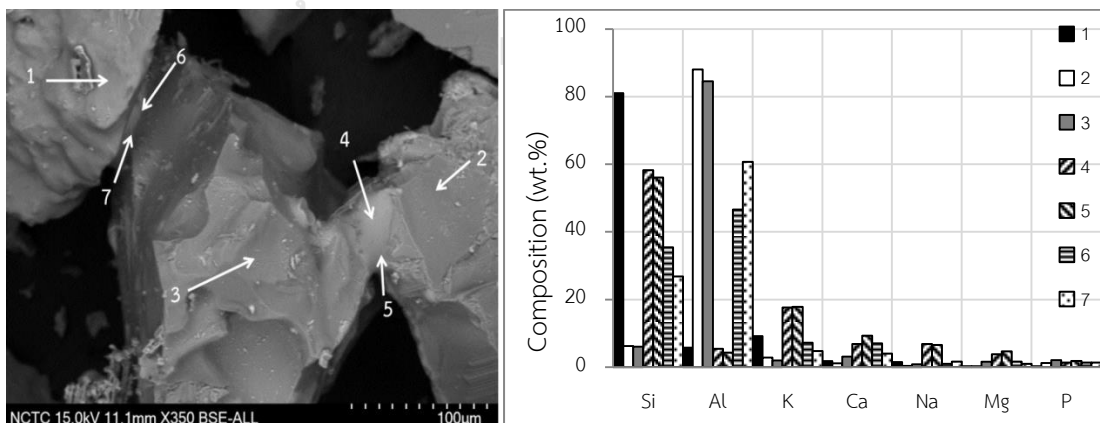
จากภาพที่ 4.16 แสดงพื้นผิวอนุภาคเบตและจุดเชื่อมต่อของเบตในการทดลองที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75 ซึ่งเป็นตัวแทนของเบตที่รวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่า จุดที่ 1 มีองค์ประกอบของ Si ปริมาณสูงและมีองค์ประกอบของ K และ Ca ปริมาณเล็กน้อย ขณะที่ จุดที่ 2 และ 3 มีองค์ประกอบของ Al สูงและมี Si K และ Ca ปริมาณเล็กน้อย นอกจากนี้ที่จุด 2 ยังพบองค์ประกอบของ Mg สูงซึ่งน่าจะมาจากเถ้าของฟางข้าวที่อยู่ในบริเวณผิวของอะลูมินา ที่จุด 4 และ 5 บริเวณจุดเชื่อมต่อนพบว่ามีองค์ประกอบของ Si K และ Ca



ภาพที่ 4.17 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50

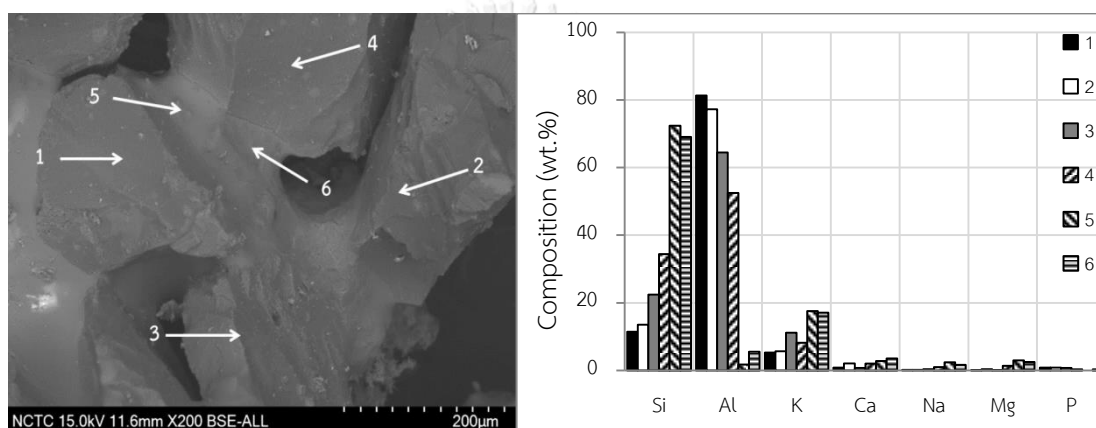
จากภาพที่ 4.17 แสดงพื้นผิวนุภาคเบตและจุดเชื่อมต่อของเบตในการทดลองที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 50 ซึ่งเป็นตัวแทนของเบตที่รวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่า จุดที่ 1 และ 2 มีองค์ประกอบของ Si สูงและองค์ประกอบของ K น้อย แสดงถึงพื้นผิวของซิลิกาไม่มีสารจุดหลอมเหลวต่ำเคลือบอยู่ นอกจากนี้ที่จุด 3 และ 4 มีองค์ประกอบของ Al สูงและมีสารประกอบอื่นปริมาณน้อยเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงพื้นผิวของอะลูมินาไม่มีการเคลือบ ขณะที่จุดเชื่อมต่อที่จุด 5 6 และ 7 มีองค์ประกอบของ Si และ K สูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.18 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75

จากภาพที่ 4.18 แสดงพื้นผิวอนุภาคเบตและจุดเชื่อมต่อของเบตในการทดลองที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75 ซึ่งเป็นตัวแทนของเบตที่รวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่า จุดที่ 1 มีองค์ประกอบของ Si ปริมาณสูงและมีองค์ประกอบของ K ในปริมาณต่ำ แสดงถึงพื้นผิวที่ไม่มีสารหลอมเหลวอุณหภูมิต่ำเคลือบอยู่ และบริเวณจุดที่ 2 และ 3 พบว่า องค์ประกอบของ Al ปริมาณสูงและ Si ปริมาณเล็กน้อย ส่วนบริเวณที่เชื่อมต่อกันที่จุด 4 และ 5 มีอัตราส่วนองค์ประกอบของ Si สูง ตามด้วย K และ Ca ตามลำดับ



ภาพที่ 4.19 SEM และ EDX แสดงลักษณะพื้นผิวของเบตรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 100

จากภาพที่ 4.19 แสดงพื้นผิวอนุภาคเบตและจุดเชื่อมต่อของเบตในการทดลองที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 75 ซึ่งเป็นตัวแทนของเบตที่รวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าจุดที่ 1 2 3 และ 4 มีองค์ประกอบของ Al สูง ซึ่งแสดงถึงพื้นผิวของอะลูมินาเบต และจุดที่ 5 และ 6 มีองค์ประกอบของ Si และ K สูง ซึ่งเป็นของประกอบของสารหลอมเหลวอุณหภูมิต่ำ

จากผลการศึกษาเบตที่รวมตัวกันในตัวอย่างที่เลือกมา ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 ที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่า $K_2O-CaO-SiO_2$ สามารถเกิดได้ในจุดเชื่อมต่อของจุดอัตราส่วนอะลูมินาและในทุกอุณหภูมิ ขณะการเคลือบของ $K_2O-CaO-SiO_2$ บริเวณพื้นผิวของซิลิกาพบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เบตใช้เวลาในการรวมตัวกัน

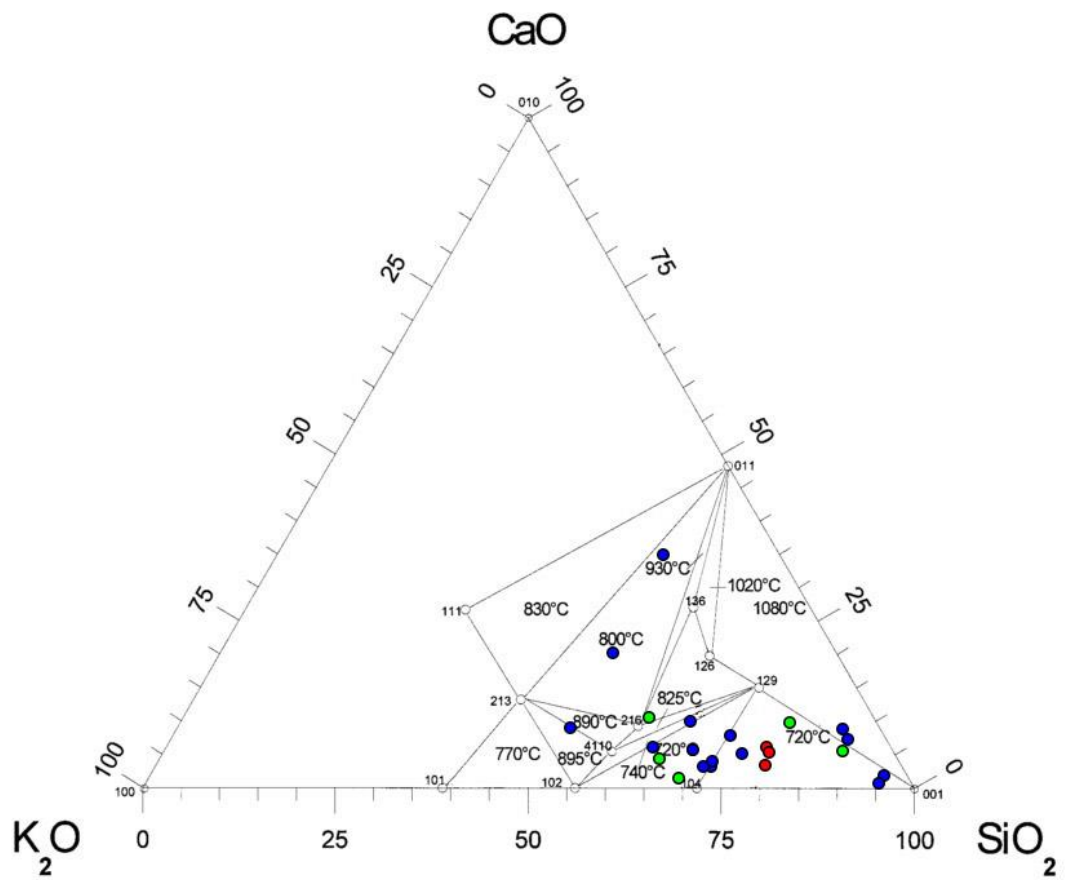
นานจึงมีโอกาให้เกิดทั้งการเชื่อมติดและการเคลือบของ $K_2O-CaO-SiO_2$ ที่พื้นผิวของซิลิกาเบต ขณะที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส มีสารหลอมเหลวปริมาณมาก เบตจึงเกิดการรวมตัวแบบเชื่อมติดซึ่งทำให้เบตรวมตัวกันภายในระยะเวลาอันรวดเร็วจึงทำให้มีโอกาเกิดการเคลือบที่ผิวได้น้อยลง

เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการรวมตัวกันของเบต จึงได้นำผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่ได้จากเทคนิค EDX ที่บริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบตและบริเวณพื้นผิวของเบต มาทำการคำนวณปรับสัดส่วนของ K Ca และ Si ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของ K_2O CaO และ SiO_2 ในขณะที่เกิดกระบวนการทางเคมีความร้อน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มากำหนดตำแหน่งในแผนภาพ $K_2O-CaO-SiO_2$ นอกจากนี้ในการกำหนดตำแหน่งในแผนภาพ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ ใช้วิธีการคำนวณโดยปรับสัดส่วนของ K Al และ Si แล้วนำข้อมูลที่ได้มากำหนดตำแหน่งในแผนภาพเช่นเดียวกับแผนภาพของ $K_2O-CaO-SiO_2$ โดยจุดสีแดง จุดสีเขียว และจุดสีน้ำเงิน แสดงถึงการทดลองที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า บริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบตในการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 สารผสมที่พบมีจุดหลอมเหลวยูเทคติกที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ขณะที่บริเวณพื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินา พบสารผสมที่มีจุดหลอมเหลวยูเทคติกมากกว่า 700 องศาเซลเซียส ส่วนการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูล 0.2 พบว่า บริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบต บริเวณพื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินา มีสารผสมที่มีจุดหลอมเหลวยูเทคติกที่อุณหภูมิ 720-825 องศาเซลเซียส ขณะที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 บริเวณพื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินาพบสารผสม 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 มีจุดหลอมเหลวยูเทคติกที่ 720-825 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ 2 มีจุดหลอมเหลวยูเทคติกมากกว่า 800 องศาเซลเซียส ส่วนบริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบต บริเวณพื้นผิวบางส่วนของซิลิกาและอะลูมินาในการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 สารผสมที่พบมีจุดหลอมเหลวยูเทคติกที่ 720-890 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตาม ที่บริเวณพื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินา ยังพบสารผสมที่มีจุดหลอมเหลวยูเทคติกที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส ดังนั้นแสดงว่าพื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินาบางส่วนไม่ได้ถูกเคลือบด้วยสารผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังแสดงที่ภาพที่ 4.20 และ 4.21

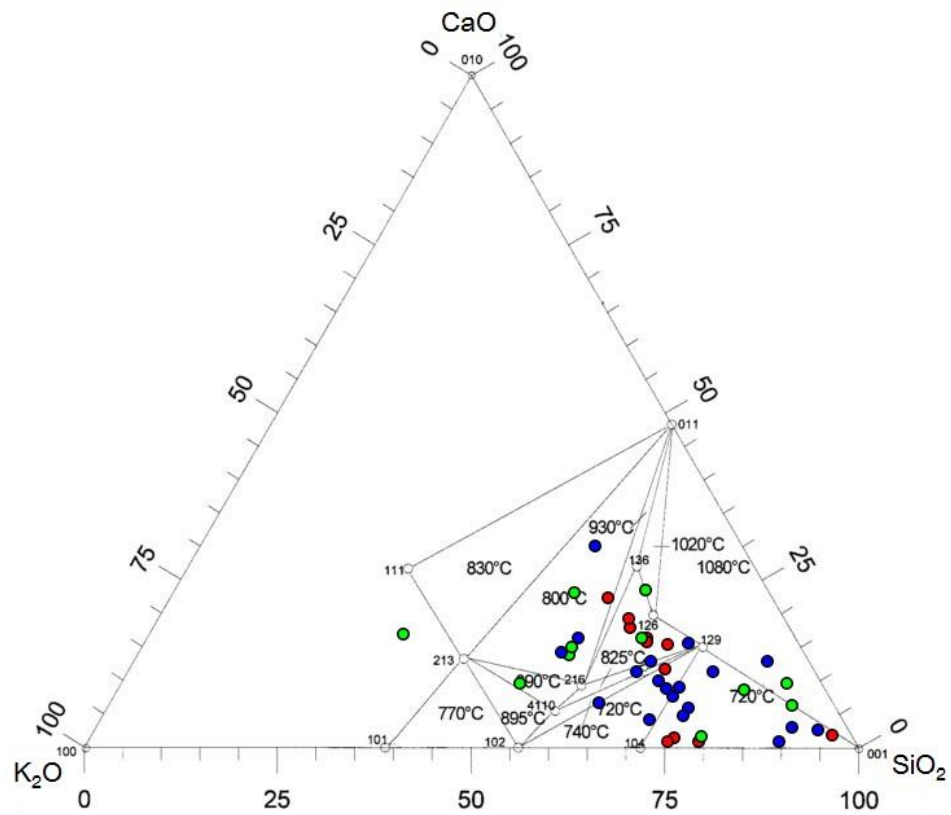
นอกจากนี้เมื่อนำข้อมูลกำหนดตำแหน่งในแผนภาพของระบบที่มีองค์ประกอบของ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ พบว่า บริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบต ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน

สมมูล 0.2 และ 0.4 สารผสมที่พบมีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวยูเทคติกสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงไม่เกิดการหลอมเหลวจากสารผสมในระบบ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ ส่วนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูล 0.2 บริเวณที่จุดเชื่อมต่อกันของเบต บริเวณพื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินา สารผสมที่พบมีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวยูเทคติกสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ขณะที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 บริเวณที่จุดเชื่อมต่อกันของเบต สารผสมที่พบมีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวยูเทคติก 695-725 องศาเซลเซียส ส่วนบริเวณพื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินา สารผสมที่พบมีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวยูเทคติกสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 บริเวณที่จุดเชื่อมต่อกันของเบตพบว่า มีสารผสมที่มีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวยูเทคติก 710-725 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถเกิดการหลอมเหลวได้เมื่อดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ขณะที่บริเวณพื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินา สารผสมที่พบมีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวยูเทคติกสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส ดังนั้นที่ผิวพื้นของซิลิกาและอะลูมินาจึงไม่พบการเคลือบพื้นผิวที่เกิดจากการหลอมเหลวของสารผสมในระบบ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ ดังแสดงภาพที่ 4.22 และ 4.23

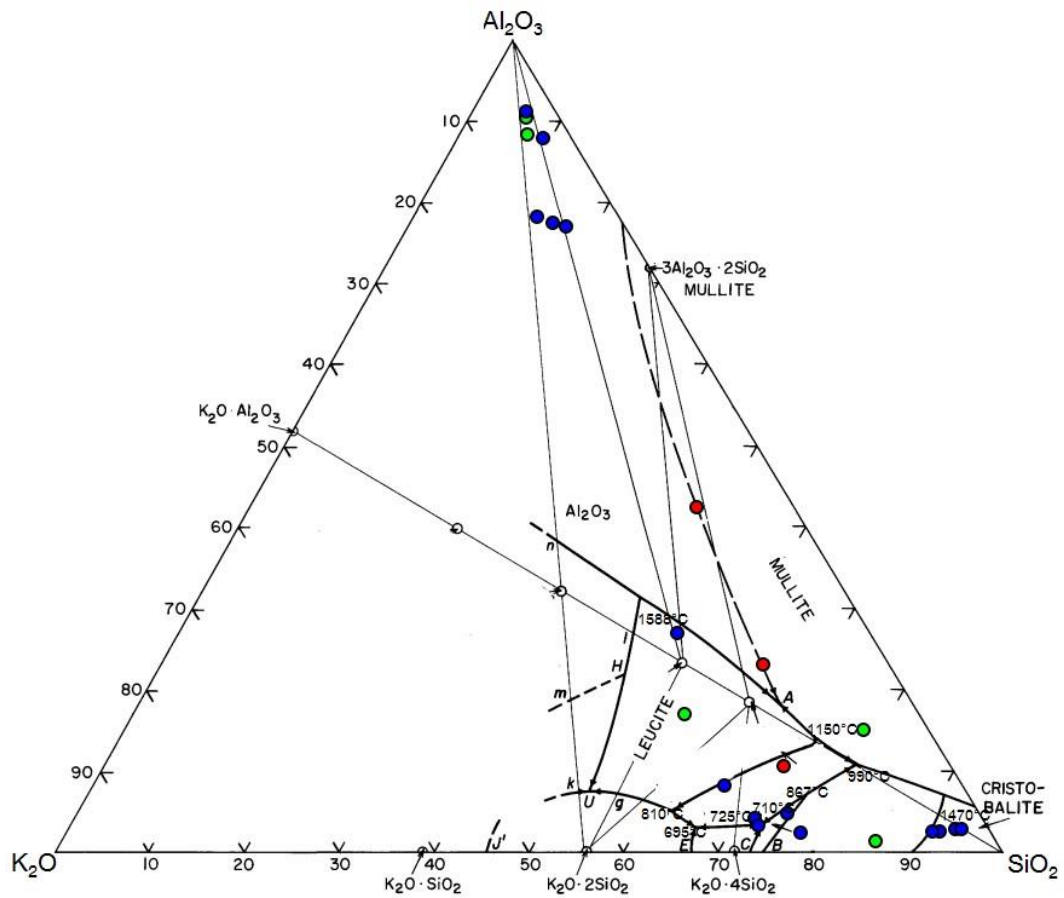
ผลการศึกษาพฤติกรรมรวมตัวกันของเบตที่จุดเชื่อมต่อกันของเบต บริเวณพื้นผิวของเบตที่อุณหภูมิ 700 ถึง 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 0.2 และ 0.4 โดยการนำผล EDX แต่ละจุดที่ทำการวิเคราะห์ของประกอบของธาตุมากำหนดตำแหน่งในแผนภาพ $K_2O-CaO-SiO_2$ และ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ พบว่า ที่บริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบต มีสารผสมในระบบ $K_2O-CaO-SiO_2$ ที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียสทั้งในอัตราส่วน 0.2 และ 0.4 ขณะที่สารผสมในระบบ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ พบสารหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ดำเนินการทดลองเฉพาะที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ส่วนบริเวณพื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินาเบต พบเฉพาะสารผสมในระบบ $K_2O-CaO-SiO_2$ ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ดำเนินการทดลอง เมื่อดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส



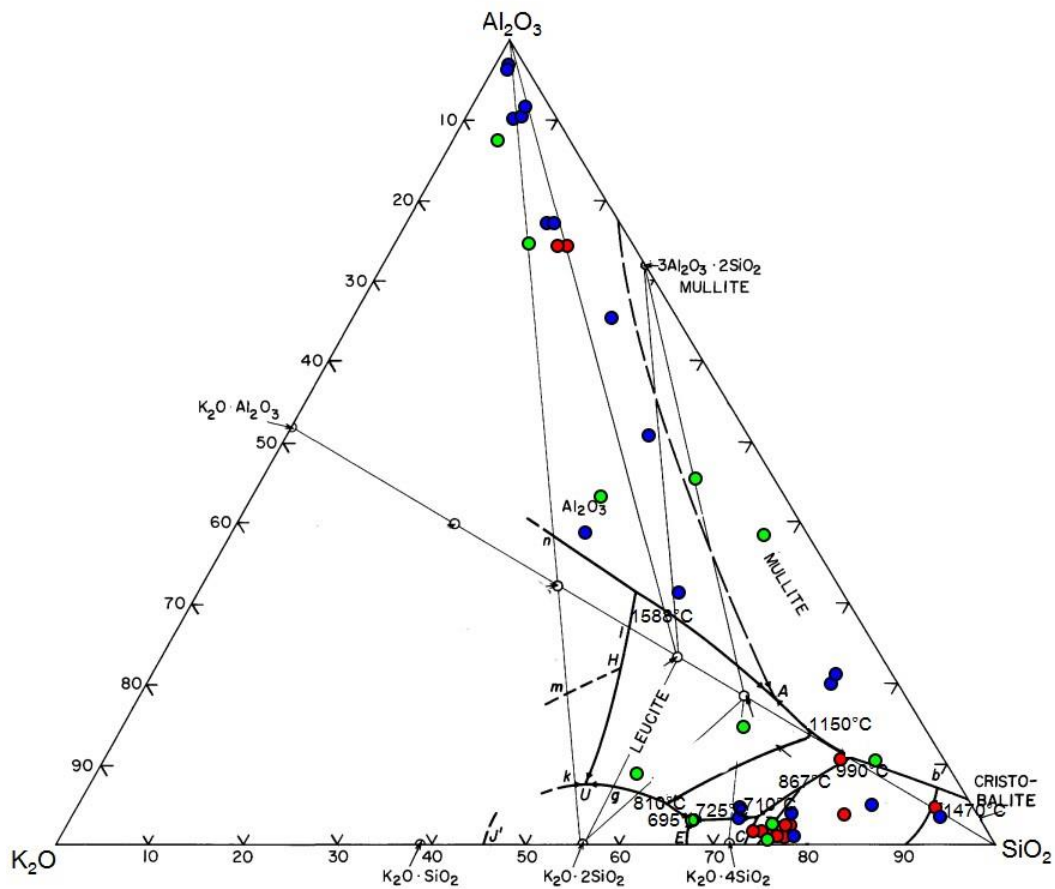
ภาพที่ 4.20 แผนภาพ K_2O - CaO - SiO_2 แสดงอุณหภูมิยูเทคติกที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 โดยจุดสีแดง จุดสีเขียวและจุดสีน้ำเงิน แสดงถึงอุณหภูมิในการทดลองที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ภาพที่ 4.21 แผนภาพ K_2O - CaO - SiO_2 แสดงอุณหภูมิยูเทคติกที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 โดยจุดสีแดง จุดสีเขียวและจุดสีน้ำเงิน แสดงถึงอุณหภูมิในการทดลองที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ภาพที่ 4.22 แผนภาพ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ แสดงอุณหภูมิยูเทคติกที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 โดยจุดสีแดง จุดสีเขียวและจุดสีน้ำเงิน แสดงถึงอุณหภูมิในการทดลองที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



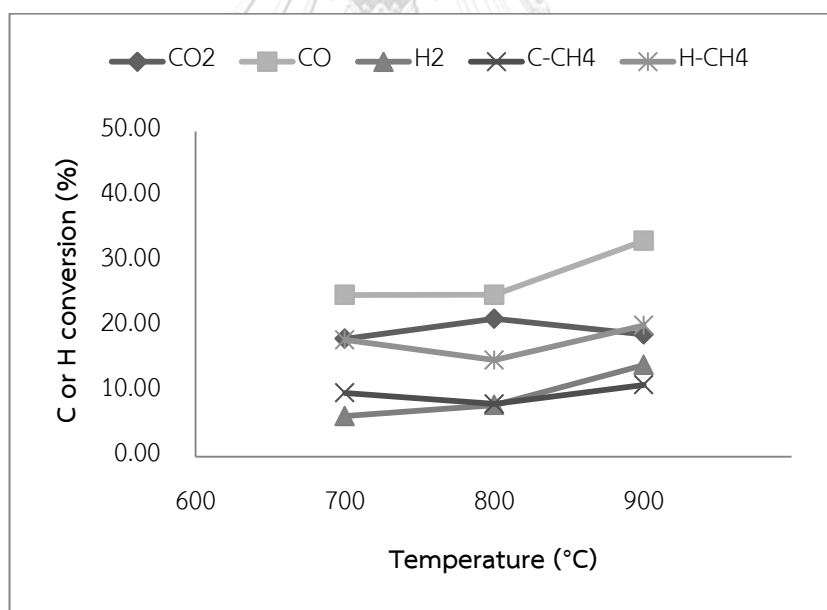
ภาพที่ 4.23 แผนภาพ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ แสดงอุณหภูมิยูเทคติกที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 โดยจุดสีเขียวและจุดสีน้ำเงิน แสดงถึงอุณหภูมิในการทดลองที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

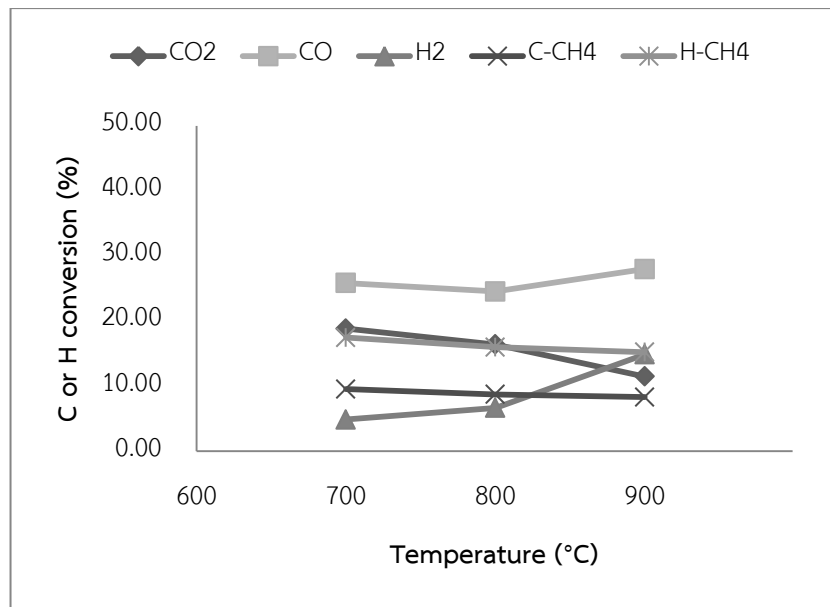
4.4 ผลวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซิฟิเคชันของฟางข้าวที่สภาวะต่างๆ

ในการศึกษาการรวมตัวกันของเบดในกระบวนการแกซิฟิเคชันแบบฟลูอิดซ์เบดของฟางข้าว ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ โดยคำนวณการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในฟางข้าวเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซมีเทน วิธีการคำนวณค่าการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนแสดงไว้ในภาคผนวก ก. จากการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงจากร้อยละ 17.17-18.83 เป็น 11.49-15.73 ที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25 และ 50 สำหรับก๊าซ

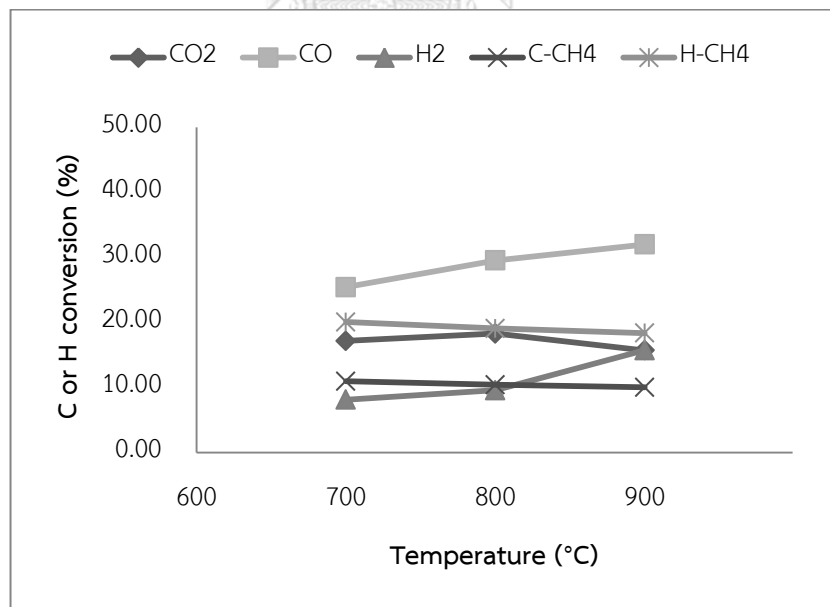
คาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วนอะลูมินา 0 75 และ 100 มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18.12-22.53 เป็นร้อยละ 18.80-30.32 ส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 24.87-28.73 เป็นร้อยละ 27.99-33.18 ที่ทุก ๆ อัตราส่วนอะลูมินา การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากร้อยละ 8.91-10.78 เป็นร้อยละ 10.84-11.04 ที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 และ 100 ส่วนที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 25 50 และ 75 พบว่าก๊าซมีเทนมีค่าลดลงจากร้อยละ 9.55-10.97 เป็นร้อยละ 8.32-10.04 สำหรับการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซไฮโดรเจน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น พบว่า ก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.87-8.11 เป็นร้อยละ 12.49-16.21 ที่ทุก ๆ อัตราส่วนอะลูมินา ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทน พบว่าลดลงจากร้อยละ 17.46-20.07 เป็นร้อยละ 15.22-18.37 ที่อัตราส่วนอะลูมินา ร้อยละ 25 50 และ 75 แต่ที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 และ 100 มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 17.97-19.73 ถึงร้อยละ 19.84-20.19 ดังภาพที่ 4.24-4.28



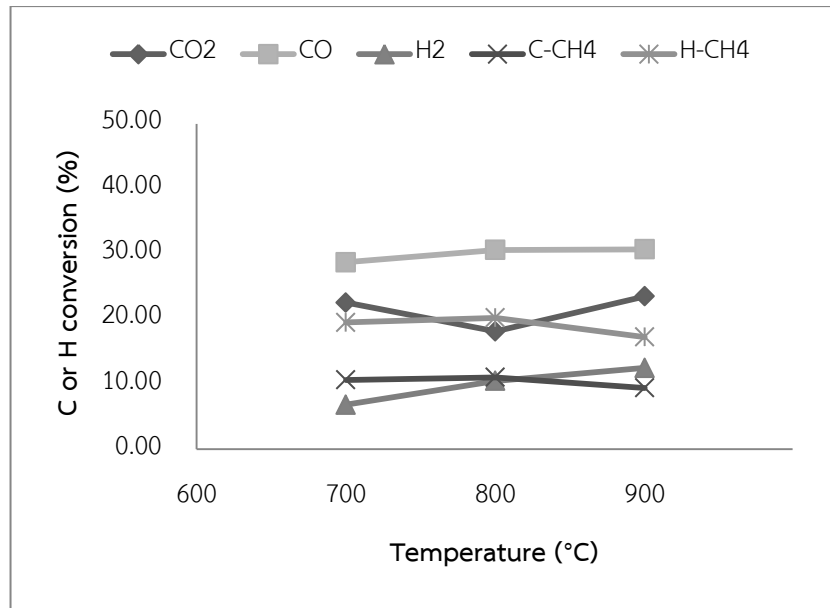
ภาพที่ 4.24 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 0



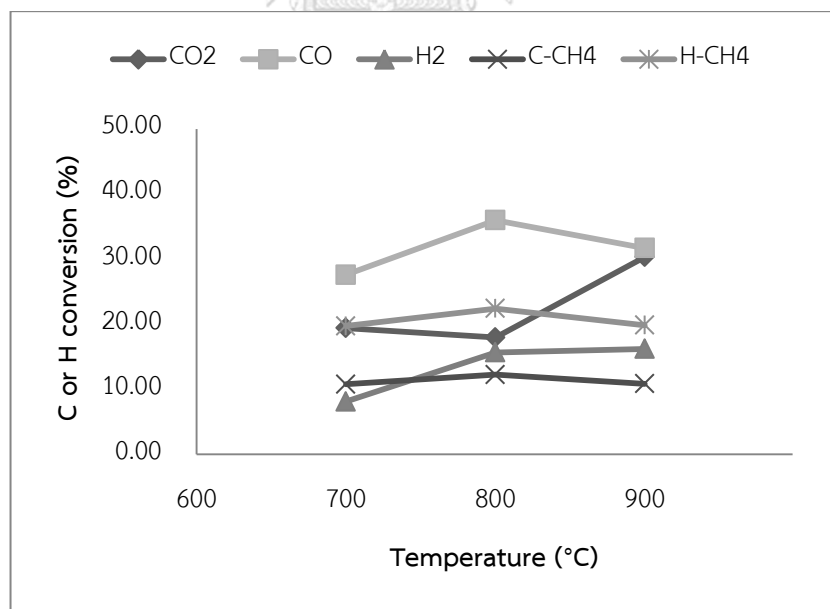
ภาพที่ 4.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 25



ภาพที่ 4.26 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 50

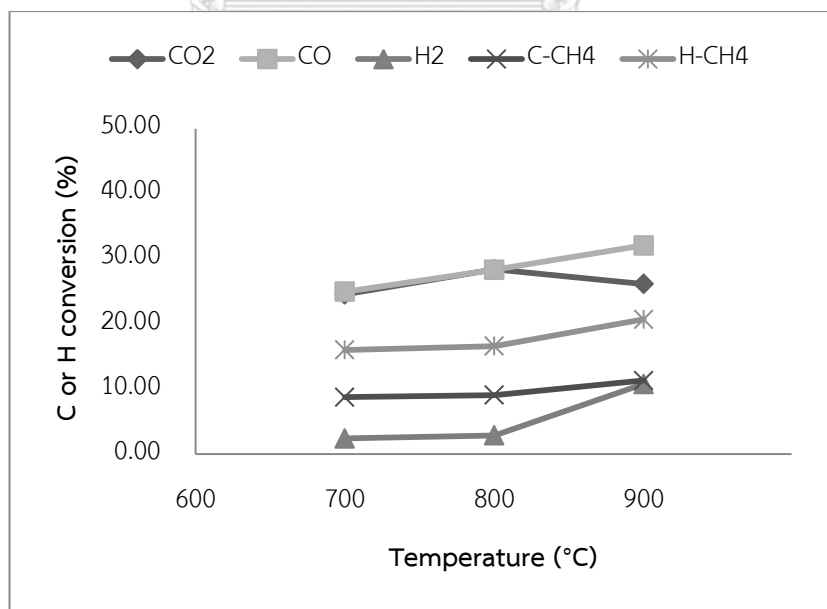


ภาพที่ 4.27 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 75

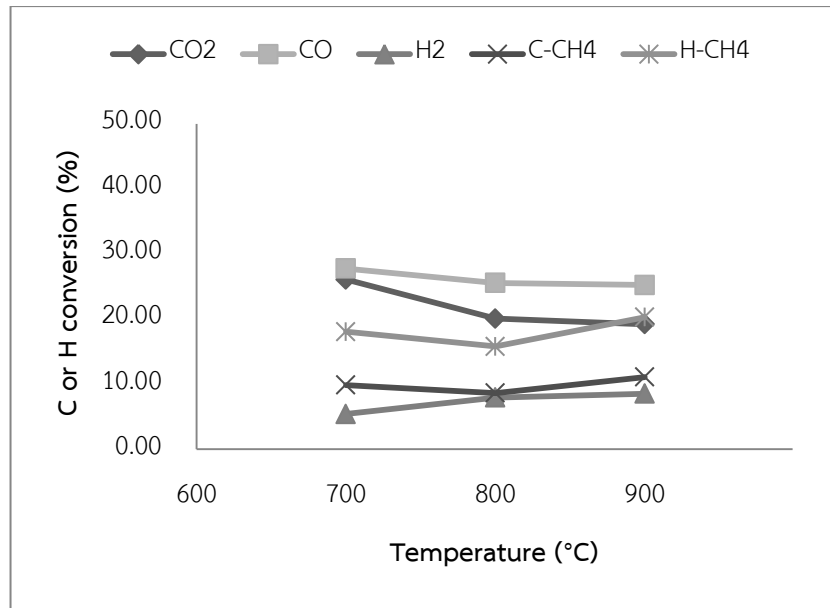


ภาพที่ 4.28 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 100

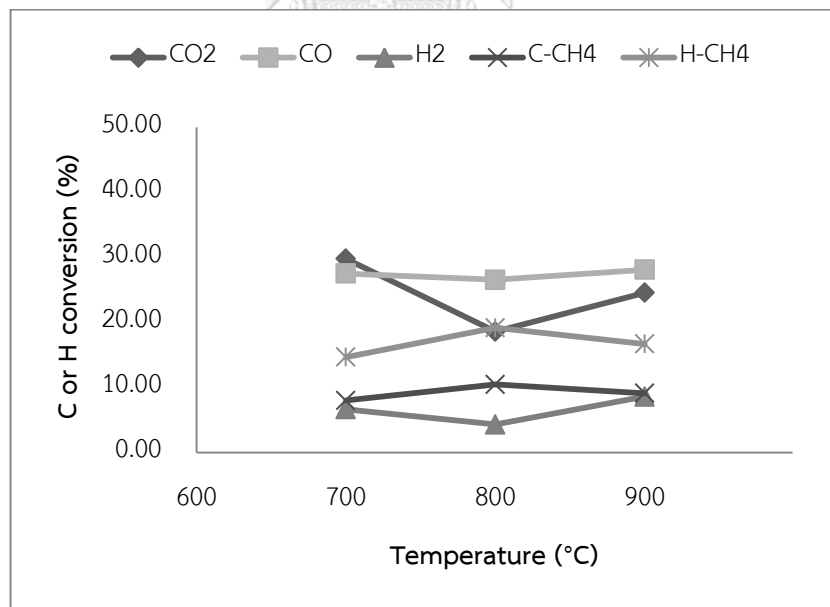
สำหรับที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงจากร้อยละ 26.07-31.12 เป็นร้อยละ 19.21-24.57 ในทุก ๆ อัตราส่วนอะลูมินา ยกเว้นที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 24.54 เป็นร้อยละ 26.15 ส่วนการแปรสภาพเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์พบว่าลดลงจากร้อยละ 27.78-32.96 เป็นร้อยละ 24.53-28.11 ในทุก ๆ อัตราส่วนอะลูมินา ยกเว้นที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 24.97 เป็นร้อยละ 32.07 สำหรับการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซมีเทน พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 8.02-9.86 เป็นร้อยละ 9.12-11.32 ที่อัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 0 25 และ 50 แต่ที่อัตราส่วนอื่น ๆ ก๊าซมีเทนมีค่าลดลงจากร้อยละ 11.00-11.68 เป็นร้อยละ 8.61-8.26 ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 14.68-18.04 เป็นร้อยละ 16.69-20.71 ที่อัตราส่วนอะลูมินาร้อยละ 0 25 และ 50 ส่วนที่ร้อยละ 75 และ 100 มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 20.14-21.38 เป็นร้อยละ 15.11-15.76 สำหรับการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุก ๆ อัตราส่วนของอะลูมินา โดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2.41-7.59 เป็นร้อยละ 7.75-10.78 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.29-4.33



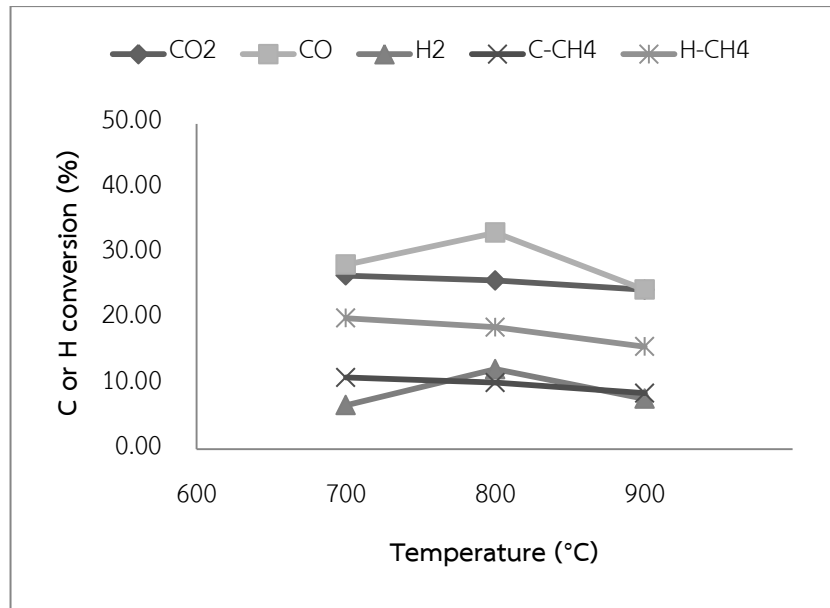
ภาพที่ 4.29 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 0



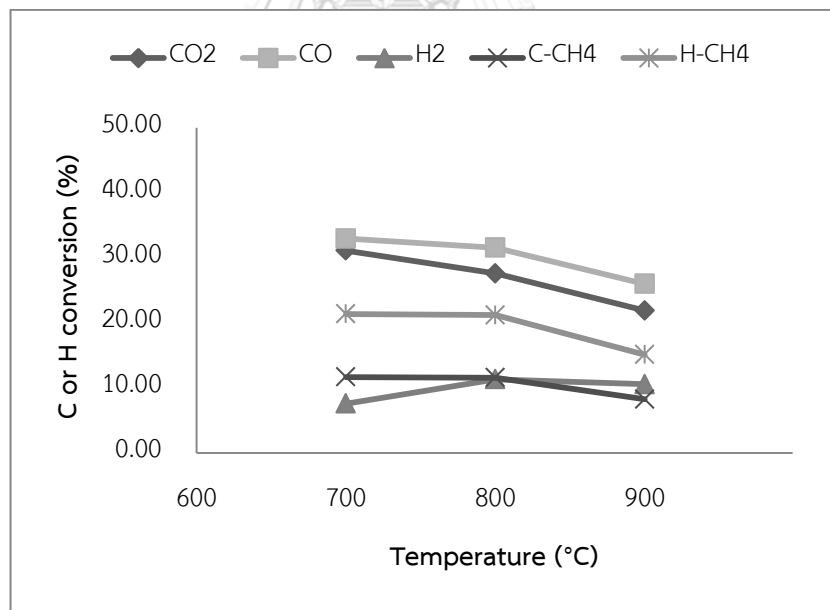
ภาพที่ 4.30 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 25



ภาพที่ 4.31 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 50

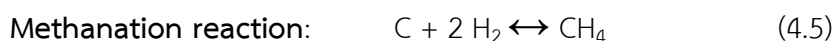
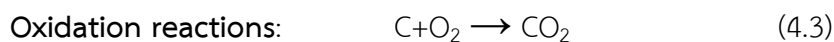
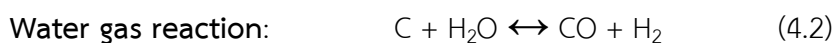
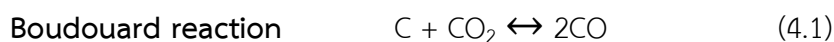


ภาพที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 75

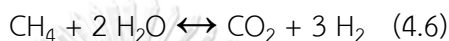


ภาพที่ 4.33 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 100

ปฏิกิริยาที่มีผลต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่สภาวะต่าง ๆ



Steam methane reforming reaction:



จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิ อัตราส่วนสมมูล และอัตราส่วนของอะลูมินา มีผลต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยในการเร่งปฏิกิริยา Boudouard ซึ่งส่งผลให้การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้า (ทางขวามือ) จึงเป็นการสนับสนุนการสร้างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ อีกทั้งอุณหภูมิที่สูงยังช่วยในการเร่งปฏิกิริยา Water gas shift ด้วยเช่นกัน ซึ่งสนับสนุนการสร้างก๊าซไฮโดรเจน เนื่องด้วยเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เช่นเดียวกับปฏิกิริยา Boudouard ดังสมการที่ 4.1-4.2 สำหรับการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา Oxidation ดังสมการที่ 4.3-4.4 และลดลงจากการถูกใช้ไปในปฏิกิริยาที่ 4.1 สำหรับการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทน พบว่าเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยา Methanation ดังสมการที่ 4.5 และลดลงจากการถูกใช้ไปในปฏิกิริยา Steam methane reforming ดังสมการที่ 4.6 ส่วนผลของอัตราส่วนสมมูลที่ส่งผลต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ พบว่าอัตราส่วนสมมูลที่สูงขึ้น มีผลต่อการเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้สูงขึ้น เนื่องจากการเป็นการเติมออกซิเจนเข้าสู่ระบบ จึงมีออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในฟางข้าวเพิ่มมากขึ้น เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของอะลูมินาส่งผลต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาร่วมกับอุณหภูมิและอัตราส่วนสมมูล

งานวิจัยนี้ได้ทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้อะลูมินาและซิลิกาในกระบวนการแกซีฟิเคชันของฟางข้าวโดยใช้เตาฟลูอิดไดซ์เบด อีกทั้งยังศึกษาผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมในการเดินระบบ ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูล 0.2 สามารถรักษาสภาพฟลูอิดไดซ์ของเบดได้นานกว่าที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน มีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส สำหรับอัตราส่วนของอะลูมินาที่สูงขึ้นมีผลช่วยให้เบดมีสภาพฟลูอิดไดซ์นานขึ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แต่ขณะที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส กลับส่งผลให้เบดมีสภาพฟลูอิดไดซ์สั้นลง สำหรับผลของอัตราส่วนสมมูลพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำเวลาที่เบดมีสภาพฟลูอิดไดซ์มีค่าไม่แตกต่างกัน ในทางกลับกันที่อุณหภูมิสูงพบว่า อัตราส่วนสมมูลมีผลต่อเวลาที่เบดมีสภาพฟลูอิดไดซ์ ในส่วนของบริเวณพื้นที่ผิวและจุดเชื่อมต่อกันของเบดที่เกิดการรวมตัวกัน เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ (Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X-Ray Analysis, SEM and EDX) พบว่า ที่จุดเชื่อมต่อกันของเบดในทุกอุณหภูมิที่ดำเนินการทดลองมี Si K และ Ca เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถเกิดเป็นสารผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำคือ $K_2O-CaO-SiO_2$ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เบดเกิดการรวมตัวกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างซิลิกาและอะลูมินาต่อการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบต โดยใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบ โดยศึกษาในสภาวะที่อุณหภูมิ อัตราส่วนของเบตและอัตราส่วนสมมูลแตกต่างกัน ทำการป้อนวัตถุดิบในอัตรา 4 กรัมต่อนาที ดำเนินการทดลองจนเบตเสียสภาพฟลูอิดไคซ์และเกิดการรวมตัวกัน หลังจากนั้นนำเบตที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ (SEM/EDX) โดยในงานวิจัยนี้สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังต่อไปนี้

อุณหภูมิมีผลต่อการรวมตัวกันของเบต โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองส่งผลให้เบตเกิดการรวมตัวกันเร็วขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการดำเนินการทดลองสูงกว่าอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวของสารผสม $K_2O-CaO-SiO_2$ และ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ จึงทำให้สารผสมเหล่านี้เกิดการหลอมเหลวเป็นสารที่มีความหนืดและทำให้อนุภาคเบตเกิดการเชื่อมติดกัน ดังนั้น 700 องศาเซลเซียส จึงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการทดลองของฟางข้าวในกระบวนการแกซีฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์

และเมื่อการศึกษาอัตราส่วนของเบตที่ใช้ในการวิจัยพบว่า อัตราส่วนร้อยละของอะลูมินาที่เพิ่มขึ้นส่งผลในการเพิ่มเวลาที่เบตมีสภาพฟลูอิดไคซ์ที่อุณหภูมิต่ำ ในทางกลับกันการเพิ่มของอัตราส่วนร้อยละของอะลูมินากลับทำให้เวลาที่เบตมีสภาพฟลูอิดไคซ์สั้นลงที่อุณหภูมิสูง

อัตราส่วนสมมูลเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการรวมตัวกันของเบตในกระบวนการแกซีฟิเคชัน ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับอุณหภูมิแล้วที่อุณหภูมิต่ำ อัตราส่วนสมมูลไม่ส่งผลต่อเวลาที่เบตมีสภาพฟลูอิดไคซ์ ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราส่วนสมมูลที่เพิ่มขึ้นส่งผลในการเพิ่มเวลาที่เบตมีสภาพฟลูอิดไคซ์นานขึ้น

และเมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของเบตที่เกิดการรวมตัวกันด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์พบว่า ที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส จุดเชื่อมต่อของอนุภาคเบตประกอบไปด้วย ซิลิกอน (Si) โพแทสเซียม (K) และ แคลเซียม (Ca) โดยสามธาตุนี้เป็นองค์ประกอบของ SiO_2 K_2O และ CaO ตามลำดับ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำคือ $K_2O-CaO-SiO_2$ ขณะที่พื้นผิวของอะลูมินาเบตพบ

ธาตุทั้งสามนี้เป็นองค์ประกอบน้อยกว่า ซึ่งจากการศึกษาพบว่า บริเวณพื้นผิวของอะลูมินาเบดสามารถเกิด $K_2O-CaO-SiO_2$ เมื่อทำการทดลองที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามที่พื้นผิวของซิลิกาบางส่วนกลับมีองค์ประกอบของ ซิลิกอน (Si) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของซิลิกามีสารหลอมเหลวเคลือบอยู่

สำหรับก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิสูงส่งผลในการสร้างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น จากปฏิกิริยา Boudouard และ Water gas ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วนสมมูลที่สูงขึ้นส่งผลในการสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นด้วย

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนา ปรับปรุงกระบวนการแกซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบดให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น เพื่อรักษาสภาพฟลูอิดไคซ์เบดและลดการเกิดการรวมตัวกันของเบดในการทดลอง อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการระดับอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล โดยช่วยลดความถี่ในการหยุดเดินเครื่องเพื่อเปลี่ยนวัสดุเบด อีกทั้งลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาระบบด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรศึกษาวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของซิลิกา โพแทสเซียมและแคลเซียมน้อย มาใช้เป็นวัตถุดิบในการวิจัยร่วมกับฟางข้าว โดยศึกษาผลของอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย
- 5.2.2 ควรศึกษาผลของตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน (Gasifying agent) ชนิดอื่น เช่น ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ หรือ ไอน้ำ เป็นต้น
- 5.2.3 ควรศึกษาผลของความเร็วของก๊าซที่เข้าสู่ระบบ (Air velocity) ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน เพื่อลดเวลาในการรวมตัวกันของเบด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, (2528). ฟลูอิดไดเซชัน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทยปี2557. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: www.dede.go.th/.../Thailand%20Alternative%20Energy%20Situation%202014.pdf. 2016.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ข้อมูลของปีการเพาะปลูก พ.ศ. 2556. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html. 2016.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร สถิติการเกษตรของประเทศไทยปี พ.ศ .2559 [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.oae.go.th/download/download_journal/2560/yearbook59.pdf. 2017

ภาษาอังกฤษ

Alauddin, Z. A. B. Z., Lahijani, P., Mohammadi, M. and Mohamed, A. R. (2010). Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2852-2862. doi: 10.1016/j.rser.2010.07.026

Arun, K. and Ramanan, M . Research Article Experimental studies on gasification of corn cobs in a fixed bed system. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2016, 8(7):667-676

Bartels, M., Lin, W., Nijenhuis, J., Kapteijn, F. and van Ommen, J. R. (2008). Agglomeration in fluidized beds at high temperatures: Mechanisms, detection and prevention. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(5), 633-666.

Basu, P. (2006). *Combustion and gasification in fluidized beds*: Taylor & Francis Group, LLC.

- Brown, R. C. (2011). *Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*: John Wiley & Sons.
- Calvo, L. F., Gil, M. V., Otero, M., Moran, A. and Garcia, A. I. (2012). Gasification of rice straw in a fluidized-bed gasifier for syngas application in close-coupled boiler-gasifier systems. *Bioresour Technol*, 109, 206-214. doi: 10.1016/j.biortech.2012.01.027
- Chaivatamaset, P., Sricharoon, P., Tia, S. and Bilitewski, B. (2014). The characteristics of bed agglomeration/defluidization in fluidized bed firing palm fruit bunch and rice straw. *Applied Thermal Engineering*, 70(1), 737-747. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.061
- Fryda, L. E., Panopoulos, K. D. and Kakaras, E. (2008). Agglomeration in fluidised bed gasification of biomass. *Powder Technology*, 181(3), 307-320. doi: 10.1016/j.powtec.2007.05.022
- Gadde, B., Menke, C. and Wassmann, R. (2009). Rice straw as a renewable energy source in India, Thailand, and the Philippines: Overall potential and limitations for energy contribution and greenhouse gas mitigation. *Biomass and Bioenergy*, 33(11), 1532-1546. doi: 10.1016/j.biombioe.2009.07.018
- Ghaly, a. E., Ergudenler, A. and Laufer, E. (1994). Study of agglomeration characteristics of silica sand-straw ash mixtures using scanning electronic microscopy and energy dispersion X-ray techniques. *Bioresour Technol*, 48(2), 127-134.
- Goyal, H. B., Seal, D. and Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 504-517.
- Gupta, C. K. and Sathiyamoorthy, D. (1998). *Fluid Bed Technology in Materials Processing*.
- Huber, G. W., Iborra, S. and Corma, A. (2006). Synthesis of transportation fuels from biomass: Chemistry, catalysts, and engineering. *Chemical Reviews*, 106(9), 4044-4089.
- Kunii, D., and Levenspiel, O. (1969). *Fluidization Engineering*. New York, USA John Wiley & Sons.

- Kuo, J.-H., Lin, C.-L. and Wey, M.-Y. (2011). Effect of alkali concentrations and operating conditions on agglomeration/defluidization behavior during fluidized bed air gasification. *Powder Technology*, 214(3), 443-446. doi: 10.1016/j.powtec.2011.08.044
- Lim, J. S., Abdul Manan, Z., Wan Alwi, S. R. and Hashim, H. (2012). A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3084-3094. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.051
- Lin, W., Dam-Johansen, K. and Frandsen, F. (2003). Agglomeration in bio-fuel fired fluidized bed combustors. *Chemical Engineering Journal*, 96(1-3), 171-185. doi: 10.1016/j.cej.2003.08.008
- Morey, G. W. (1964). Phase-equilibrium relations of the common rock-forming oxides except water. US Government Printing Office.
- Ninduangdee, P. and Kuprianov, V. I. (2016). A study on combustion of oil palm empty fruit bunch in a fluidized bed using alternative bed materials: Performance, emissions, and time-domain changes in the bed condition. *Applied Energy*, 176, 34-48.
- Öhman, M., Nordin, A., Skrifvars, B.-J., Backman, R., and Hupa, M. (2000). Bed Agglomeration Characteristics during Fluidized Bed Combustion of Biomass Fuels. *Energy & Fuels*, 14(1), 169-178.
- Rozainee, M., Ngo, S. P., Salema, A. A., Tan, K. G., Ariffin, M. and Zainura, Z. N. (2008). Effect of fluidising velocity on the combustion of rice husk in a bench-scale fluidised bed combustor for the production of amorphous rice husk ash. *Bioresour Technol*, 99(4), 703-713. doi: 10.1016/j.biortech.2007.01.049
- Sathiyamoorthy, C. K. G. a. D. (1998). *Fluid Bed Technology in Materials Processing*.
- Serrano, D., Sánchez-Delgado, S., Sobrino, C. and Marugán-Cruz, C. (2015). Defluidization and agglomeration of a fluidized bed reactor during *Cynara cardunculus* L. gasification using sepiolite as a bed material. *Fuel Processing Technology*, 131, 338-347.
- Seville, J. P. and Clift, R. (1984). The effect of thin liquid layers on fluidisation characteristics. *Power Technology*, 37(1), 117-129.

- Shimizu, T., Han, J., Choi, S., Kim, L., and Kim, H. (2006). Fluidized-bed combustion characteristics of cedar pellets by using an alternative bed material. *Energy and Fuels*, 20(6), 2737-2742.
- Uamusse, Mi. Persson, K and Tsamba, A. Gasification of Cashew Nut Shell Using Gasifier Stovein Mozambique. *Journal of Power and Energy Engineering*. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2, 11-18.
- Unchaisri, T. and Fukuda, S. (2017). Co-firing of coal and rice straw pellet in a circulating fluidized-bed reactor. *Energy Procedia*, 138, 766-771.
- Visser, H. J. M., Kiel, J. H. A. and Veringa, H. J. (2004). The influence of fuel composition on agglomeration behaviour in fluidised-bed combustion. Delft: Energy research Centre of the Netherlands ECN.
- Warnecke, R. (2000). Gasification of biomass: Comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 18(6), 489-497.
- Yang, W.-C. (2003). *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*. Dekker, New York.
- Yu, C., Qin, J., Nie, H., Fang, M. and Luo, Z. (2011). Experimental research on agglomeration in straw-fired fluidized beds. *Applied Energy*, 88(12), 4534-4543. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.05.046
- Zhang, L., Xu, C. C., and Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969-982



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

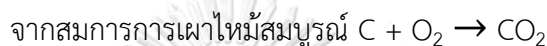
ภาคผนวก ก

การคำนวณ

1. การคำนวณอัตราส่วนสมมูล

อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนปริมาณออกซิเจนต่อปริมาณเชื้อเพลิงแห้งที่ใช้จริง เทียบกับอัตราส่วนปริมาณออกซิเจนต่อปริมาณเชื้อเพลิงทางทฤษฎี

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการเผาไหม้จากคาร์บอนเท่านั้น



ในกรณีนี้ จะเห็นได้ว่า C 1 โมล ทำปฏิกิริยากับ O₂ 1 โมล เกิดปฏิกิริยาอย่างสมมูลกัน ค่า ER จึงเท่ากับ 1

ในการคำนวณอัตราการออกซิเจน

จากความชื้นของฟางข้าว = ร้อยละ 9.30

ของแข็งในฟางข้าว = 100-9.30 = ร้อยละ 90.7

คาร์บอนในฟางข้าว = ร้อยละ 44.00

อัตราการป้อนชีวมวลเข้าสู่ระบบ = 4 กรัมต่อนาที

ดังนั้น คาร์บอนเข้าสู่ระบบ = (4 × 0.907 × 0.44)

= 1.597 กรัมคาร์บอนต่อนาที

= 1.596/12 โมลต่อนาที

= 0.1330 โมลต่อนาที

ดังนั้น ต้องใช้ออกซิเจน 0.1330 โมลต่อนาที ในการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

ถ้าต้องการดำเนินการกระบวนการแกซิฟิเคชันที่ ER = 0.2

ดังนั้นต้องใช้ออกซิเจน = 0.2 × 0.1330 โมลต่อนาที = 0.0266 โมลต่อนาที

= 0.0266 โมลต่อนาที × 24.45 ลิตรต่อโมล (ที่ 25°C)

= 0.65 ลิตรต่อนาที

ถ้าต้องการดำเนินการกระบวนการแกซิฟิเคชันที่ ER = 0.4

ดังนั้นต้องใช้ออกซิเจน = 0.4 × 0.1330 โมลต่อนาที = 0.0532 โมลต่อนาที

$$= 0.0532 \text{ โมลต่อนาที} \times 24.45 \text{ ลิตรต่อโมล (ที่ } 25^{\circ}\text{C)}$$

$$= 1.30 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

2. การคำนวณการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน

2.1 การแปรสภาพของคาร์บอน

ค่าก๊าซคาร์บอนไดมอนอกไซด์จากเครื่องวัดก๊าซ	= ร้อยละ 2.89
อัตราการไหลของก๊าซผลิตภัณฑ์	= 30 ลิตรต่อนาที
ดังนั้น ปริมาตรของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	= $(30 \times 2.89)/100$
	= 0.87 ลิตรต่อนาที
	= $0.87/24.45 = 0.035$ โมล
ต่อนาที	
คาร์บอนในฟางข้าว	= ร้อยละ 44.00
ความชื้นของฟางข้าว	= ร้อยละ 9.30
ป้อนตัวอย่างเข้าสู่ระบบ	= 4 กรัมต่อนาที
ดังนั้น ป้อนคาร์บอนเข้าสู่ระบบ	= 1.597 กรัมต่อนาที
	= 0.1330 โมลต่อนาที
ดังนั้น ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	
	= $(0.035/0.1330) \times 100$
	= 26.31

2.2 การแปรสภาพของไฮโดรเจน

ค่าก๊าซไฮโดรเจนจากเครื่องวัดก๊าซ	= ร้อยละ 0.99
อัตราการไหลของก๊าซผลิตภัณฑ์	= 30 ลิตรต่อนาที
ดังนั้น ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน	= $(30 \times 0.99)/100$
	= 0.297 ลิตรต่อนาที
	= $0.297/24.45 = 0.0121$
โมลต่อนาที	
ไฮโดรเจนในฟางข้าว	= ร้อยละ 7.64

ความชื้นของฟางข้าว	= ร้อยละ 9.30
ป้อนตัวอย่างเข้าสู่ระบบ	= 4 กรัมต่อนาที
ดังนั้น ป้อนไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ	= 0.030 กรัมต่อนาที
	= 0.030 โมลต่อนาที

ดังนั้น ร้อยละการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซไฮโดรเจน = $(0.0121/0.030) \times 100 \times 2 = 8.06$

3. การวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 ที่มีต่อเวลาที่เบดมีสภาพฟลูอิดซ์

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลทางสถิติของแต่ละอัตราส่วนสมมูลที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
700	ER 0.2	54.20	5	4.868	2.177
	ER 0.4	53.40	5	3.912	1.749
800	ER 0.2	32.80	5	3.421	1.530
	ER 0.4	30.40	5	3.362	1.503
900	ER 0.2	11.00	5	3.317	1.483
	ER 0.4	14.80	5	3.962	1.772

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4

Temperature (°C)	Paired Differences					t	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference			
				Lower	Upper		
700	0.80	3.033	1.356	-2.97	4.57	0.590	0.587
800	2.40	2.793	1.249	-1.07	5.87	1.922	0.127
900	-3.80	1.924	0.860	-6.19	-1.41	-4.417	0.012

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลผลของอัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 ที่มีต่อเวลาที่เบตมีสภาพฟลูอิดไซ์สามารถสรุปได้ดังนี้

ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส Sig.2-tailed = 0.587

ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส Sig.2-tailed = 0.127

ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส Sig.2-tailed = 0.012

เมื่อค่า Sig.2-tailed < 0.05 แสดงว่า มีความสัมพันธ์กัน

เมื่อค่า Sig.2-tailed > 0.05 แสดงว่า ไม่มีความสัมพันธ์กัน

ดังนั้น ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส ผลของอัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 ต่อเวลาที่เบตมีสภาพฟลูอิดไซ์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ขณะที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ผลของอัตราส่วนสมมูล 0.2 และ 0.4 ต่อเวลาที่เบตมีสภาพฟลูอิดไซ์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 เวลาที่เบตเกิดการรวมตัวกันที่อัตราส่วนสมมูล อุณหภูมิและอัตราส่วนอะลูมินาเบตต่างๆ

อัตราส่วน สมมูล	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการรวมตัวกันของเบต (นาที)				
		0%	25%	50%	75%	100%
0.2	700	50	51	51	59	60
	800	37	35	32	28	32
	900	16	8	8	11	12
0.4	700	50	51	53	53	60
	800	36	28	29	28	31
	900	21	14	11	12	16

ตารางที่ ข.2 ร้อยละของธาตุในบริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบต พื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินาที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วน อะลูมินาเบต	ตำแหน่ง	ร้อยละของธาตุ						
			Si	Al	K	Ca	Na	Mg	P
700	50	1	62.6	9.9	13.7	3.5	5.3	4.6	0.3
		2	54.9	19.9	11.8	4.4	4.7	3.8	0.4
		3	45.1	40.2	9.2	3.0	1.4	0.5	0.7
800	75	1	54.8	16.8	23.3	2.2	2.1	0.0	0.8
		2	7.2	86.1	3.8	0.9	1.2	0.0	0.7
		3	6.1	87.3	2.8	1.2	1.3	0.1	1.2
		4	71.5	14.1	5.9	4.5	2.3	0.3	1.4
		5	62.9	1.3	9.0	7.9	10.8	6.2	1.9

ตารางที่ ข.2 ร้อยละของธาตุในบริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบต พื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินา ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ (อซ)	อัตราส่วน อะลูมินาเบต	ตำแหน่ง	ร้อยละของธาตุ						
			Si	Al	K	Ca	Na	Mg	P
900	25	1	90.2	3.2	2.9	1.9	0.4	1.2	0.2
		2	81.4	2.2	4.8	6.7	0.7	2.6	1.7
		3	8.6	81.0	4.9	3.5	0.6	0.5	0.9
		4	59.2	7.8	22.1	5.3	3.0	2.2	0.4
		5	33.2	17.8	12.9	23.2	1.8	4.5	6.4
	50	1	92.3	3.0	3.2	0.7	0.6	0.1	0.0
		2	80.7	2.3	5.0	8.1	1.5	1.1	1.3
		3	11.1	73.1	8.4	2.0	1.9	1.2	2.3
		4	64.2	2.7	20.8	3.3	6.1	2.4	0.7
		5	64.0	2.4	21.0	3.4	5.7	3.0	0.5
	100	1	5.2	90.7	2.5	0.5	0.3	0.2	0.7
		2	15.2	76.7	5.4	0.8	0.9	0.4	0.7
		3	15.3	74.1	5.5	2.3	0.6	1.0	1.3
		4	64.8	1.5	17.2	4.5	5.9	4.8	1.4
		5	60.1	4.2	16.1	6.8	6.0	3.9	2.9

ตารางที่ ข.3 ร้อยละของธาตุในบริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบต พื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินา
ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (อซ)	อัตราส่วน อะลูมินาเบต	ตำแหน่ง	ร้อยละของธาตุ						
			Si	Al	K	Ca	Na	Mg	P
700	0	1	90.7	5.0	2.9	0.4	0.8	0.1	0.0
		2	71.0	9.9	11.4	1.4	1.7	2.9	1.7
		3	74.6	4.4	10.9	3.7	3.5	1.7	1.2
		4	66.9	2.4	20.6	1.1	8.8	0.2	0.0
		5	69.3	2.8	22.4	0.8	4.5	0.2	0.0
		6	68.6	1.3	18.7	0.5	10.7	0.2	0.1
	50	1	59.4	1.9	16.0	13.1	5.5	2.6	1.5
		2	55.0	1.8	15.4	9.8	6.1	8.9	3.0
		3	54.7	0.1	16.5	14.4	4.5	6.3	3.5
		4	17.7	65.5	5.8	4.7	1.3	1.6	3.2
		5	16.9	66.0	6.7	5.9	0.6	1.4	2.4
		6	51.1	1.1	14.8	13.2	5.5	8.5	5.9
		7	49.1	1.2	16.1	14.8	3.7	9.9	5.1
800	25	1	50.1	0.6	15.8	13.8	3.6	12.4	3.7
		2	46.5	2.0	22.4	20.7	1.4	3.5	3.5
		3	42.9	43.5	5.4	4.3	1.2	2.3	0.4
		4	51.5	35.6	2.7	5.7	3.1	0.0	1.4
		5	74.1	10.5	4.8	6.4	1.2	1.3	1.7
		6	48.8	12.1	13.8	16.3	2.8	3.6	2.7

ตารางที่ ข.3 ร้อยละของธาตุในบริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบต พื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินา
ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ (อซ)	อัตราส่วน อะลูมินาเบต	ตำแหน่ง	ร้อยละของธาตุ							
			Si	Al	K	Ca	Na	Mg	P	
800	75	1	68.9	3.4	17.5	1.9	6.4	1.5	0.4	
		2	8.3	44.5	6.1	1.4	2.3	35.0	2.4	
		3	3.7	78.1	6.1	1.8	0.4	3.8	6.1	
		4	49.5	7.7	28.3	11.1	2.1	1.0	0.3	
		5	32.3	37.6	17.1	9.1	1.1	1.9	0.9	
900	50	1	89.1	3.7	3.1	2.9	0.4	0.2	0.5	
		2	70.4	19.4	5.7	2.4	1.3	0.4	0.6	
		3	1.2	97.7	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	
		4	1.5	96.5	0.5	0.5	0.2	0.0	0.7	
		5	63.8	18.4	4.2	9.1	2.3	1.6	0.6	
		6	45.1	28.0	14.5	6.8	1.8	2.3	1.6	
		7	34.1	33.6	20.4	8.0	0.8	2.3	0.8	
		75	1	81.0	5.8	9.2	1.8	1.5	0.3	0.3
			2	6.2	88.0	2.8	1.1	0.4	0.3	1.2
			3	6.0	84.5	2.0	3.1	0.8	1.6	2.1
			4	58.2	5.4	17.6	6.8	6.8	3.8	1.3
			5	56.0	4.2	17.8	9.3	6.5	4.6	1.8
			6	35.4	46.6	7.2	7.0	0.9	1.6	1.3
		7	26.8	60.7	4.7	4.0	1.6	0.9	1.3	

ตารางที่ ข.3 ร้อยละของธาตุในบริเวณจุดเชื่อมต่อกันของเบต พื้นผิวของซิลิกาและอะลูมินา
ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 และที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ (อซ)	อัตราส่วน อะลูมินาเบต	ตำแหน่ง	ร้อยละของธาตุ						
			Si	Al	K	Ca	Na	Mg	P
	100	1	5.2	90.7	2.5	0.5	0.3	0.2	0.7
		2	15.2	76.7	5.4	0.8	0.9	0.4	0.7
		3	15.3	74.1	5.5	2.3	0.6	1.0	1.3
		4	64.8	1.5	17.2	4.5	5.9	4.8	1.4
		5	60.1	4.2	16.1	6.8	6.0	3.9	2.9

ตารางที่ ข.4 ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และ
อัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100

อุณหภูมิ (อซ)	อัตราส่วน อะลูมินาเบต	ร้อยละการแปรสภาพ ของคาร์บอน			ร้อยละการแปรสภาพ ของไฮโดรเจน	
		CO ₂	CO	C-CH ₄	H-CH ₄	H ₂
700	0	18.12	24.87	9.81	17.95	6.25
	25	18.83	25.85	9.55	17.46	4.87
	50	17.17	25.44	10.97	20.07	8.15
	75	22.53	28.73	10.64	19.47	6.83
	100	19.40	27.60	10.78	19.73	8.11
800	0	21.20	24.90	8.12	14.85	7.95
	25	16.40	24.55	8.74	15.99	6.66
	50	18.30	29.53	10.43	19.09	9.58
	75	18.09	30.62	11.04	20.20	10.51
	100	17.95	35.99	12.25	22.41	15.66

ตารางที่ ข.4 ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 (ต่อ)

อุณหภูมิ (อซ)	อัตราส่วน อะลูมินาเบต	ร้อยละการแปรสภาพ ของคาร์บอน			ร้อยละการแปรสภาพ ของไฮโดรเจน	
		CO ₂	CO	C-CH ₄	H-CH ₄	H ₂
900	0	18.80	33.18	11.04	20.19	14.10
	25	11.49	27.99	8.32	15.22	14.87
	50	15.73	31.99	10.04	18.37	15.74
	75	23.50	30.71	9.42	17.24	12.49
	100	30.32	31.71	10.84	19.84	16.21

ตารางที่ ข.5 ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100

อุณหภูมิ (อซ)	อัตราส่วน อะลูมินาเบต	ร้อยละการแปรสภาพ ของคาร์บอน			ร้อยละการแปรสภาพ ของไฮโดรเจน	
		CO ₂	CO	C-CH ₄	H-CH ₄	H ₂
700	0	24.54	24.97	8.75	16.02	2.41
	25	26.07	27.78	9.86	18.04	5.40
	50	29.77	27.53	8.02	14.68	6.66
	75	26.69	28.35	11.00	20.14	6.76
	100	31.12	32.96	11.68	21.38	7.59
800	0	28.38	28.34	9.06	16.59	2.88
	25	20.08	25.56	8.63	15.80	7.95
	50	18.58	26.57	10.48	19.18	4.34
	75	25.92	33.29	10.24	18.73	12.30
	100	27.60	31.57	11.59	21.20	11.34

ตารางที่ ข.5 ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนของอะลูมินาร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 (ต่อ)

อุณหภูมิ (อซ)	อัตราส่วน อะลูมินาเบต	ร้อยละการแปรสภาพ ของคาร์บอน			ร้อยละการแปรสภาพ ของไฮโดรเจน	
		CO ₂	CO	C-CH ₄	H-CH ₄	H ₂
900	0	26.15	32.07	11.32	20.71	10.78
	25	19.21	25.22	11.09	20.29	8.54
	50	24.57	28.11	9.12	16.69	8.60
	75	24.49	24.53	8.61	15.76	7.75
	100	21.88	26.00	8.26	15.11	10.57

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Portable infrared Coal gas Analyzer) รุ่น Gasboard-3100P

การตรวจวัด	CO, CO ₂ , CH ₄ , C _n H _m , O ₂ , H ₂ +BTU index (Gas calorific value)
ชนิดตัวตรวจวัด (Detector)	NDIR : CO, CO ₂ , CH ₄ , C _n H _m Electrochemical cell : O ₂ Detector Thermal conductivity detector : H ₂
ช่วงความเข้มข้นของ ก๊าซแต่ละชนิด	CO: 0-100% CO ₂ : 0-50% CH ₄ : 0-10% H ₂ : 0-50% C _x H _y : 0-10%, O ₂ : 0-25%
ความแม่นยำ	<±2%
อัตราการไหลของอากาศ เข้าเครื่อง	0.7-1.2 ลิตรต่อนาที
ช่วงการตรวจวัดอุณหภูมิ	0-50 องศาเซลเซียส
ช่วงการตรวจวัดความดัน	86-108 kPa

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอานันท์ สีหะมน เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤศจิกายน พ. ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2557

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

Seemen, A., Sricharoenchaikul, V. and Aht-ong, D. (2017). Effect of silica and alumina ratio on bed agglomeration during fluidized bed gasification of rice straw. 2017 4th Renewable Energy and Green Technology International Conference.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY