

ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่

นายสุกฤษฎี ภาควัชกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

EFFECT OF CATALYTIC REFORMING ON SYNGAS PRODUCTION  
FROM SAWDUST IN DUAL-BED GASIFIER

Mr. Sukrit Pakavechkul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการผลิตแก๊ส

สังเคราะห์จากชีลี้อยู่ในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่

โดย

นายสุกฤษฎี ภาควิชา

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. สุชาดา บุตรนาค)

ศุภฤกษ์ ภาควชกุล : ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีเลื่อย  
ในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่. (EFFECT OF CATALYTIC REFORMING ON SYNGAS  
PRODUCTION FROM SAWDUST IN DUAL-BED GASIFIER) อ. ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, 99 หน้า.

เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) จากชีวมวลที่มีคุณภาพสูงผ่านแกซิฟิเคชัน (Gasification) เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า หรือนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมี เช่น เมทานอล เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แก๊สสังเคราะห์จากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่มีค่าความร้อน (Heating value) สูงกว่าเตาผลิตแก๊สทั่วไป แต่เมื่อพิจารณาในการนำไปใช้ผลิตสารเคมีซึ่งใช้ คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นหลัก และต้องการอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหมาะสม พบว่าอัตราส่วนดังกล่าวในแก๊สสังเคราะห์ค่อนข้างต่ำ การรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming) ของมีเทนในแก๊สสังเคราะห์สามารถช่วยเพิ่มสัดส่วนของ คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนในแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาแนวทางการเพิ่ม อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา

การทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลอะลูมินา (Ni/Al) ตัวเร่ง ปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัมอะลูมินา (Ni-Mo-Al) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับ แมกนีเซียมออกไซด์อะลูมินา (NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการ ส่วนที่สองเป็นการศึกษารีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบ เบดคู่โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากส่วนแรกและศึกษาผลของอุณหภูมิเพิ่มเติม ผลการ ทดลองในส่วนที่หนึ่ง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลอะลูมินา และ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทน คือ 700 องศาเซลเซียส ผลการ ทดลองในส่วนที่สอง พบว่าแก๊สสังเคราะห์จากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่ง ปฏิกิริยามีสัดส่วนมีเทนลดลงและอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้น

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2555.....



## 5372359923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : CATALYTIC REFORMING / DUAL-BED GASIFIER / GASIFICATION / SYNGAS

SUKRIT PAKAVECHKUL : EFFECT OF CATALYTIC REFORMING ON SYNGAS PRODUCTION FROM SAWDUST IN DUAL-BED GASIFIER. ADVISOR : ASSIST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 99 pp.

A dual-bed gasifier was developed to produce syngas from biomass via gasification for power generation or chemicals production. According to previous literatures, syngas produced from the dual-bed gasifier had higher heating value than that produced from other typical gasifiers. However, considering the syngas as precursors for methanol/DME synthesis, it was not suitable due to its relatively low  $H_2/CO$  ratio. A way to increase  $H_2/CO$  ratio of the syngas is catalytic reforming of  $CH_4$  in the syngas. In this research, Catalytic reforming was studied to be incorporated in the syngas production from the dual-bed gasifier in order to improve yield of carbon monoxide and hydrogen, and also  $H_2/CO$  ratio.

The experiment was divided into two parts. The first part was to find a suitable catalyst and operating temperature for catalytic reforming of methane using a lab-scale fixed-bed reactor. Ni/Al, Ni-Mo-Al and NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were employed as catalysts in this part. The second part was to study the effect of catalytic reformer on gas product obtained from the dual-bed system using the selected catalyst from the first part. The results from experiment part 1 showed that the effective catalyst was Ni/Al and the optimum temperature of catalytic reforming of methane was 700°C. The results from the other part indicated that the produced syngas after catalytic reforming had lower  $CH_4$  and higher  $H_2/CO$  ratio comparing to the syngas before catalytic reforming.

Department : ..... Chemical Technology ..... Student's Signature .....

Field of Study : ..... Chemical Technology ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : ..... 2012 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ กุศลธารา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมารวมทั้ง คณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ และทุนอุดหนุนงานวิจัยในโครงการวิจัยร่วมคณะวิทยาศาสตร์กับสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุฒษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ ดร. สุชาดา บุตรนาค กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทดลองและห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดี และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้ง ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชีวมวล.....	4
2.2 ประเภท และแหล่งที่มาของชีวมวล.....	4
2.3 สมบัติทางความร้อนของชีวมวล.....	5
2.4 แก๊สซิเคชัน.....	9
2.5 ปฏิกริยาในกระบวนการแก๊สซิเคชัน.....	10
2.6 กระบวนการแก๊สซิเคชัน.....	12
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการแก๊สซิเคชัน.....	19

	หน้า
2.8 กระบวนการแกซีฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์.....	20
2.9 การออกแบบเตาผลิตแก๊สของชีวมวล.....	26
2.10 การกำจัดทาร์.....	34
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
<b>บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....</b>	<b>38</b>
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	45
3.3 วิธีการทดลอง.....	46
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....</b>	<b>51</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้า.....	51
4.2 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ.....	52
4.3 ผลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้า ในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่.....	62
4.4 สมบัติของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ ก่อนและหลังรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา.....	70
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>72</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	76

ภาคผนวก ก.....	77
ภาคผนวก ข.....	80
ภาคผนวก ค.....	83
ภาคผนวก ง.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบธาตุของชีวมวลทั่วไปจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ..... 8
3.1	ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี..... 44
4.1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ..... 52
4.2	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ..... 52
4.3	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร) อัตราส่วนของไฮโดรเจน ต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H <sub>2</sub> /CO) และค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) ของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากชีวมวลในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ ที่สภาวะอัตราส่วน โดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนต่างๆ..... 67
4.4	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร) อัตราส่วนของไฮโดรเจน ต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H <sub>2</sub> /CO) และค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) ของแก๊สสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ..... 71
ง1	ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Ni/Al ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส..... 86
ง2	ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Ni/Al ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 800 องศาเซลเซียส..... 86
ง3	ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Ni/Al ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 900 องศาเซลเซียส..... 87
ง4	ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ ด้วย Ni-Mo-Al ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส.....87







ตารางที่	หน้า
ง19	ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบ เบดคู่อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 0..... 95
ง20	ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบ เบดคู่อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 0.5..... 95
ง21	ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบ เบดคู่อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1..... 96
ง22	ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบ เบดคู่อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1.5..... 96
ง23	ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบ เบดคู่อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 600 องศา เซลเซียส..... 97
ง24	ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบ เบดคู่อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 700 องศา เซลเซียส..... 97

ตารางที่	หน้า
ง25 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ Ni/Al อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1 อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส.....	98
ง26 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ Ni/Al อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1 อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 900 องศาเซลเซียส.....	98

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของชีวมวล.....	6
2.2 ค่าความร้อนของชีวมวล (ค่าความร้อนขั้นต่ำ (LHV) และ ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV)) ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น.....	9
2.3 การผลิตเชื้อเพลิง และการนำไปใช้ประโยชน์.....	10
2.4 แผนภาพ C-H-O ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน.....	12
2.5 ขั้นตอนของแกซิฟิเคชันและผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ.....	13
2.6 กระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล.....	15
2.7 ลำดับการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น.....	21
2.8 ลำดับการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สแบบไหลลง.....	22
2.9 การเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหล.....	23
2.10 การเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน.....	25
2.11 เทคโนโลยีแกซิฟิเคชัน.....	26
2.12 เตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น.....	27
2.13 เตาผลิตแก๊สแบบไหลลง.....	28
2.14 เตาผลิตแก๊สแบบไหลข้าม.....	29
2.15 เตาผลิตแก๊สแบบของไหลฟองอากาศ.....	31
2.16 เตาผลิตแก๊สแบบของไหลหมุนเวียน.....	32
2.17 เตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน.....	33
2.18 เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่.....	34
3.1 เตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาระดับห้องปฏิบัติการ.....	40

ภาพที่	หน้า
3.2	เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) และเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming reactor)..... 41
3.3	เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่และส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง..... 42
3.4	เตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา..... 43
3.5	เครื่องคัดขนาด (Sieve shaker)..... 43
3.6	เครื่องวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph)..... 44
4.1	ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการที่ภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ ด้วย Ni/Al ..... 54
4.2	ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการที่ภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ ด้วย Ni/Al..... 55
4.3	ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการที่ภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ ด้วย Ni-Mo-Al..... 56
4.4	ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการที่ภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ ด้วย Ni-Mo-Al..... 56
4.5	ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการที่ภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ ด้วย NiO/MgO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..... 58
4.6	ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการที่ภาวะอุณหภูมิต่างๆ ด้วย NiO/MgO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..... 59
4.7	ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วย Ni/Al, Ni-Mo-Al และ NiO/MgO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ต่อย่อยละการเปลี่ยนของมีเทนที่ภาวะอุณหภูมิริฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 700 องศาเซลเซียส..... 60

ภาพที่	หน้า
4.8	ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วย Ni/Al, Ni-Mo-Al และ NiO/MgO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่ภาวะอุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 700 องศาเซลเซียส..... 61
4.9	องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ ภาวะที่ใช้ในการทดลอง: อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที อัตราส่วน โดยโมลไอน้ำต่อคาร์บอน 0 อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-900 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส..... 63
4.10	ผลของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน (S/C ratio) ต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากจี้เปลือยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ ภาวะที่ใช้ในการทดลอง: อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส..... 64
4.11	องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ก่อนและหลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al ภาวะที่ใช้ในการทดลอง: อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที S/C ratio เท่ากับ 1 อุณหภูมิส่วนเตาเผา 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 700 องศาเซลเซียส..... 68
4.12	ผลของอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al ภาวะที่ใช้ในการทดลอง: อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที S/C ratio เท่ากับ 1 อุณหภูมิส่วนเตาเผา 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส..... 69

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและที่มาของโครงการ

ปัจจุบันจำนวนประชากรและความต้องการในการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งแหล่งพลังงานหลักที่ลดน้อยลงเรื่อยๆ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และ แก๊สธรรมชาติ มนุษย์จึงได้วิตกกังวลปัญหาการขาดแคลนพลังงานที่จะเกิดขึ้นในอนาคต จึงได้เริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับการนำพลังงานทางเลือกเพื่อมาใช้ทดแทน ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแข็ง การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงจะทำให้มีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นจึงต้องนำชีวมวลไปผ่านกระบวนการแปรรูปเสียก่อน แก๊ซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลให้อยู่ในรูปของพลังงานหรือแก๊สสังเคราะห์ ผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนได้โดยตรง หรือใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตสารเคมีสำคัญต่างๆ ในอุตสาหกรรม เช่น เมทานอล เอทานอล และกระบวนการสังเคราะห์ฟิชเชอร์-โทรปช์ (Fischer-Tropsch synthesis) เป็นต้น เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการแก๊ซิฟิเคชัน คือ เตาผลิตแก๊ส (Gasifier) เตาผลิตแก๊สนั้นมีหลายแบบและหลายประเภทตามการออกแบบ ซึ่งในปัจจุบันเตาผลิตแก๊สที่นิยมใช้กันจะเป็นแบบเบดนิ่ง (Fixed-bed gasifier) และเบดของไหล (Fluidized-bed gasifier) แต่แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สที่ใช้ทั่วไปจะมีค่าความร้อน (Calorific value) ที่ต่ำ เนื่องจากมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่สูงจากปฏิกิริยาเผาไหม้ (Combustion) เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) เป็นเตาผลิตแก๊สแบบใหม่ที่มีการแยกส่วนของปฏิกิริยาเผาไหม้และแก๊ซิฟิเคชันออกจากกัน ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแบบใหม่นี้จะมีปริมาณไนโตรเจนที่ปะปนอยู่น้อยกว่าเตาผลิตแก๊สแบบทั่วไป งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการออกแบบและสร้างเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่แบบใหม่ขึ้น และทำการทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขี้เลื่อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่นี้ พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ยังคงมีมีเทนเป็นองค์ประกอบสูง ทำให้แก๊สที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ให้ความร้อนได้ แต่ยังไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตสารเคมีต่างๆ เช่น การผลิตเมทานอล และเอทานอล ที่ต้องการแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 2 ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของ

แก๊สสังเคราะห์จึงมีความจำเป็น เพื่อที่จะสามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยปฏิกิริยาที่น่าสนใจในการเปลี่ยนมีเทนในแก๊สสังเคราะห์ให้กลายเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ คือ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> or dry reforming) ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยานี้นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยเพื่อเพิ่มความว่องไวของปฏิกิริยา โดยตัวเร่งที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลเนื่องจากมีราคาถูก และมีความว่องไวในการเลือกเกิดไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์

โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาปรับปรุงคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตผลิตแก๊สแบบเบดคู่แบบใหม่ด้วยรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา และศึกษาผลของไอน้ำและอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนในเตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่ขนาดเล็ก และผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากขี้เถ้าด้วยปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่
2. ศึกษาผลของไอน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่
3. ศึกษาผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีคุณภาพดีขึ้นและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง หรือนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตสารเคมีสำคัญในอุตสาหกรรมได้

### 1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนในเตาปฏิกรณ์เบดนิ่ง
2. ศึกษาเตาผลิตแก๊สเบดคู่
3. ทดสอบการทำงานเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่
4. ทดสอบระบบผลิตแก๊สด้วยเตาผลิตผลิตแก๊สแบบเบดคู่โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นชีวมวล
5. เก็บและวิเคราะห์ผลของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้
6. ทดสอบระบบรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลในอุตสาหกรรม
7. เก็บและวิเคราะห์ผลของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
8. วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ชีวมวล

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ตามธรรมชาติที่อยู่ในพืชและสัตว์ กากหรือของเสียจากการเกษตรหรือจากอุตสาหกรรมต่างๆ การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนได้รับความสนใจจากหลายประเทศทั่วโลก ชีวมวลเป็นสิ่งที่พบได้โดยง่าย มีราคาถูก และยังเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ได้ประสิทธิภาพที่สูง และส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยลง ชีวมวลจึงเป็นพลังงานทางเลือกอีกทางที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก

อย่างไรก็ตาม ชีวมวลที่ถูกใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศที่กำลังพัฒนานั้นพบว่ายังคงมีประสิทธิภาพต่ำ ส่งผลให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้ว ชีวมวลก็ยังถือว่าส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่าชีวมวลเมื่อนำไปเผาจะมีการปล่อยแก๊สประเภทไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ที่น้อยมาก อีกทั้งยังมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบที่ต่ำ ทำให้การปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ต่ำไปด้วย ในกรณีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่ชีวมวลปล่อยออกมา ก็จะถูกดูดซับโดยชีวมวลชนิดใหม่ที่ต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในการเจริญเติบโต

#### 2.2 ประเภท และแหล่งที่มาของชีวมวล

ชีวมวลที่มีความสำคัญชนิดหนึ่ง คือ ไม้ โดยต้นไม้อาจจะถูกตัดจากในป่า และนำไปตัดเป็นท่อนเพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง แต่ไม้อาจจะมีมูลค่าสูงเกินกว่าที่จะเอาไปใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งช่างไม้อาจจะนำไม้เหล่านี้ไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ที่ดีกว่า เช่น ในงานก่อสร้าง ซึ่งกากของเหลือจากไม้ที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว เช่น เปลือกไม้ ขี้เลื่อย และชิ้นส่วนของไม้ที่แตกหักไม่สามารถนำไปใช้ได้ เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงมากกว่า

ของเสียจากพืชการเกษตรสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ฟางข้าว กากมะพร้าว เมล็ดกาแฟ ต้นข้าวโพด หรือกากอ้อย การนำของเสียเหล่านี้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงยังช่วยลดปัญหาของเสียที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

### 2.3 สมบัติทางความร้อนของชีวมวล

ชีวมวลแต่ละชนิดนั้นจะมีสมบัติทางความร้อนที่ต่างกันไป โดยจะพิจารณาจากการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ หรือแกซิฟิเคชัน (Gasification) สมบัติต่างๆจะสามารถพิจารณาได้จากผลของการเปลี่ยนสภาพทางความร้อนของชีวมวล ดังนี้

1. ปริมาณความชื้น (Moisture content)
2. ปริมาณเถ้า (Ash content)
3. ปริมาณสารระเหย (Volatile matter content)
4. องค์ประกอบธาตุ (Elemental composition)
5. ค่าความร้อน (Heating value)
6. ปริมาตรความหนาแน่น (Bulk density)

ชีวมวลประกอบด้วย น้ำ (water) เถ้า (ash) และ สิ่งที่นอกเหนือจากเถ้า (ash-free matter) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ความเหมาะสมของชีวมวลในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะพิจารณาจากสัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ที่อยู่ในชีวมวล

#### 2.3.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content)

ปริมาณความชื้นของชีวมวล คือ ปริมาณของน้ำที่อยู่ในชีวมวล คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักชีวมวลทั้งหมดในการวัดพื้นฐานแบบเปียก (wet basis) การวัดพื้นฐานแบบแห้ง (dry basis) และ การวัดพื้นฐานแบบแห้งที่ไม่มีเถ้า (dry-and-ash-free basis)



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของชีวมวล (ที่มา BTG, 2538)

ถ้าพิจารณาปริมาณความชื้นจากการวัดแบบเปียก (wet basis) น้ำหนักของน้ำจะคิดจากผลรวมของร้อยละน้ำหนักของน้ำหนักของน้ำ เถ้า และ วัตถุแห้ง แต่เมื่อต้องการคำนวณปริมาณความชื้นจากการวัดแบบแห้ง (dry basis) น้ำหนักของน้ำจะคิดจากผลรวมของร้อยละน้ำหนักของน้ำหนักของน้ำ เถ้า และ วัตถุแห้ง และสุดท้ายเมื่อต้องการคำนวณปริมาณความชื้นจากการวัดแบบแห้งที่ไม่มีเถ้า (dry-and-ash-free basis) น้ำหนักของน้ำจะคิดจากผลรวมร้อยละน้ำหนักของชีวมวลที่แห้งเท่านั้น เนื่องจากความชื้นของชีวมวลจะส่งผลต่อคุณภาพของชีวมวลในการใช้เป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นการวัดพื้นฐานที่ใช้จึงควรจะกล่าวถึงทุกครั้ง

### 2.3.2 ปริมาณเถ้า (Ash content)

ส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ (ปริมาณเถ้า) สามารถคิดได้เช่นเดียวกับปริมาณความชื้นในการวัดพื้นฐานแบบเปียก (wet basis) แบบแห้ง (dry basis) และแบบแห้งที่ไม่มีเถ้า (dry-and-ash-free basis) แต่โดยทั่วไปปริมาณเถ้าจะคิดจากการวัดพื้นฐานแบบแห้ง (dry basis)

เถ้า คือ ส่วนประกอบตามธรรมชาติภายในโครงสร้างของพืชและต้นไม้ ซึ่งพืชและต้นไม้แต่ละชนิดจะมีปริมาณเถ้าเป็นส่วนประกอบอยู่แตกต่างกัน ปริมาณเถ้าทั้งหมดที่อยู่ในชีวมวลและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าเป็นสิ่งสำคัญ องค์ประกอบของเถ้าจะมีผลต่อการเผาไหม้และแกซีฟิเคชันที่อุณหภูมิสูง เช่น เถ้าเกิดการหลอม (slagging ash) ในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการเผาไหม้หรือแกซีฟิเคชันทำให้เกิดปัญหาในระบบแบบเบดของไหล (fluidized-bed systems)

### 2.3.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter content)

สารระเหย คือ ส่วนประกอบที่อยู่ในชีวมวล ซึ่งจะถูกละลายออกมาเมื่อชีวมวลได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะเกิดการสลายตัวกลายเป็นแก๊สสารระเหยและของแข็งชาร์ โดยทั่วไปชีวมวลจะมีปริมาณสารระเหยเป็นองค์ประกอบที่สูง (มากกว่าร้อยละ 80) ในขณะที่ถ่านหินมีสารระเหยเป็นองค์ประกอบที่ต่ำกว่า (น้อยกว่าร้อยละ 20)

### 2.3.4 องค์ประกอบธาตุ (Elemental composition)

สารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในชีวมวลส่วนใหญ่จะประกอบด้วยธาตุต่างๆ เช่น คาร์บอนออกซิเจนและไฮโดรเจน ชีวมวลบางชนิดจะมีไนโตรเจนและซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

### 2.3.5 ค่าความร้อน (Heating value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ได้รับจากเชื้อเพลิงนั้น ในสถานะแวดล้อมมาตรฐาน ประกอบด้วยอุณหภูมิสถานะของน้ำ (ของเหลวหรือไอ) และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาสันดาป (คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ เป็นต้น) สถานะมาตรฐานเหล่านี้นิยมใช้อย่างกว้างขวางการวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวล

พลังงานทางเคมีที่ได้จากเชื้อเพลิงจะพิจารณาจากค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (จุด) ต่อน้ำหนักของเชื้อเพลิง (kg) ในการคำนวณค่าพลังงานนี้จะต้องอ้างอิงจากสถานะมาตรฐานซึ่งอาจแตกต่างกัน ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดี คือ ค่าความร้อนขั้นต่ำ (Lower heating value, LHV) และค่าความร้อนขั้นสูง (Higher heating value, HHV) สำหรับค่าความร้อนขั้นต่ำ (LHV) จะอ้างอิงจาก

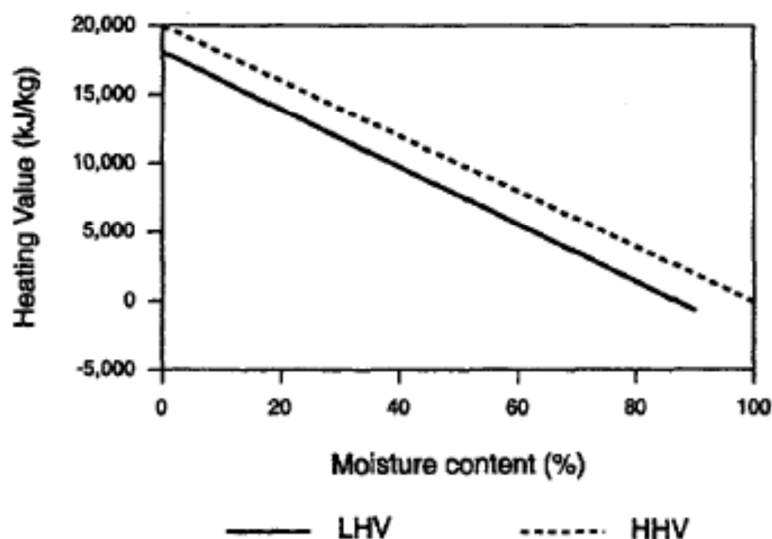
สถานะของน้ำเป็นไอ และจะอ้างอิงจากสถานะของน้ำที่เป็นของเหลวสำหรับค่าความร้อนขั้นสูง (HHV)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบธาตุของชีวมวลทั่วไปจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ที่มา BTG, 2530)

ธาตุ	สัญลักษณ์	ร้อยละน้ำหนัก (ข้อมูลพื้นฐานแบบแห้ง ไม่มีเถ้า)
คาร์บอน	C	44-51
ไฮโดรเจน	H	5.5-6.7
ออกซิเจน	O	41-50
ไนโตรเจน	N	0.12-0.60
ซัลเฟอร์	S	0.0-0.2

ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งจะถูกละลายออกมาในรูปของไอน้ำเมื่อชีวมวลได้รับความร้อน ทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีของชีวมวลถูกใช้ไปในการเปลี่ยนสถานะของน้ำให้เป็นไอ ในกรณีนี้ค่าความร้อนสุทธิ (Net heating value) จะลดลงเมื่อชีวมวลมีปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อน (LHV และ HHV) และปริมาณความชื้น

จากรูปที่ 2.2 ที่ปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 87 (วัดพื้นฐานแบบเปียก) ค่าความร้อนขั้นต่ำ (LHV) จะมีค่ากับ 0 กิโลจูลต่อกิโลกรัม แต่ในทางปฏิบัติ ปริมาณความชื้นที่ยอมรับได้จะอยู่ที่ร้อยละ 55 (วัดพื้นฐานแบบเปียก) เนื่องจากหากปริมาณความชื้นที่สูงกว่าร้อยละ 55 จะทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถติดไฟได้ และทำให้ไม่ได้พลังงานออกมา



รูปที่ 2.2 ค่าความร้อนของชีวมวล (ค่าความร้อนขั้นต่ำ (LHV) และ ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV)) ที่เปลี่ยนไปเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (ที่มา BTG, 2538)

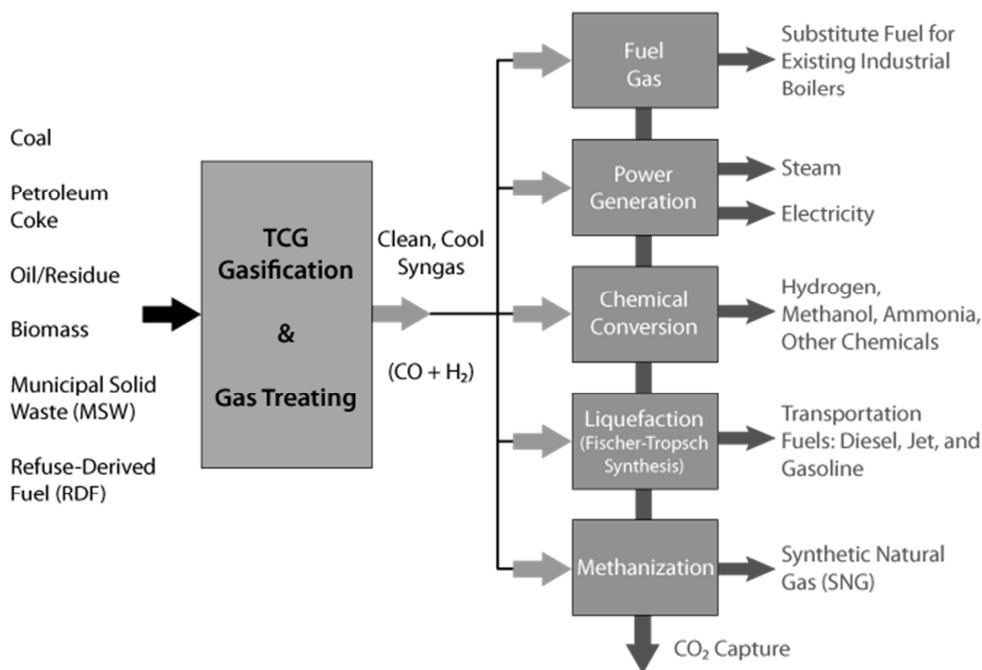
### 2.3.6 ปริมาตรความหนาแน่น (Bulk density)

ปริมาตรความหนาแน่น (Bulk density) คือ น้ำหนักของวัตถุต่อหน่วยปริมาตร สำหรับปริมาตรความหนาแน่นของชีวมวลจะคิดจากชีวมวลที่ผ่านการอบแห้งมาแล้วหรือจากการวัดพื้นฐานแบบแห้ง (dry basis) ค่าความร้อนและปริมาตรความหนาแน่นของชีวมวลสามารถนำไปคำนวณหาความหนาแน่นของพลังงาน (potential energy) ต่อหน่วยปริมาตรของชีวมวล โดยทั่วไปแล้วชีวมวลจะมีความหนาแน่นของพลังงานประมาณ 1-10 เท่าของเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ปิโตรเลียมหรือถ่านหิน

### 2.4 แกซิฟิเคชัน (Gasification)

แกซิฟิเคชัน (Gasification) คือ กระบวนการแปรรูปชีวมวลในรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแก๊สจากปฏิกิริยาเผาไหม้บางส่วน (partial oxidation) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 700-1400 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ (combustible gas) เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) มีเทน (CH<sub>4</sub>) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 3-10 เมกะจูลต่อ

ลูกบาศก์เมตร สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ให้ความร้อนได้โดยตรง หรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีสำคัญในอุตสาหกรรมได้ เช่น เมทานอลและเอทานอล เป็นต้น



รูปที่ 2.3 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และการนำไปใช้ประโยชน์ (ที่มา Syngasco, 2555 : ออนไลน์)

## 2.5 ปฏิกริยาในกระบวนการแก๊สฟิชัน

แก๊สฟิชันและปฏิกริยาการสันดาปนั้นเป็นกระบวนการทางความร้อนที่เหมือนกัน แต่พลังงานจากแก๊สฟิชันจะมาจากพันธะเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊ส ซึ่งต่างจากการสันดาปที่จะทำการสลายพันธะเหล่านั้นเพื่อที่จะปล่อยพลังงานออกมากระบวนการแก๊สฟิชันจะช่วยเพิ่มไฮโดรเจนและลดคาร์บอนจากวัตถุดิบเพื่อผลิตแก๊สที่มีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนที่สูงขึ้น ( $H_2/C$  ratio) ในขณะที่การสันดาปจะทำการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนให้เป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ

กระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน

- การอบแห้ง (Drying)
- การสลายตัวทางความร้อนหรือไพโรไลซิส (Pyrolysis)
- ปฏิกิริยาสันดาปบางส่วน (Partial oxidation) ของแก๊ส สารระเหยและชาร์
- แกซิฟิเคชัน (Gasification)

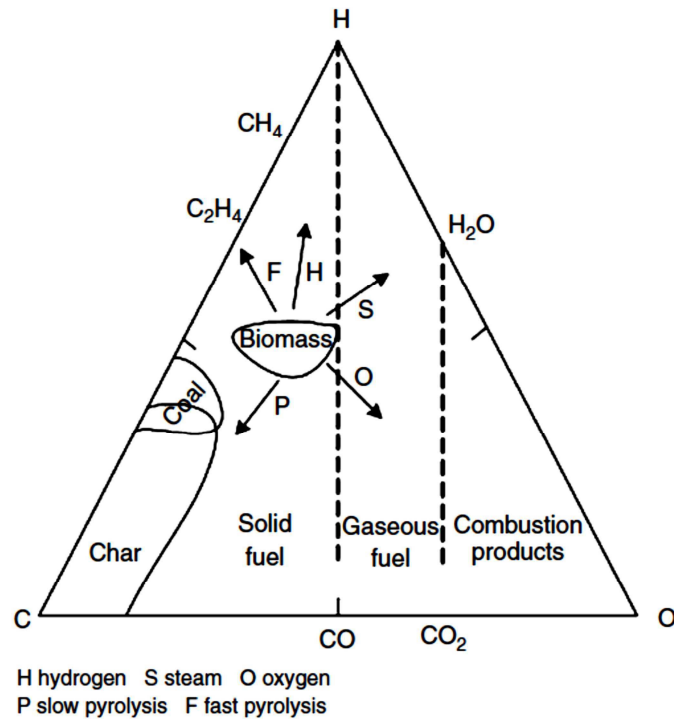
ไพโรไลซิส (Pyrolysis) คือ กระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่จะทำการกำจัดคาร์บอนบางส่วนออกจากวัตถุดิบ แต่จะไม่มี的增加ไฮโดรเจน ในขณะที่แกซิฟิเคชัน จำเป็นต้องใช้ตัวกลางสำหรับกระบวนการ (gasifying mediums) เช่น ไอน้ำ อากาศหรือออกซิเจน ( $O_2$ ) เพื่อจัดโครงสร้างโมเลกุลของวัตถุดิบเพื่อที่จะเปลี่ยนวัตถุดิบแข็งให้เป็นแก๊สหรือของเหลว

### 2.5.1 ตัวกลางสำหรับกระบวนการแกซิฟิเคชัน (Gasifying mediums)

ตัวทำปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชัน (gasifying agents) จะทำปฏิกิริยากับของแข็งคาร์บอน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหนักเพื่อเปลี่ยนเป็นแก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดเล็กลง เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) และไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ตัวทำปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชันหลัก คือ ออกซิเจน ( $O_2$ ) ไอน้ำ และอากาศ

ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในขั้นตอนการสันดาป โดยอาจจะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์หรือออกซิเจนจากอากาศ ค่าความร้อน (heating value) และองค์ประกอบของแก๊สที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวทำปฏิกิริยาที่ใช้ รูปที่ 2.4 แสดงเส้นทางการเปลี่ยนโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ต่างๆในกระบวนการแกซิฟิเคชันถ้าหากใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา การเปลี่ยนแปลงของชีวมวลจะไปที่มุมของออกซิเจน ผลิตภัณฑ์จะมีคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) เกิดขึ้นเมื่อใช้ปริมาณออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่ต่ำ และจะมีคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เกิดขึ้นเมื่อใช้ปริมาณออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่สูง เมื่อปริมาณของออกซิเจนที่ใช้มากเกินไป กระบวนการจะเปลี่ยนจากแกซิฟิเคชันเป็นสันดาป (combustion) และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเปลี่ยนจากแก๊สเชื้อเพลิง (fuel gas) เป็นแก๊สเรือนไฟ (flue gas) ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ที่น้อยลง และมีปริมาณของสารประกอบคาร์บอนในผลิตภัณฑ์แก๊สสูงขึ้น เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ )



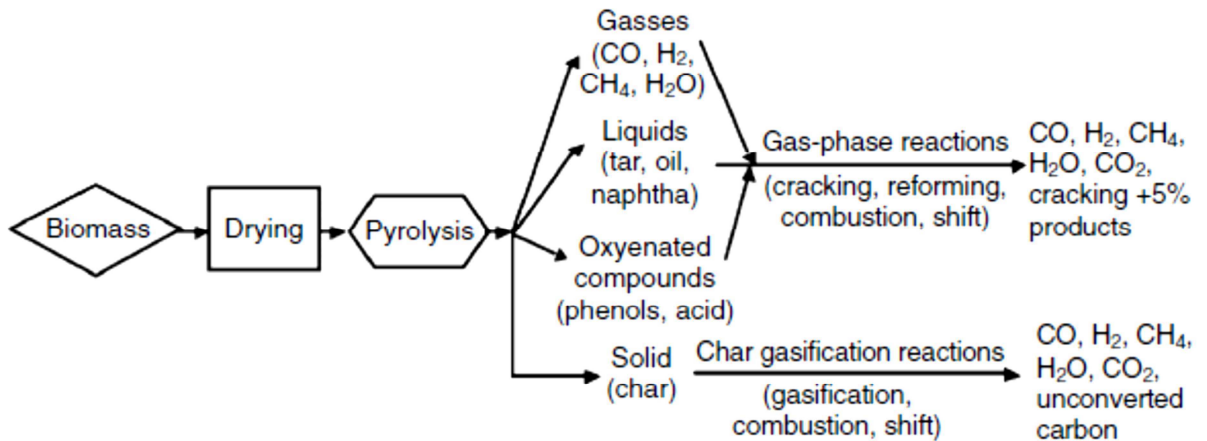


รูปที่ 2.4 แผนภาพ C-H-O ในกระบวนการแก๊สฟิเคชัน  
(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555 : 118)

## 2.6 กระบวนการแก๊สฟิเคชัน (Gasification process)

กระบวนการแก๊สฟิเคชันโดยทั่วไปจะเป็นไปตามขั้นตอนต่างๆดังนี้ (แสดงในรูปที่ 2.5)

- การอบแห้ง (Preheating and drying)
- ไพโรไลซิส (Pyrolysis)
- แก๊สฟิเคชันของชาร์ (Char Gasification)
- ปฏิกิริยาสันดาป (Combustion)



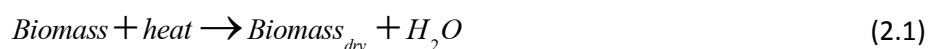
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนของแกซิฟิเคชันและผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ  
(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555: 119)

ชีวมวลที่ได้รับความร้อน (อบแห้ง) จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลผ่านไพโรไลซิส (pyrolysis) ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส (แก๊ส ของแข็งและของเหลว) จะทำปฏิกิริยากับตัวกลาง (ไอน้ำ อากาศและออกซิเจน) กลายเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการแกซิฟิเคชัน พลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการอบแห้ง(Drying) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) และปฏิกิริยาอุณหภูมิอื่น ๆ จะได้มาจากปฏิกิริยาสันดาปซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

### 2.6.1 การอบแห้ง (Drying)

ชีวมวลเมื่อได้รับความร้อน ความชื้นที่อยู่ในชีวมวลจะถูกขับออกมาในรูปของไอน้ำเพื่อที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีค่าความร้อนที่สูงขึ้น ช่วงอุณหภูมิของการที่ชีวมวลจะถูกอบแห้งในกระบวนการแกซิฟิเคชันจะอยู่ที่ประมาณ 100-200 องศาเซลเซียสสมการที่(2.1)แสดงปฏิกิริยาการอบแห้งของชีวมวลเมื่อได้รับความร้อน

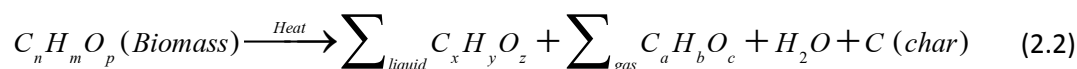
ปฏิกิริยาการอบแห้งของชีวมวล (Drying)



## 2.6.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการที่จะเกิดขึ้นก่อนแกซิฟิเคชัน ชีวมวลจะได้รับความร้อนในภาวะที่ไม่มีอากาศหรือออกซิเจนในช่วงอุณหภูมิที่กำหนด ในขั้นต้นของไพโรไลซิสผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นแก๊สที่ควบแน่นได้ (condensable gases) และของแข็งชาร์ (solid char) แก๊สควบแน่น (condensable gases) อาจจะถูกสลายด้วยความร้อนกลายเป็นแก๊สที่ไม่ควบแน่น (non-condensable gases) เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และมีเทน (CH<sub>4</sub>) ของเหลว และชาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การสลายตัวของแก๊สควบแน่นนี้จะเกิดผ่านปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous reactions) ของแก๊ส และบางส่วนอาจเกิดผ่านปฏิกิริยาวิวิพันธ์ (heterogeneous reactions) ของแก๊สและของแข็ง ในปฏิกิริยาของแก๊ส ไอของสารควบแน่นจะสลายเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงไม่สามารถควบแน่นได้ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของชีวมวล

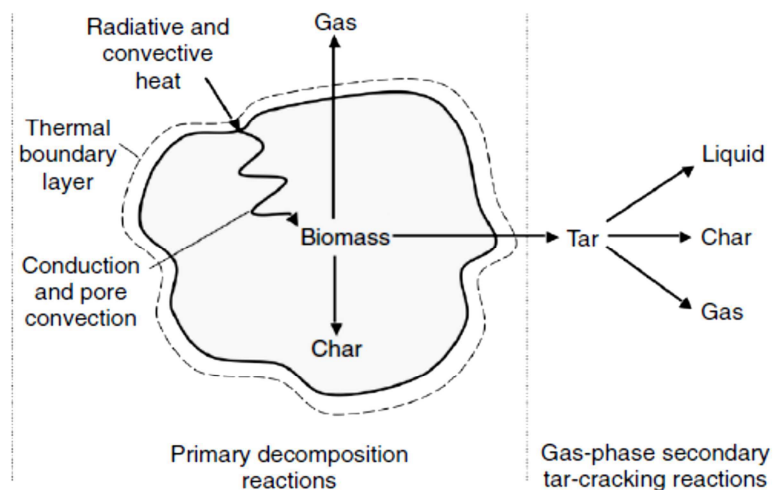


ไพโรไลซิสของชีวมวลจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว ในกรณีของไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) จะมีผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งหรือชาร์เป็นหลัก ในขณะที่ไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในรูปของเหลวมากกว่า

## 2.6.3 แกซิฟิเคชัน (Gasification)

แกซิฟิเคชัน (gasification) จะเกิดต่อจากการไพโรไลซิส (pyrolysis) โดยกระบวนการนี้จะเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไฮโดรคาร์บอนในเชื้อเพลิง ไอ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) เช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีอื่นๆระหว่างแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการ แกซิฟิเคชันของชาร์ก็สำคัญเช่นเดียวกัน ชาร์ที่ผลิตได้จากไพโรไลซิสของชีวมวลไม่จำเป็นจะต้องเป็นคาร์บอนบริสุทธิ์ แต่ยังมีไฮโดรคาร์บอนจำนวนหนึ่งที่มีไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และออกซิเจน (O<sub>2</sub>) เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย โดยปฏิกิริยาดูดความร้อนและคายความร้อนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้มีหลายปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาบาวดาร์ด (Boudouard reaction) ปฏิกิริยาน้ำและแก๊ส

(Water-gas reaction)ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift reaction) ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming reaction) ดังแสดงในสมการที่ (2.3)-(2.7) โดยอุณหภูมิสำหรับช่วงแกซิฟิเคชันนี้จะอยู่ที่ประมาณ 500-900 องศาเซลเซียส



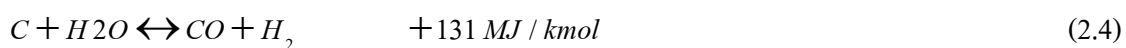
รูปที่ 2.6 กระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล

(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555: 68)

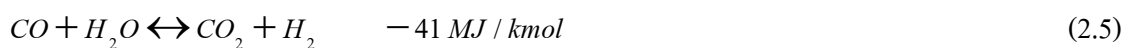
ปฏิกิริยาบาวดาร์ด์ (Boudouard reaction)



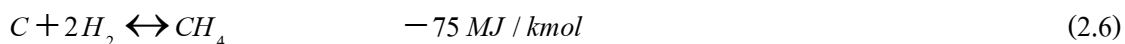
ปฏิกิริยาน้ำและแก๊ส (Water-gas reaction)



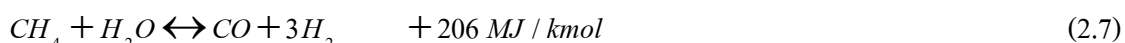
ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift reaction)



ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation)



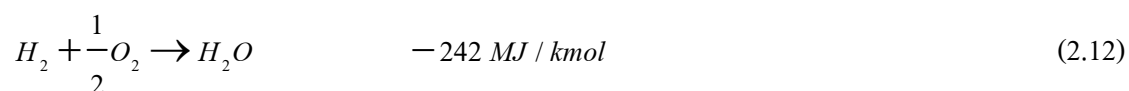
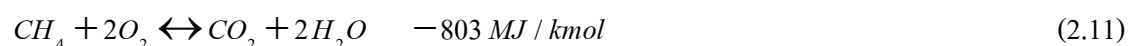
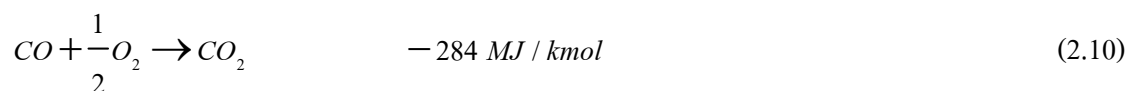
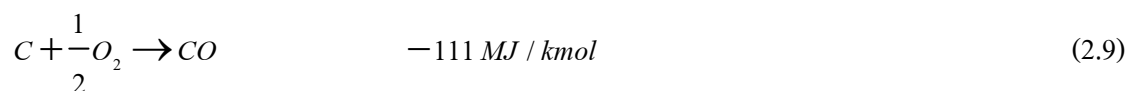
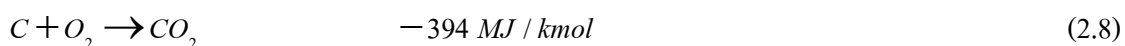
ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming reaction)



#### 2.6.4 ปฏิกิริยาสันดาป (Combustion)

ปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชันส่วนใหญ่เป็นแบบดูดความร้อน ในการที่จะทำให้ได้พลังงานความร้อนสำหรับปฏิกิริยาดูดความร้อนต่างๆ เช่น การอบแห้ง (Drying) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) และแกซิฟิเคชัน (Gasification) ดังนั้น ปฏิกิริยาสันดาป (Combustion) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จึงมีความจำเป็นสำหรับกระบวนการแกซิฟิเคชัน โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาสันดาป (combustion) ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน (gasification) จะเป็นปฏิกิริยาเผาไหม้ด้วยออกซิเจน ( $O_2$ ) หรืออากาศของซาร์จากไพโรไลซิสของชีวมวลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและแก๊สเผาไหม้ได้บางชนิดที่ได้จากกระบวนการ ดังแสดงในสมการที่ (2.8)-(2.12)

ปฏิกิริยาสันดาป (Combustion or oxidation reactions)



ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาดูดความร้อนอื่นๆในกระบวนการ อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาสันดาปของซาร์และแก๊สเผาไหม้อื่นๆประมาณ 850-1300 องศาเซลเซียส

### 2.6.5 แกซิฟิเคชันเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic gasification)

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแปรรูปทางความร้อนของชีวมวลอาจมีความจำเป็นในกรณีที่ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันมีทาร์และมีเทน(CH<sub>4</sub>) เกิดขึ้นสูง ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการนำผลิตภัณฑ์แก๊สไปเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่มีไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นองค์ประกอบหลัก อีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาอุดตันของระบบขนส่งแก๊สเนื่องจากการอุดตันของทาร์

เมื่อผลิตภัณฑ์แก๊สเคลื่อนที่ผ่านบนอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา ทาร์หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) บนผิวของตัวเร่งเพื่อเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของทาร์ด้วยไอน้ำแสดงในสมการที่ (2.13)-(2.14)

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของทาร์(Steam reforming of tars)



ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ของทาร์(Carbon dioxide or dry reforming of tars)

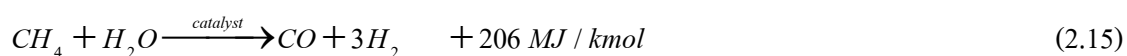


จากสมการที่ (2.13)-(2.14) ทาร์หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้มากขึ้นผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาทั้งสองเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและโดยทั่วไปทาร์สามารถแตกตัวเป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้ด้วยพลังงานความร้อน (Thermal cracking) แต่

อุณหภูมิที่ต้องใช้จำเป็นต้องทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า (800-900 องศาเซลเซียส)

มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซีฟิเคชันสามารถทำให้ลดลงได้ด้วยรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาเช่นเดียวกับทาร์ ซึ่งนิยมใช้กันในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{H}_2/\text{CO}$  ratio) ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นแก๊สสังเคราะห์ (syngas) ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของมีเทน มีเทนจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 700-1100 องศาเซลเซียส และจากนั้นจะเปลี่ยนให้กลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) และไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ปฏิกิริยานี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตไฮโดรเจนจากมีเทน ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นที่นิยมใช้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะนิกเกิล

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของมีเทน (Steam reforming of methane)



ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ของมีเทน ( $\text{CO}_2$  reforming of methane) ไม่เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมากเท่ากับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming of methane) แต่ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์มีข้อดีคือ สามารถช่วยลดแก๊สเรือนกระจกได้เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ด้วยปฏิกิริยานี้เพียงปฏิกิริยาเดียว จึงมีความเหมาะสมสำหรับการใช้ลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก๊ส แต่ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนที่ต้องการพลังงานสูงกว่าปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ จึงต้องทำปฏิกิริยานี้ที่อุณหภูมิสูงกว่า และใช้พลังงานมากกว่า (ที่มา Basu, 2555 : 129)

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ของมีเทน (dry or  $\text{CO}_2$  reforming of methane)



## 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการแก๊ซิฟิเคชัน (Factors affecting to gasification process)

### 2.7.1 ความชื้นของเชื้อเพลิง (Moisture content in solid fuel)

ความชื้นในชีวมวลช่วยทำให้สัดส่วนของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงแก๊สสูงขึ้น แต่ความชื้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊สและค่าความร้อนที่ได้ลดลง ความชื้นของชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลแหล่งที่มาและการเตรียมสภาพก่อนนำไปผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

### 2.7.2 ขนาดของเชื้อเพลิง (Particle size of solid fuel)

ขนาดของเชื้อเพลิงจะมีผลกับการเกิดความดันตกภายในเตาปฏิกรณ์ถ้าเกิดความดันตกภายในเครื่องมากเกินไปจะทำให้ต้องใช้พลังงานในการนำอากาศเข้าและพาแก๊สที่ได้ออกจากเตามาก เครื่องยนต์จำเป็นต้องมีแรงคูดมากพอที่จะเอาชนะความดันตกของระบบทั้งหมดในทางทฤษฎีอากาศควรสัมผัสกับพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงให้มากที่สุด เพื่อให้ได้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นและเกิดกระบวนการได้เร็วยิ่งขึ้น ในเตาผลิตแก๊สขนาดเล็กหากใช้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่เกินไปจะเกิดปัญหาการเผาไหม้ข้ามบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดเถ้าหลอมตัวเป็นของเหลวเหนียวเพราะถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเทียบกับขนาดเตาปฏิกรณ์เมื่อเผาไหม้แล้วเชื้อเพลิงจะไหลลงไม่สะดวกและไม่ทันกับการเผาไหม้ที่มีอากาศเท่าเดิมอัตราการป้อนอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิงจึงสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 2000 องศาเซลเซียสซึ่งสูงพอที่จะเหนียวน้ำให้เกิดการหลอมตัวของเถ้าได้จึงควรทำให้เชื้อเพลิงมีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ดีขึ้น

### 2.7.3 การกระจายขนาด (Size Distribution)

เชื้อเพลิงที่ไม่สร้างปัญหาให้กับเตาปฏิกรณ์ต้องมีขนาดที่เท่ากันสม่ำเสมอไม่แตกต่างกันมากนักเพราะหากขนาดแตกต่างกันมากอากาศและแก๊สจะไหลผ่านตามช่องว่างที่เกิดจากเชื้อเพลิงขนาดใหญ่และเล็ก ทำให้บางบริเวณมีการเผาไหม้รุนแรงแต่บางบริเวณเย็นตัวลงและอาจสลับกันในเวลาต่อมาทำให้เกิดการหลอมกันเป็นก้อน (clinker)

### 2.7.4 ปริมาตรหนาแน่น (Bulk Density)

ค่าที่แสดงลักษณะการใช้ปริมาตรของเชื้อเพลิงนั้นกล่าวคือเมื่อใส่อนุภาคเชื้อเพลิงปริมาณหนึ่งลงในภาชนะจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคของเชื้อเพลิงเกิดขึ้น ช่องว่างเหล่านี้ก็มีปริมาตรเช่นกัน ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมต่ำลง



### 2.7.5 สารระเหยในเชื้อเพลิง (Volatile Matter in Solid Fuel)

สารระเหย (Volatile matter) ที่ปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาสามารถควบแน่นได้ที่อุณหภูมิ 100 - 500 องศาเซลเซียสซึ่งจะก่อตัวเป็นทาร์ถ้าเชื้อเพลิงมีสารระเหยมากอาจทำให้เกิดปัญหาได้เนื่องจากทาร์อาจเกาะฝังตัวบนผนังจึงต้องแยกออกก่อนนำไปใช้งาน

### 2.7.6 ี่เถ้า (Ash)

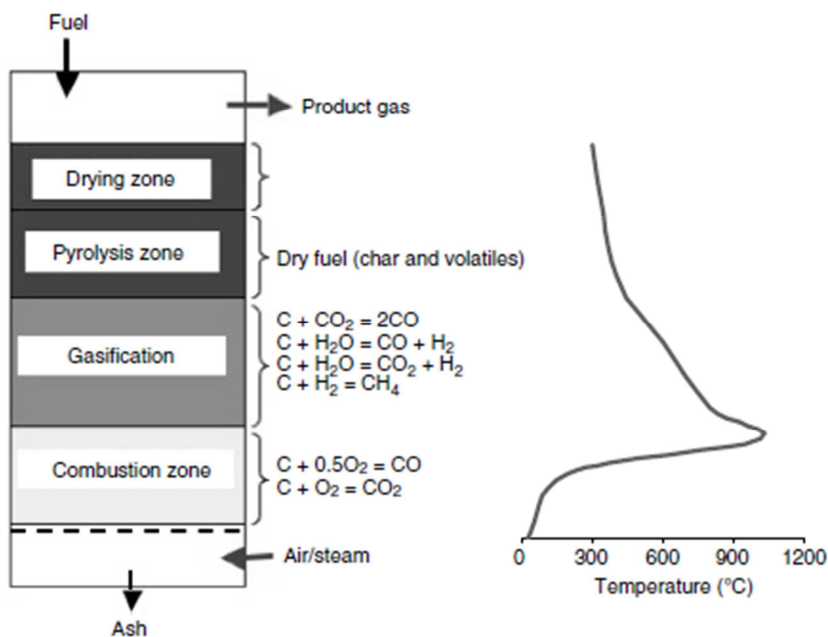
เถ้าเกิดจากแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในเชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนขณะเผาไหม้สัดส่วนของเถ้าในเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการทำงานของเตาปฏิกรณ์ถ้าสัดส่วนเถ้าในเชื้อเพลิงมีค่าสูงก็จะทำให้พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงลดลงและเตาปฏิกรณ์ต้องสำรองเนื้อที่เก็บเถ้ามากขึ้นและหากเถ้าหลอมตัวจะมีปัญหาในการเผาไหม้และการกำจัด

## 2.8 กระบวนการแกซิฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์ (Gasification Processes in the Reactors)

เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน คือ เตาผลิตแก๊ส (Gasifier) โดยลำดับของการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันของชีวมวลจะขึ้นอยู่กับประเภทและการออกแบบเตาปฏิกรณ์โดยทั่วไปแล้วเตาปฏิกรณ์หรือเตาผลิตแก๊ส (Gasifier) ที่ใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภทหลัก คือ เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Moving or fixed-bed reactor) เตาปฏิกรณ์แบบของไหล (Fluidized-bed reactor) และเตาปฏิกรณ์แบบไหลผ่าน (Entrained-flow reactor) ซึ่งเตาผลิตแก๊สแต่ละชนิดยังแบ่งลักษณะของลำดับการเกิดปฏิกิริยาภายในเตาที่ต่างกันตามรูปแบบการไหลของแก๊สและเชื้อเพลิงอีกด้วย

### 2.8.1 เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed or Moving Bed Reactor)

เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed reactor) มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ เตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier reactor) และเตาผลิตแก๊สแบบไหลลง (Downdraft gasifier reactor) ซึ่งเตาปฏิกรณ์ทั้งสองแบบนี้มีข้อแตกต่างกันในด้านของลำดับของการเกิดปฏิกิริยา

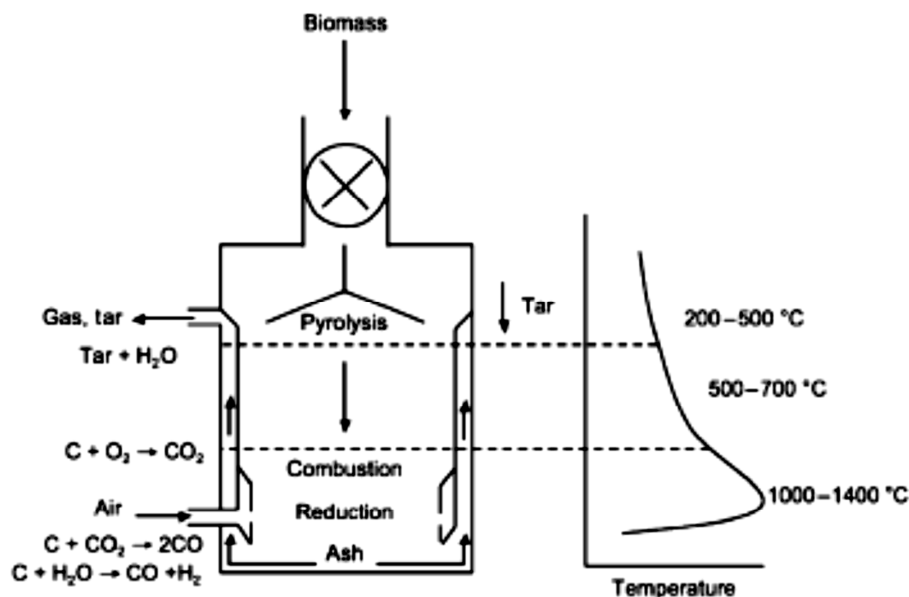


รูปที่ 2.7 ลำดับการเกิดปฏิกิริยาแก๊สไฟเคชันในเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier)  
(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555 : 131)

เตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier reactor) โดยทั่วไปเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าไปทางด้านบนของเตาผลิตแก๊ส และผลิตภัณฑ์แก๊สจะไหลออกจากทางด้านบนของเตาผลิตแก๊ส ตัวทำปฏิกิริยา (อากาศ ออกซิเจน และไอน้ำ) จะค่อยๆถูกให้ความร้อนก่อนที่จะเข้าสู่เตาผลิตแก๊สทางด้านล่าง (Combustion zone) เมื่ออากาศเข้าสู่เตาผลิตแก๊สและสัมผัสกับชาร์ที่อยู่ในส่วนล่างของเตาผลิตแก๊สและเกิดปฏิกิริยาสันดาปของคาร์บอน (สมการที่ 2.8-2.9) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ความร้อนที่ปล่อยออกมาจะลอยขึ้นด้านบนในขณะที่ของแข็งจะตกลงสู่ด้านล่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาสันดาปและไอน้ำจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนเข้าสู่ส่วนแก๊สไฟเคชัน (Gasification zone) จากนั้นทำปฏิกิริยากับชาร์ที่ได้จากไฟโรไลซิสของเชื้อเพลิงได้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง (สมการที่ 2.3-2.7) ถัดจากส่วนแก๊สไฟเคชัน (Gasification zone) คือไฟโรไลซิส (Pyrolysis zone) ซึ่งส่วนนี้เป็นส่วนที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนหรือไฟโรไลซิสของชีวมวล เกิดเป็นแก๊สระเหยต่างๆ ทาร์และชาร์ จากนั้นแก๊สระเหยจะลอย

ขึ้นไปข้างบน ในขณะที่ของแข็งซาร์จะตกลงสู่ด้านล่าง และส่วนบนสุดของเตาผลิตแก๊สนี้คือส่วนการอบ (Drying zone) ในส่วนนี้ชีวมวลที่ถูกป้อนเข้ามาจากด้านล่างบนจะได้รับความร้อนจากแก๊สร้อนที่ลอยขึ้นมาจากส่วนของแกซิฟิเคชันและไพโรไลซิส ทำให้ความชื้นในชีวมวลเกิดการระเหยออกมาในรูปของไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เตาผลิตแก๊สแบบไหลลง (Downdraft gasifier reactor) การแบ่งส่วนปฏิกิริยาภายในเตาผลิตแก๊สจะแตกต่างจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier reactor) ไอน้ำและออกซิเจนหรืออากาศจะถูกป้อนเข้าสู่ส่วนล่างของเตาผลิตแก๊ส และชีวมวลจะเข้าทางด้านบน (รูปที่ 2.8) ผลิตภัณฑ์แก๊สจากส่วนไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันจะเคลื่อนที่ลงด้านล่างลงไปสัมผัสกับซาร์ร้อนในส่วนแกซิฟิเคชัน การออกแบบเตาผลิตแก๊สแบบนี้ช่วยลดปริมาณทาร์ในผลิตภัณฑ์แก๊ส แต่แก๊สที่ได้จะมีพลังงานที่ต่ำ

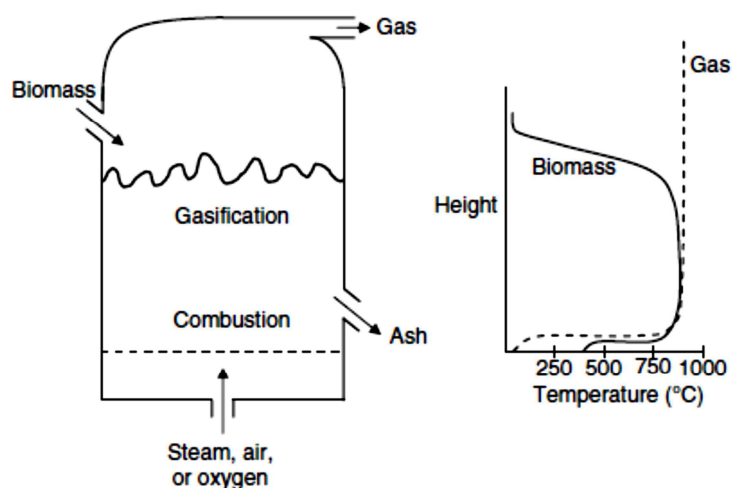


รูปที่ 2.8 ลำดับการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สแบบไหลลง (Downdraft gasifier)

(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555 : 132)

## 2.8.2 เตาปฏิกรณ์แบบเบดของไหล (Fluidized-Bed Reactor)

เตาผลิตแก๊สของไหลแบบฟองอากาศ(Bubbling fluidized bed) เชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์จะผสมกันอย่างรวดเร็วภายในเบดของไหล (รูปที่ 2.9) ตัวทำปฏิกิริยา (อากาศ ออกซิเจน และไอน้ำ) ที่ทำหน้าที่เป็นแก๊สของไหลจะถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทางด้านล่าง เตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหล โดยทั่วไปนั้น เชื้อเพลิงของแข็งหลังจากถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์จะสัมผัสกับเบดของแข็งที่ร้อน จากนั้นจะเกิดการอบแห้ง (Drying) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ของเชื้อเพลิงแข็งอย่างรวดเร็วเกิดเป็นชาร์และแก๊สต่างๆ



รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาแก๊สฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหล (Fluidized-bed gasifier)

(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555 : 133)

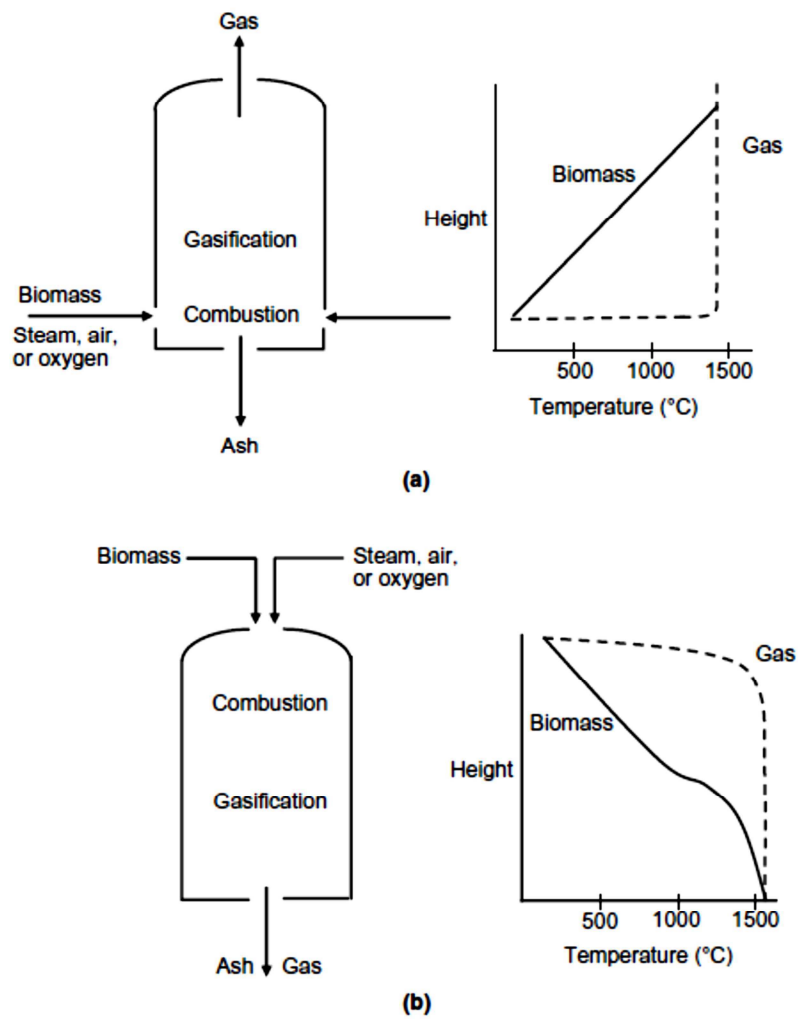
เตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหล (Fluidized-bed gasifier) เบดของแข็งจะผสมกันอย่างดีภายในเตาปฏิกรณ์ แก๊สของไหล (ตัวทำปฏิกิริยา) จะเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทางด้านล่างและออกจากเตาทางด้านบน ในระหว่างที่ตัวทำปฏิกิริยาเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทางด้านล่าง ออกซิเจนจะ

เกิดปฏิกิริยาสันดาปกับชาร์ที่ผสมอยู่กับวัสดุเบดนำความร้อนซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (สมการที่ 2.8-2.9) วัสดุเบดนำความร้อนจะได้รับความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาคายความร้อนเหล่านี้ และจะกระจายตัวอยู่ภายในเตาปฏิกรณ์ทำให้อุณหภูมิภายในเบดเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาอื่นๆสามารถเกิดขึ้นต่อไปได้อีกหลังจากที่มีแก๊สเกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสจะสัมผัสกับวัสดุเบดร้อน และเกิดการแตกตัวกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง แต่ถ้าหากแก๊สจากไพโรไลซิสเกิดหลุดจากเบดของไหลออกไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าก็อาจทำให้แก๊สระเหยเกิดการควบแน่นเกิดเป็นทาร์ได้ แต่เตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหล (Fluidized-bed gasifier) ไม่สามารถเปลี่ยนชาร์ให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้สมบูรณ์ เนื่องจากอาจมีชาร์บางส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาหลุดออกจากเตาปฏิกรณ์ไปพร้อมกับเถ้าจากความเร็วของอากาศหรือตัวทำปฏิกิริยาที่ใช้ ทำให้กระบวนการแก๊ส-ลิฟิเคชันมีประสิทธิภาพที่ลดลง จึงได้มีการพัฒนาเตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหลหมุนเวียน (Circulating fluidized-bed gasifier, CFB) ของแข็งสามารถหมุนเวียนในระบบซึ่งทำให้มีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของชาร์กับแก๊สหรือตัวทำปฏิกิริยาต่างๆได้นานขึ้น โดยทั่วไป อุณหภูมิสำหรับกระบวนการแก๊สลิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหลจะทำที่อุณหภูมิช่วง 800-1000 องศาเซลเซียส เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาจากการหลอมของเถ้า

### 2.8.3 เตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน (Entrained-Flow Reactor)

เตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน (Entrained-flow gasifier) เป็นเตาปฏิกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาแก๊สลิฟิเคชันแบบผสม (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) เตาปฏิกรณ์แบบนี้นิยมใช้อุณหภูมิที่ 1400 องศาเซลเซียส โดยอนุภาคของแข็งขนาดเล็กของเชื้อเพลิงจะไหลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์พร้อมกับตัวทำปฏิกิริยา รูปที่ 2.10 แสดงเตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่านทั้ง 2 ชนิด โดยชนิดแรก ออกซิเจนที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำปฏิกิริยา จะไหลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทางด้านข้าง และชนิดที่ 2 เชื้อเพลิงและออกซิเจนจะไหลเข้าทางด้านบน ปฏิกิริยาสันดาป (สมการที่ 2.8-2.9) จะเกิดขึ้นทันทีบริเวณที่ออกซิเจนถูกป้อนเข้าไป เชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์พร้อมกับน้ำในรูปของสารละลาย และเกิดปฏิกิริยาแก๊สลิฟิเคชันที่ได้รับพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของชาร์และแก๊สอื่นๆภายในเตาปฏิกรณ์อย่างรวดเร็ว อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์แบบนี้จะสูงกว่าเตาปฏิกรณ์แบบอื่นๆ ส่งผลให้เถ้าเกิดการหลอมตัว และทาร์ที่เกิดขึ้นเกิดการสลายตัวทางความร้อนจน

หมด ทำให้มีร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนที่สูง โดยบางครั้งมีการออกแบบเตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน (Entrained-flow gasifier) เป็นแบบถ่วงกวนเนื่องจากต้องการให้ของแข็งผสมให้เข้ากันอย่างต่อเนื่อง



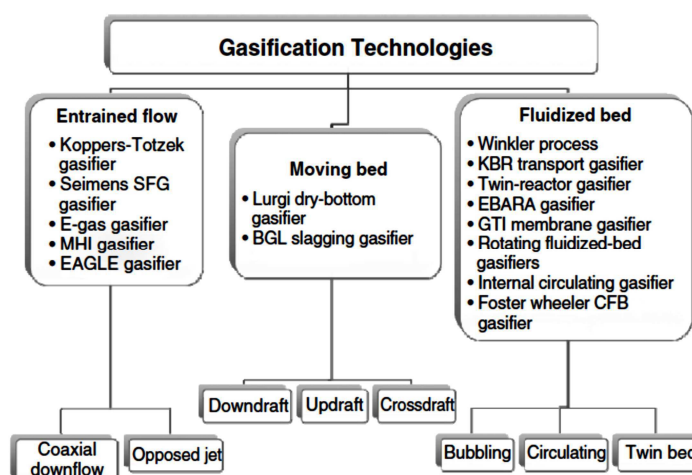
รูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาในเตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน (a) ป้อนด้านข้าง (b) ป้อนด้านบน

(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555 : 135)

## 2.9 การออกแบบเตาผลิตแก๊สของชีวมวล (Design of Biomass Gasifiers)

การออกแบบโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับกระบวนการแกซิฟิเคชันไม่เพียงแต่จะต้องมีเตาปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการเท่านั้น ยังจำเป็นที่จะต้องมีอุปกรณ์เครื่องกลที่คอยสนับสนุนกระบวนการอีกด้วย โดยทั่วไป การออกแบบโรงงานสำหรับกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลจะประกอบไปด้วยระบบต่างๆดังต่อไปนี้เตาผลิตแก๊ส (Gasifier reactor) ระบบการจัดการชีวมวล (Biomass-handling system) ระบบป้อนชีวมวล (Biomass-feeding system) ระบบทำความสะอาดแก๊ส (Gas-cleanup system) ระบบกำจัดเถ้าหรือกากของแข็ง (Ash or solid residue-removal system)

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการออกแบบเตาผลิตแก๊สเพียงเท่านั้นในการที่จะแบ่งแยกประเภทของเตาผลิตแก๊สต่าง ๆ นั้น จะทำการพิจารณาจากลักษณะของการสัมผัสกันของของแข็งกับแก๊ส และตัวทำปฏิกิริยา ถ้าหากพิจารณาจากของแข็งกับแก๊สที่สัมผัสกัน เตาผลิตแก๊สจะแบ่งเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ (1) แบบเบดนิ่ง (fixed or moving bed) (2) แบบเบดของไหล (fluidized bed) (3) แบบไหลผ่าน (entrained flow) และแต่ละแบบก็ยังมีแบ่งย่อยไปอีกตามลักษณะจำเพาะของแต่ละชนิด ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของเตาผลิตแก๊สชนิดต่างๆที่ผลิตจากผู้ผลิตทางตะวันตก



รูปที่ 2.11 เทคโนโลยีแกซิฟิเคชัน

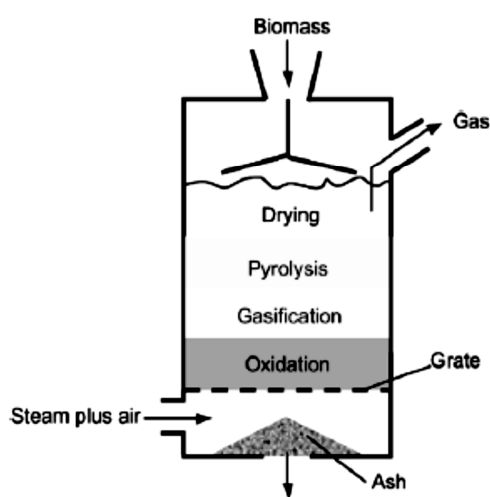
(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555 : 169)

### 2.9.1 เตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่ง (Fixed-Bed/Moving-bed Gasifiers)

เตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่งนี้ (Fixed-bed gasifier) มักนิยมเรียกอีกอย่างว่า เตาผลิตแก๊สแบบเบดเคลื่อนที่ (Moving-bed gasifier) เพราะว่าเชื้อเพลิงจะเคลื่อนที่เข้าสู่เตาผลิตแก๊ส เตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่งนี้สามารถสร้างเป็นเตาปฏิกรณ์ขนาดเล็กเพื่อลดต้นทุนได้ ซึ่งเป็นข้อดีอย่างหนึ่งของเตาปฏิกรณ์แบบนี้ แต่ข้อเสียของเตาผลิตแก๊ส คือ การกระจายของวัสดุเบดและความร้อนภายในเบดค่อนข้างต่ำ เตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่งหรือแบบเบดเคลื่อนที่จะแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก คือ เตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier) เตาผลิตแก๊สแบบไหลลง (Downdraft gasifier) และแบบไหลข้าม (Crossdraft gasifier)

#### 2.9.1.1 เตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (Updraft Gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นเป็นเตาผลิตแก๊สแบบดั้งเดิมและออกแบบง่ายที่สุด หลักการของเตาชนิดนี้ คือ สารตัวกลางแกซีฟิเคชัน (อากาศ ออกซิเจน หรือ ไอน้ำ) จะไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของเตาปฏิกรณ์ ขณะที่ของแข็งหรือเชื้อเพลิงจะไหลลงจากด้านบนลงไปที่ด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ การไหลของสารในเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้จะไหลสวนทางกัน (counter current flow) ผลิตภัณฑ์แก๊สจะไหลออกจากเตาปฏิกรณ์ทางด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier)

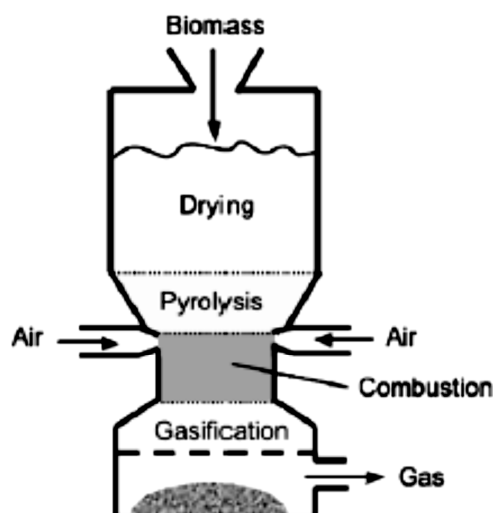
(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555 : 171)



เตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier) เหมาะสำหรับการใช้ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าสูง (มากกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก) และปริมาณความชื้นที่สูง (มากกว่าร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก) เช่น ถ่านหินแต่เตาปฏิกรณ์ชนิดนี้มีข้อเสีย คือ ผลិតภัณฑ์แก๊สที่ได้มีปริมาณของทาร์เกิดขึ้นมาก ซึ่งทำให้เตาผลิตแก๊สแบบนี้ไม่เหมาะสำหรับการใช้เชื้อเพลิงที่มีสารระเหยสูงอย่างชีวมวล

### 2.9.1.2 เตาผลิตแก๊สแบบไหลลง (Downdraft Gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบไหลลง (Downdraft gasifier) เป็นเตาปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบไหลทางเดียวกัน (co-current flow) โดยผลิตภัณฑ์แก๊สและของแข็งจะไหลจากส่วนบนลงไปยังส่วนล่างของเตาปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.13 เตาผลิตแก๊สแบบนี้จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีองค์ประกอบของทาร์น้อยกว่าเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นเนื่องจากทาร์ที่เกิดขึ้นในเตาปฏิกรณ์จะไหลลงผ่านส่วนเผาไหม้ที่มีความร้อนสูงทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนของทาร์แต่เตาผลิตแก๊สแบบนี้จะมีข้อเสียในด้านขีดจำกัดชนิดของเชื้อเพลิงที่ต้องมีขนาดเล็กเท่านั้น เนื่องจากเตาแบบนี้ในส่วนเผาไหม้จะมีลักษณะเป็นคอคอดเพื่อให้การเผาไหม้เกิดได้ดีขึ้น

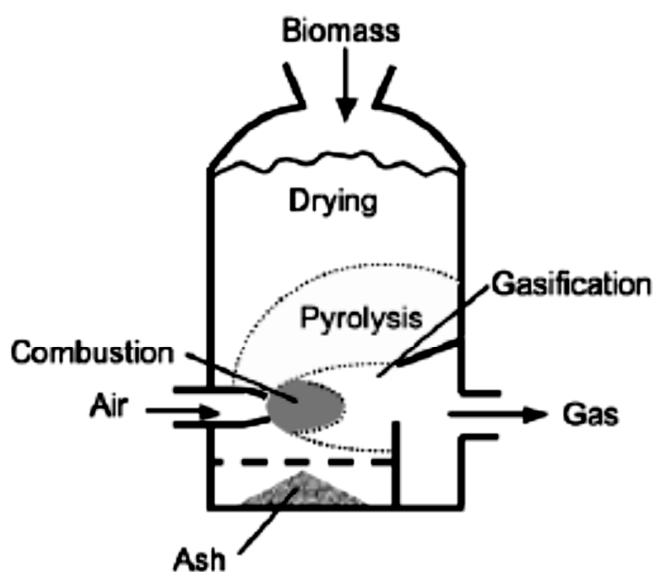


รูปที่ 2.13 เตาผลิตแก๊สแบบไหลลง (Downdraft gasifier)

(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555 : 173)

### 2.9.1.3 เตาผลิตแก๊สแบบไหลข้าม (Crossdraft Gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบไหลข้าม (Crossdraft gasifier) เป็นเตาปฏิกรณ์แบบไหลทางเดียวกัน โดยเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตาปฏิกรณ์ และอากาศจะถูกป้อนเข้าทางด้านข้าง (รูปที่ 2.14) เตาปฏิกรณ์แบบนี้นิยมใช้สำหรับกระบวนการแกซิฟิเคชันของถ่านไม้ที่มีปริมาณเถ้าต่ำๆ ซึ่งจะต่างจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นและไหลลง (Updraft and downdraft gasifier) ตรงที่ผลิตภัณฑ์แก๊สจากเตาปฏิกรณ์แบบนี้จะไหลออกจากเตาทางด้านข้างในแนวเดียวกับทางที่อากาศถูกป้อนเข้ามา เตาผลิตแก๊สแบบนี้ไม่เหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าและทาร์สูงๆ เนื่องจากระยะเวลาสำหรับแก๊สในเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ค่อนข้างต่ำเนื่องจากความเร็วของอากาศที่ใช้



รูปที่ 2.14 เตาผลิตแก๊สแบบไหลข้าม (Crossdraft gasifier)

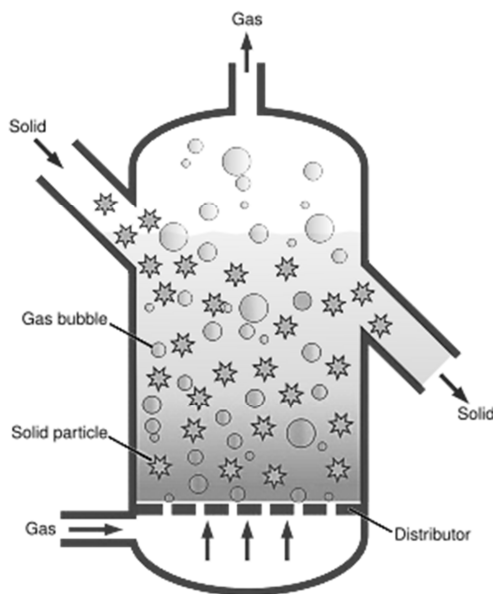
(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555 : 176)

## 2.9.2 เตาผลิตแก๊สแบบของไหล (Fluidized-Bed Gasifiers)

เตาผลิตแก๊สแบบของไหล (Fluidized-bed gasifiers) เตาปฏิกรณ์ชนิดนี้จะไม่มีการแบ่งบริเวณการเกิดปฏิกิริยาเหมือนกับเตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่ง และมีข้อดีในด้านการกระจายตัวทางความร้อนและของแข็งภายในเตาจะมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ได้ดีกว่าเตาปฏิกรณ์แบบอื่นๆ โดยเชื้อเพลิงที่อยู่ในเตาปฏิกรณ์แบบนี้จะนิยมเรียกว่าวัสดุเบด (bed materials) ซึ่งจะมีลักษณะการไหลคล้ายของไหลจากการใช้ตัวกลางแกซิฟิเคชันป้อนผ่านเชื้อเพลิงเหล่านี้ด้วยความเร็วที่พอเหมาะ การกระจายตัวที่ดีของเชื้อเพลิงและความร้อนยังช่วยลดการรวมตัวกันระหว่างของแข็งอีกด้วย โดยเตาผลิตแก๊สแบบของไหลจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ เตาผลิตแก๊สแบบของไหลฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed gasifier) และเตาผลิตแก๊สแบบของไหลหมุนเวียน (Circulating fluidized-bed gasifier)

### 2.9.2.1 เตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหลฟองอากาศ (Bubbling Fluidized-Bed Gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบของไหลฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed gasifier) เตาปฏิกรณ์ชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันของถ่านหินและชีวมวล โดยแก๊สจะไหลผ่านชั้นของวัสดุเบดร้อน และวัสดุเบดร้อนเหล่านี้จะถ่ายเทความร้อนให้แก่แก๊ส เตาปฏิกรณ์แบบนี้จะมีข้อดีในด้านการกระจายตัวทางความร้อนของอนุภาคที่สม่ำเสมอทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์ ทำให้ไม่มีจุดใดจุดหนึ่งภายในเตาปฏิกรณ์ที่มีความร้อนสูงเกินไปหรือต่ำเกินไป ซึ่งช่วยลดการหลอมของเถ้าที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามข้อเสียของเตาปฏิกรณ์แบบนี้ คือ อนุภาคของแข็งภายในเตาปฏิกรณ์จะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจากความเร็วของอากาศที่ใช้ ทำให้อาจเกิดการสึกหรอของผนังภายในเตาปฏิกรณ์ อีกทั้งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จะมีปริมาณเถ้าปะปนออกมาด้วยมาก

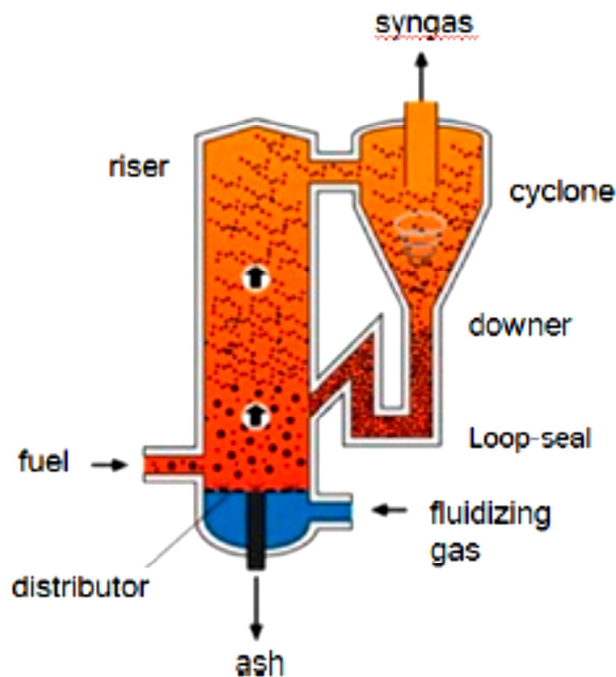


รูปที่ 2.15 เตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหลฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed gasifier)

(ที่มา Wikipedia, 2555 : online)

### 2.9.2.2 เตาผลิตแก๊สแบบของเบดไหลหมุนเวียน (Circulating Fluidized-Bed Gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบของไหลหมุนเวียน (Circulating fluidized-bed gasifier, CFB) แสดงดังรูปที่ 2.16 เตาปฏิกรณ์แบบนี้เป็นพัฒนามาจากเตาปฏิกรณ์แบบของไหลฟองอากาศ เพื่อช่วยแก้ปัญหาในด้านของการแยกของแข็งและเถ้าออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่อาจหลุดออกไป เนื่องจากความเร็วของอากาศที่ใช้ โดยจะนำของแข็งที่แยกจากแก๊สกลับเข้าสู่ส่วนของเตาปฏิกรณ์ ด้วยไซโคลน (cyclone) ของแข็งจะตกลงสู่ด้านล่างของไซโคลนตามหลักแรงโน้มถ่วง และแก๊สจะลอบออกจากไซโคลนทางด้านบน ของแข็งหรือวัสดุเบดจะถูกป้อนกลับเข้าสู่ส่วนล่างของเตาผลิตแก๊สเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงและวัสดุเบดร้อนต่อไป

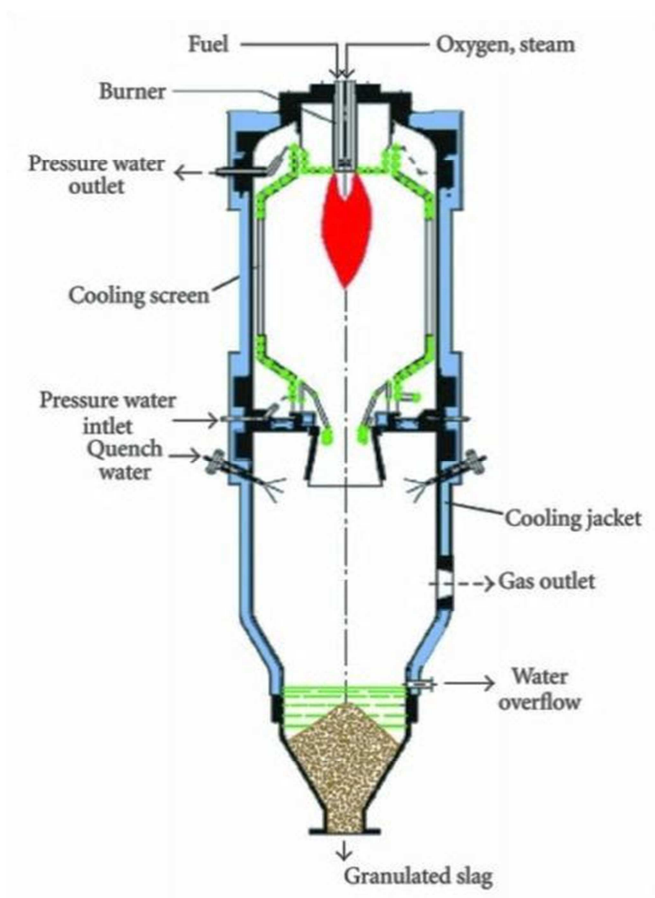


รูปที่ 2.16 เตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหลหมุนเวียน (Circulating fluidized-bed gasifier)

(ที่มา Envirotherm, 2555 : online)

### 2.9.3 เตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน (Entrained-Flow Gasifiers)

เตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน (Entrained-flow gasifier) แสดงดังรูปที่ 2.17 นิยมใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันขนาดใหญ่สำหรับเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูง อีกทั้งเตาปฏิกรณ์แบบนี้มีระยะเวลา (residence time) ในการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สค่อนข้างสั้น อุณหภูมิในการเผาไหม้สำหรับเตานี้ค่อนข้างสูง ถ้าจากชีวมวลมีอุณหภูมิการหลอมต่ำ ทำให้อาจเกิดการหลอมของเถ้าจากชีวมวลได้ง่าย จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้นทำให้เตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ไม่เหมาะสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวล อุณหภูมิสำหรับปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันของเตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่านนี้จำเป็นต้องทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้แทบจะไม่มีทาร์เป็นองค์ประกอบอยู่เลย และยังมีปริมาณของมีเทนในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ต่ำอีกด้วย



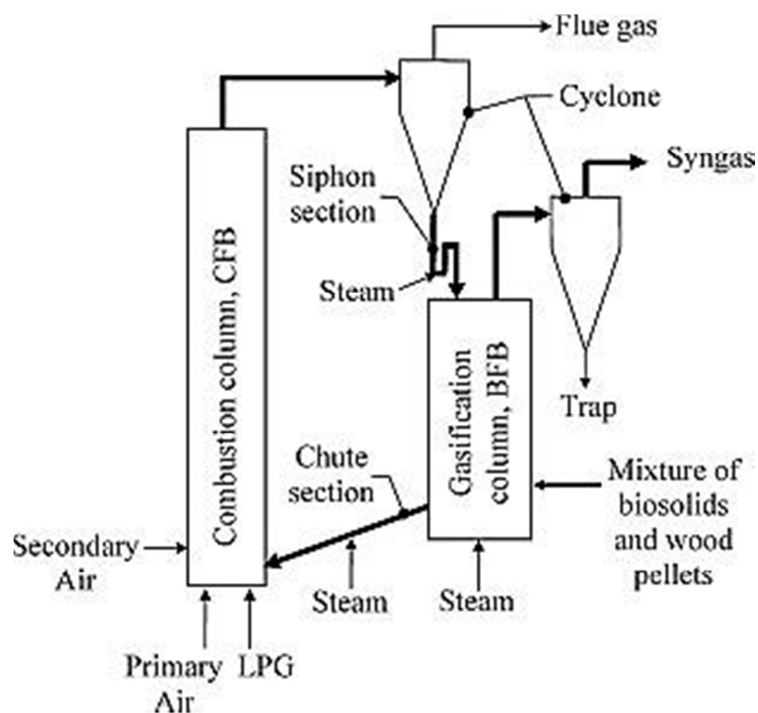
รูปที่ 2.17 เตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน (Entrained-flow gasifier)

(ที่มา Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2555 : 188)

#### 2.9.4 เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-Bed Gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) เป็นเตาปฏิกรณ์ที่จะประกอบไปด้วยเตาปฏิกรณ์ 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเกิดปฏิกิริยาสันดาปซึ่งเป็นส่วนที่จะปล่อยความร้อนออกมา และส่วนที่สองจะเป็นส่วนที่เกิดแกซิฟิเคชันของเชื้อเพลิงซึ่งความร้อนที่ใช้จะได้อมาจากส่วนแรก (รูปที่ 2.18) เชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่ส่วนผลิตแก๊ส โดยชีวมวลจะสัมผัสกับวัสดุเบดร้อน และไอน้ำภายในเตาปฏิกรณ์เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้เป็นแก๊สสังเคราะห์ หลังจากนั้นแก๊สผลิตภัณฑ์จากถูกแยกออกจากวัสดุเบดที่ใช้งานแล้วด้วยไซโคลน โดยผลิตภัณฑ์แก๊สจะลอยออกจากไซโคลนทางด้านบน และวัสดุเบดจะตกลงสู่ด้านล่างพร้อมกับผลิตภัณฑ์ของแข็ง เช่น ชาร์ เพื่อ

กลับสู่ส่วนเตาเผาไหม้ วัสดุเบดจะได้รับความร้อนอีกครั้งจากการเผาไหม้ของซาร์ในส่วนเผาไหม้ และถูกป้อนกลับเข้าสู่ส่วนผลิตแก๊สอีกครั้ง แก๊สเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาเผาไหม้จะลอยออกจากเตาปฏิกิริยาไป



รูปที่ 2.18 เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier)

(ที่มา Woei Saw และคณะ, 2012 : 93)

## 2.10 การกำจัดทาร์ (Tar removal)

ทาร์ (Tar) เป็นของผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่ควบแน่นได้ มีลักษณะข้นเหนียวสีดำ ติดไฟได้ องค์ประกอบภายในทาร์ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นที่นำมาเผาไหม้ องค์ประกอบของทาร์ เช่น แนฟทาลีน (naphthalene) หรือเบนซีน (benzene) เป็นต้น โดยปกติทาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลหรือถ่านหิน หากผลิตภัณฑ์แก๊สมีทาร์

เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยจะทำให้เกิดปัญหาอุดตันกีดขวางเส้นทางการไหลของระบบ เนื่องจากเกิดการควบแน่นของทาร์ การกำจัดทาร์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การกำจัดทาร์ระหว่างปฏิกิริยา และการกำจัดทาร์หลังปฏิกิริยา

### 2.10.1 การกำจัดทาร์ระหว่างปฏิกิริยา

#### 2.10.1.1 การใช้วัสดุเติมพิเศษ

การเติมวัสดุเติมพิเศษจำพวกตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะ เช่น นิกเกิล และเหล็ก หรือวัสดุอื่นๆ เช่น หินปูน ลงไปในชั้นเชื้อเพลิง จะส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากปฏิกิริยา และการกำจัดทาร์ ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส ยังมีผลต่อการลดลงของทาร์ การเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนที่ได้จากการสลายตัวของทาร์ และอาจจะลดการจับตัวกันของวัสดุเบดที่จะไปขวางการไหลอีกด้วย โลหะออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$  และ  $\text{MoO}_3$  เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุเติมพิเศษประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีปัญหาคือการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากอุณหภูมิในกระบวนการที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเตาผลิตแก๊สแบบเบดของไหลที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการเสื่อมสภาพเร็วกว่าเตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่ง เนื่องจากเกิดการกระแทกของตัวเร่งปฏิกิริยากับผนังเตา ปฏิกิริยาจากความเร็วของตัวทำปฏิกิริยา (อากาศ หรือออกซิเจน) วัสดุชนิดอื่นที่หาได้ง่าย คือ ซาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแก๊ซิฟิเคชัน แต่ซาร์จะถูกทำปฏิกิริยาและสลายไปด้วย

#### 2.10.1.2 การออกแบบเตาปฏิกรณ์

การออกแบบเตาปฏิกรณ์ที่เหมาะสมมีผลต่อกระบวนการ โดยเฉพาะในด้านประสิทธิภาพ ค่าความร้อนของแก๊ส และปริมาณทาร์ที่เกิดขึ้น เช่น การออกแบบเตาผลิตแก๊สแบบ 2 ขั้นตอน (two-stage gasification)

### 2.10.2 การกำจัดทาร์หลังปฏิกิริยา

#### 2.10.2.1 การดักจับเชิงกล

การดักจับทาร์ที่เกิดจากกระบวนการด้วยอุปกรณ์เชิงกล เช่น การใช้ไซโคลน (cyclone) ชุดกรองแบบต่างๆ การแยกอนุภาค การใช้เครื่องดักไฟฟ้าสถิต หรือการดัก



ด้วยสครับเบอร์ (scrubber) วิธีเหล่านี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง สามารถดักจับทาร์ได้ดี นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้เป็นการกำจัดทาร์โดยการแยกออกไปเท่านั้น ไม่ใช่การเปลี่ยนโครงสร้างภายในของทาร์แต่อย่างใด ราคาต้นทุนในการติดตั้งสูง

### 2.10.2.2 การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking)

การแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking) ของทาร์ เป็นวิธีการใช้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูง ทาร์ที่ได้รับความร้อนจะแตกตัวเป็นแก๊สที่มีโมเลกุลเล็กลง ยิ่งอุณหภูมิและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นการแตกตัวของทาร์ก็จะมากขึ้น

### 2.10.2.3 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) เป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้ทาร์เกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น โดยจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีของการสลายตัวของทาร์เป็นแก๊สเพิ่มขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมควรมีลักษณะดังนี้ เกิดการเกาะตัวของคาร์บอน (coking) บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีความแข็งแรงคงทนต่ออุณหภูมิสูงๆ มีราคาไม่แพง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ

1) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni-based catalyst) สามารถช่วยในการแตกตัวของทาร์ได้ดี และมีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนสูง หาได้ง่ายและมีราคาถูก อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนมีเทนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้อีกด้วย แต่มีข้อเสีย คือ มีความไวต่อการเกิดโค้ก (coking)

2) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลคาไล (Alkali) เช่น กลุ่มคาร์บอเนต กลุ่มออกไซด์ และกลุ่มไฮดรอกไซด์ของโลหะอัลคาไล สามารถทำให้ทาร์แตกตัวได้ดีเช่นกัน

3) ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) เช่น กลุ่มแร่แคลเซียม ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{MgCO}_3$ ) มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดทาร์ออกจากกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวล

4) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทรานซิชัน (Transition metal) เช่น โรเดียม (Rh) แพลเลเดียม (Pd) แพลทินัม (Pt) และรูทีเนียม (Ru) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดทาร์สูง และมีเสถียรภาพที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีราคาที่สูงมาก

#### 2.10.2.4 การแตกตัวด้วยพลาสมา (Plasma cracking)

สารประกอบอินทรีย์สามารถสลายตัวได้ง่ายด้วยกระแสไอออนโคโรนาหรือพลาสมา (plasma) โดยอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดสารอนุมูลที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และเข้าทำปฏิกิริยาในการแตกตัวของทาร์ตัวอย่างรวดเร็ว

### 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Xu และคณะ (2006) ศึกษาเตาผลิตแก๊สแบบของไหลความเร็วต่ำ (Low-Velocity Dense Fluidized Bed, LVFB) ซึ่งมีลักษณะการไหลของของไหลในเบดเป็นแบบฟองอากาศ (Bubbling-Fluidized Bed) และเตาผลิตแก๊สแบบของไหลความเร็วสูง (High-Velocity Pneumatic Riser, HVPR) ซึ่งลักษณะการไหลของของไหลภายในเบดแบบเร็ว (Fast-Fluidized Bed) ว่าแบบใดเหมาะสมที่จะใช้เป็นส่วนเผาไหม้และส่วนผลิตแก๊สในเตาผลิตแก๊สแบบของไหลเบดคู่ พบว่ารูปแบบของเตาผลิตแก๊สแบบของไหลเบดคู่ที่ให้ประสิทธิภาพของกระบวนการแกซิฟิเคชัน และความสามารถในการกำจัดทาร์สูงประกอบไปด้วยส่วนเผาไหม้ที่เป็นเตาแบบ HVPR และส่วนผลิตแก๊สที่เป็นเตาแบบ LVFB

Hamel และคณะ (2007) ออกแบบเตาผลิตแก๊สแบบของไหลเบดคู่ 2 ชั้นตอนโดยในส่วน of เตาผลิตแก๊สเป็นแบบเบดนิ่ง จากผลการทดลองที่ได้พบว่ามีร้อยละการเปลี่ยนของทั้งคาร์บอนและไฮโดรเจนที่สูง และปริมาณทาร์ที่ได้มีค่าต่ำเนื่องจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่ง 2 ชั้นตอนนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ออกซิเจน หรืออากาศในการไหลของวัสดุเบดร้อน แต่จะอาศัยแรงโน้มถ่วงในการเคลื่อนที่ของวัสดุเบดร้อนจากเบดส่วนที่หนึ่งหรือส่วนบนเข้าสู่เบดส่วนที่สองหรือเบดส่วนล่าง ทำให้ไม่มีไนโตรเจนเจือปนในแก๊สสังเคราะห์ และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของทาร์กับวัสดุเบดร้อนสูง ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จึงมีคุณภาพสูง

Diego และคณะ (2008) ปรับปรุงคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์ด้วยรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลอะลูมินาภายในเตาผลิตแก๊สแบบของไหล การทดลองจะแบ่งเป็นสองช่วง คือ ช่วงของการรีดักชัน และช่วงของการออกซิเดชัน โดยจะทำการป้อนแก๊สมีเทน ไอน้ำ และแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในเบดที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่เพื่อให้แก๊สมีเทนและไอน้ำทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงผ่านตัวเร่ง จากนั้นจะป้อนแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่แก๊สมีเทนที่อาจจะยังเหลืออยู่ ออก และจะป้อนแก๊สไนโตรเจน และอากาศเข้าไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ได้นิกเกิลออกไซด์ที่ว่องไวกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง จากผลการทดลองที่ได้พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลอะลูมินาสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของแก๊สมีเทน ทำให้แก๊สมีเทนสลายตัวเป็นแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี แก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีคุณภาพที่สูงขึ้น

Pfeifer และคณะ (2008) ศึกษาผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันทาร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนิกเกิลออกไซด์ในเตาผลิตแก๊สแบบของไหลเบดคู่ จากผลการทดลองที่ได้พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของทาร์ได้ดี มีร้อยละการเปลี่ยนที่สูงถึง 98 ที่อุณหภูมิ 850-900 องศาเซลเซียส และไม่พบการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการทดลองที่นานกว่า 12 ชั่วโมง เนื่องจากโค้กที่เกิดขึ้นสลายตัวได้ดีที่อุณหภูมิสูง

Xu และคณะ (2009) ออกแบบเตาผลิตแก๊สแบบของไหลเบดคู่ 2 ขั้นตอนขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเตาผลิตแก๊สแบบของไหลเบดคู่ทั่วไปหรือแบบ 1 ขั้นตอนซึ่งในส่วนผลิตแก๊สของเตาผลิตแก๊สแบบ 1 ขั้นตอนมีส่วนของช่องว่างมากเกินไปทำให้แก๊สบางส่วนที่เกิดขึ้นไม่สัมผัสกับวัสดุเบดร้อน ต่างกับเตาผลิตแก๊สแบบ 2 ขั้นตอนที่มีการลดบริเวณช่องว่าง และเพิ่มโอกาสให้แก๊สได้สัมผัสกับวัสดุเบดร้อนมากขึ้น พบว่าเตาผลิตแก๊สแบบ 2 ขั้นตอนมีร้อยละการเปลี่ยนของทั้งคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงกว่าเดิม และปริมาณทาร์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าเตาผลิตแก๊สแบบ 1 ขั้นตอน ทั้งนี้เป็นเพราะไอระเหยเกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสกับวัสดุเบดร้อนมากกว่า ทำให้ทาร์สลายตัวได้ดีขึ้นอย่างไรก็ตามเตาผลิตแก๊สแบบ 2 ขั้นตอนนี้จำเป็นต้องใช้ไอน้ำและอากาศเพื่อให้เกิดการไหลของของไหล ทำให้อุณหภูมิในส่วนผลิตแก๊สลดลง แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จึงมีไนโตรเจนปะปนอยู่ด้วย ส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร

### บทที่ 3

#### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

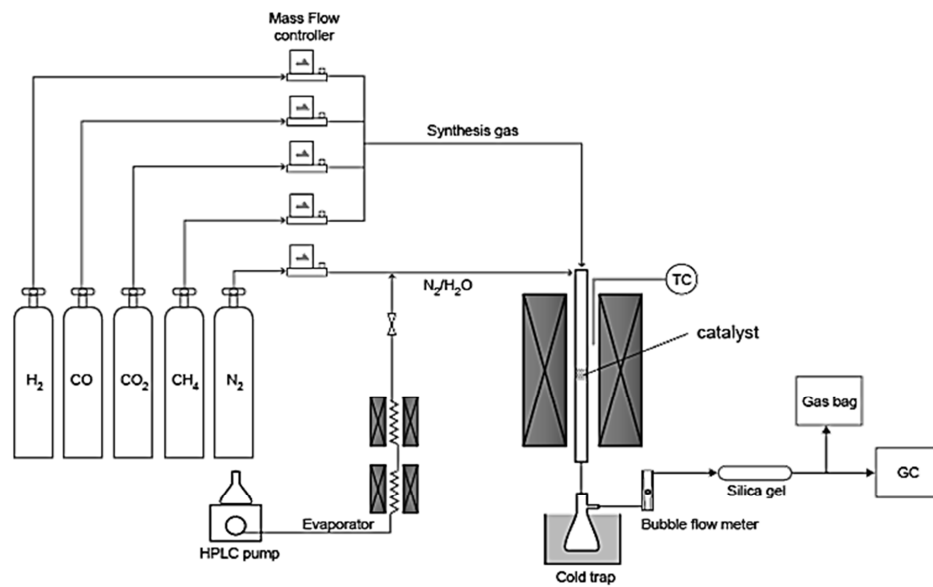
##### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก ศึกษาผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale fixed bed reactor) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลอะลูมินา (Ni/Al) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลโมลิบดีนัมอะลูมินา (Ni-Mo-Al) และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลออกไซด์แมกนีเซียมออกไซด์อะลูมินา (NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่สภาวะวะอุณหภูมิต่างๆ และส่วนที่สองศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) และปรับปรุงคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์ด้วยรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming reactor) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนแรก

##### 3.1.1 เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-Scale Fixed-bed Reactor)

ในการศึกษาผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (Steam and dry reforming) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิล เช่น Ni/Al, Ni-Mo-Al และ NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยานี้ จะทำการศึกษาในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เตาปฏิกรณ์ทำจากแก้วควอทซ์ (fused quartz) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ส่วนสูง 50 เซนติเมตร สารตั้งต้นที่ใช้ประกอบด้วยไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH<sub>4</sub>) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) เครื่องควบคุมอัตราการไหล (mass flow controller) ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สแต่ละชนิดได้ตามต้องการ โดยแก๊สผสม (H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub>) และไอน้ำจะถูกป้อนเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ทางด้านบน ตามภาวะอุณหภูมิที่กำหนด รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนจะเกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ จากนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จะไหลออกทางด้านล่างของเตาปฏิกรณ์นี้ตามการไหลของแก๊สพาหรือ

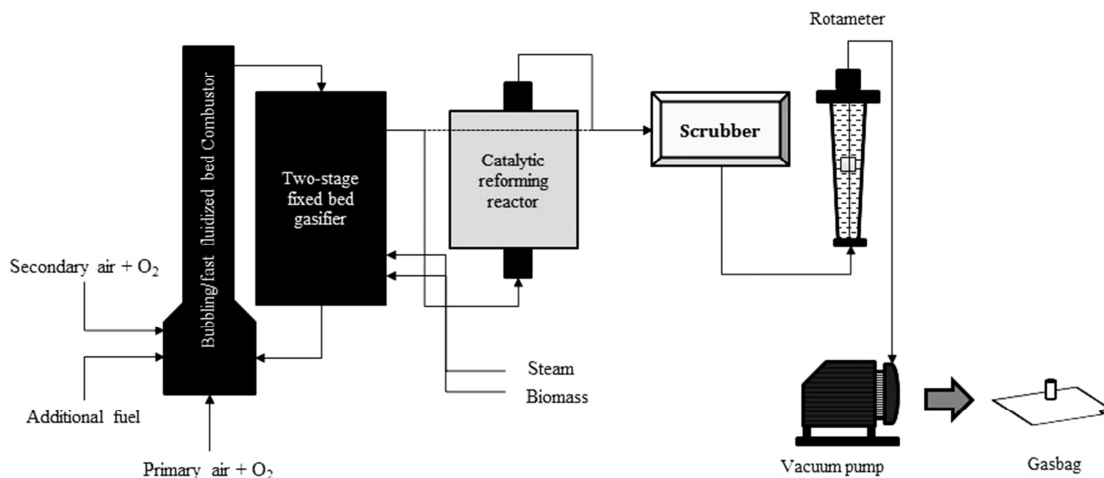
ไนโตรเจนที่ใช้ ผลิตภัณฑ์แก๊สจะถูกทำให้เย็นลงโดยการผ่าน cold trap จากนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สจะผ่าน silica gel เพื่อลดความชื้น ก่อนเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก๊สและนำไปวิเคราะห์ด้วย GC



รูปที่ 3.1 เตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาระดับห้องปฏิบัติการ  
(Lab-scale fixed bed reactor)

### 3.1.2 เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-Bed Gasifier) และเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reforming reactor) สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์

เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) และเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming reactor) ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.2 เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) และเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming reactor)

3.1.2.1 ส่วนเผาไหม้ (Bubbling/fast fluidized bed combustor) ทำจากเหล็กทนความร้อนภายในหล่อปูนเป็นฉนวนกันความร้อนซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนเตาเผา (Bubbling fluidized bed combustor) สูง 55 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.8 เซนติเมตร และส่วนท่อนำส่งของแข็ง (Fast fluidized bed combustor) สูง 191 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.4 เซนติเมตร

3.1.2.2 ส่วนผลิตแก๊ส (Two-stage fixed bed gasifier) ทำจากเหล็กทนความร้อนภายในหล่อปูนเป็นฉนวนกันความร้อน ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนล่างของเตาหรือไพโรไลเซอร์ (Pyrolyzer) สูง 72 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 33 เซนติเมตร และส่วนบนหรือรีฟอร์มเมอร์ (Reformer) สูง 55.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 เซนติเมตร

3.1.2.3 ส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming reactor) ทำจากเหล็กทนความร้อน สูง 72 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.5 เซนติเมตร

3.1.2.4 หน่วยทำความสะอาดแก๊ส (Water scrubber)

### 3.1.2.5 โรตاميเตอร์ (Rotameter)

### 3.1.2.6 ป้อนสุญญากาศ (Vacuum pump)

### 3.1.2.7 ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส (Gas bag) ขนาด 1 ลิตร

ชีวมวลและไอน้ำจะถูกป้อนเข้าไปในส่วนแกซีฟิเคชันของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ที่มีวัสดุเบดร้อนอยู่ ชีวมวลจะสัมผัสกับวัสดุเบดร้อนเกิดการสลายตัวทางความร้อนหรือไพโรไลซิสของชีวมวลเกิดเป็นสารระเหย ทาร์ และชาร์ สารระเหยและทาร์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น จากนั้นแก๊สสังเคราะห์จะลอยออกจากเตาผลิตแก๊สนี้ทางด้านบน ชาร์และวัสดุเบดที่เป็นของแข็งจะตกลงสู่ด้านล่างของเตาผลิตแก๊ส และถูกป้อนกลับเข้าสู่ส่วนเตาปฏิกรณ์เผาไหม้เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ให้ความร้อนแก่วัสดุเบดต่อไป แก๊สสังเคราะห์ที่ออกจากเตาผลิตแก๊สแล้วจะสามารถไหลผ่านเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์ก่อน หรือไปยังระบบทำความสะอาดแก๊ส (water scrubber) เพื่อทำการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก๊สได้โดยด้วยวาล์วควบคุมการไหล จากนั้นตัวอย่างแก๊สที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ด้วย GC



รูปที่ 3.3 เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่และส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง  
(Dual-bed gasifier and other equipments)



รูปที่ 3.4 เตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา  
(Catalytic reforming reactor)

### 3.1.3 เครื่องคัดขนาด (Sieve Shaker)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องคัดขนาดเพื่อคัดขนาดของทรายและชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัย  
เครื่องคัดขนาดแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องคัดขนาด (Sieve shaker)



### 3.1.4 เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟของ Shimadzu รุ่น GC-2014 ดังรูปที่ 3.6 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ผลิตได้จากเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale fixed bed reactor) และเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) โดยภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สโครมาโทกราฟ

(Shimadzu: Gas Chromatograph GC-2014)

ตารางที่ 3.1 ภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องโครมาโทกราฟ

แก๊สพา (Carrier gas)	อาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์ (Column)	Unibeads C packed column
อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)	120 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (Column temperature)	60, 120 และ 140 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (Detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD)

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่

3.2.1 ไม้เลื่อย (Sawdust) ขนาดอนุภาคประมาณ 1.2 มิลลิเมตร จากโรงเลื่อยเขี้ยวชาญชัยค้าไม้ จังหวัดสมุทรสงคราม

3.2.2 ทราย (Silica sand) ขนาดอนุภาค 350-450 ไมโครเมตร จากห้างหุ้นส่วนจำกัด ตั้งสะดวก จังหวัดระยอง

3.2.3 ถ่านไม้ (Charcoal) จากห้างหุ้นส่วนจำกัด ถ่านปรีชา

3.2.4 แก๊สหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas, LPG) จากบริษัท ปตท. มหาชน จำกัด

3.2.5 แก๊สออกซิเจน (Oxygen gas) เกรด 99.5% จากบริษัท แลปแก๊ส (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.6 แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas) เกรด 99.99% จากบริษัท แพร์ริชแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.7 แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen gas) เกรด 99.99% จากบริษัท แพร์ริชแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.8 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide gas) เกรด 99.99% จากบริษัท แพร์ริชแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.9 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide gas) เกรด 99.99% จากบริษัท แพร์ริชแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.10 แก๊สมีเทน (Methane gas) เกรด 99.99% จากบริษัท แพร์ริชแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลอะลูมินา (Ni/Al) และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลโมลิบดีนัมอะลูมินา (Ni-Mo-Al) จากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท.

3.2.12 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์อะลูมินาที่ (NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังตามลำดับ (sequential impregnation)

3.2.13 อะลูมินาบอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร จากบริษัทไนโซ (ประเทศไทย) จำกัด

### 3.3 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์อะลูมินา (NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ด้วยวิธีเคลือบฝังตามลำดับ (sequential impregnation) ส่วนที่สอง ศึกษาผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale fixed bed reactor) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิล เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลอะลูมินา (Ni/Al) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลโมลิบดีนัมอะลูมินา (Ni-Mo-Al) จากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์อะลูมินา (NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังตามลำดับ (sequential impregnation) ที่สภาวะอะลูมิเนียมต่างๆ และส่วนที่สาม ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีล้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) และรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ในเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming reactor) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนแรก โดยวิธีการทดลองทั้ง 3 ส่วน มีดังนี้

**3.3.1 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์อะลูมินา (NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) โดยวิธีเคลือบฝังตามลำดับ (sequential impregnation)**

3.3.1.1 เตรียมสารละลายอิมเพรแกนท์ (impregnant) โดยเตรียมสารละลายแมกนีเซียมไนเตรท เข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ใช้ปริมาตรของสารละลายตามร้อยละของแมกนีเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการ (แมกนีเซียมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก)

3.3.1.2 นำสารละลายอิมเพรแกนท์ที่เตรียมได้มาใส่ลงบนตัวรองรับอะลูมินา แล้วให้ความร้อนโดยใส่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งใช้แท่งกวนตลอดเวลา จนกระทั่งสารละลายมีลักษณะขุ่น

3.3.1.3 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.1.4 นำไปแคลไซน์ในเตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้  $MgO/Al_2O_3$

3.3.1.5 เตรียมสารละลายนิเกิลอะซิเตท เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร โดยตวงปริมาตรของสารละลายตามร้อยละของนิเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการ (นิเกิลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก)

3.3.1.6 นำสารละลายอิมเพรกแนนท์ที่เตรียมได้มาใส่บน  $MgO/Al_2O_3$  ที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.3.1.4 ให้ความร้อนโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งใช้แท่งกวนจนกระทั่งสารละลายมีลักษณะข้น

3.3.1.7 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแคลไซน์ในเตาเผาความร้อนสูง ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $NiO/MgO/Al_2O_3$

**3.3.2 ศึกษาผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale fixed bed reactor) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ**

3.3.2.1 ใส่ quartz wool ไว้ตรงบริเวณส่วนที่คอคของท่อ

3.3.2.2 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะศึกษา ( $Ni/Al$ ,  $Ni-Mo-Al$  หรือ  $NiO/MgO/Al_2O_3$ ) ปริมาณ 2 กรัม ความสูงของเบดประมาณ 4 เซนติเมตร ใสลงในท่อเพื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.2.3 นำท่อไปใส่ลงในเตาให้ความร้อนตามลักษณะที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.1

3.3.2.4 เปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ ด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที

3.3.2.5 ให้ความร้อนกับเครื่องผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิขาออกเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเปิดสวิตช์ของเตาให้ความร้อน โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

3.3.2.6 เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถึงภาวะอุณหภูมิตามที่กำหนดแล้ว เปิดปั้มน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ (กรณีศึกษาผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำเท่านั้น) โดยใช้ อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที

3.3.2.7 ทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เข้าสู่ส่วนบนของเตาปฏิกรณ์ โดยอัตราการไหลของแก๊ส คือ 24, 14, 11 และ 30 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

3.3.2.8 เก็บผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 1 ลิตร แล้วนำแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์หองค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC)

3.3.2.9 ปิดสวิทช์เครื่องปั้มน้ำ เครื่องให้ความร้อนสำหรับผลิตไอน้ำเตาให้ความร้อนและหยุดการป้อนแก๊สไฮโดรเจนคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์

3.3.2.10 เมื่ออุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส จึงปิดแก๊สในโตรเจน

**3.3.3 ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขี้เลื่อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) และรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ในเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming reactor)**

3.3.3.1 เติมทรายน้ำหนัก 100 กิโลกรัมลงในส่วนผลิตแก๊ส และใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 500 กรัมลงในเตาปฏิกรณ์ของส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เซรามิกบอลหรืออะลูมินาบอลเป็นฐานรองตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 3 กิโลกรัม เบดสูง 30 เซนติเมตร

3.3.3.2 อุ่นเตาในส่วนเผาไหม้ด้วยแก๊สหุงต้ม โดยป้อนอากาศที่หัวจุดเตาจากเครื่องอัดอากาศ 150 ลิตรต่อนาที เมื่อไฟติดให้เปิดเครื่องเป่าลม (Blower)

3.3.3.3 ป้อนอากาศจากเครื่องอัดอากาศ 75 ลิตรต่อนาที สำหรับรุกระบายอากาศหลัก (Primary air) และ 50 ลิตรต่อนาที สำหรับบริเวณเหนือรุกระบายอากาศ (Secondary air)

พร้อมทั้งเปิดสกรูในส่วนป้อนกลับเพื่อให้ทรายในส่วนผลิตแก๊สไหลเข้าสู่ส่วนล่างของส่วนเผาไหม้ด้วยอัตราการป้อน 30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3.3.3.4 เมื่ออุณหภูมิในส่วนเผาไหม้สูงถึง 350 องศาเซลเซียส จึงเริ่มป้อนถ่านไม้เข้าไปในส่วนเผาไหม้ด้วยอัตรา 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และป้อนออกซิเจนผสมกับอากาศเข้าไปในส่วนนี้ด้วยเพื่อช่วยในการเผาไหม้

3.3.3.5 เมื่ออุณหภูมิในส่วนเผาไหม้สูงถึง 850 องศาเซลเซียส จึงปรับอัตราการป้อนทรายกลับให้เพิ่มขึ้นเพื่อควบคุมอุณหภูมิในส่วนเผาไหม้ไม่ให้สูงเกินไป และยังช่วยเพิ่มความเร็วยของปริมาณทรายจากส่วนเผาไหม้ที่ถูกส่งไปยังส่วนผลิตแก๊สอีกด้วย ทำให้ส่วนผลิตแก๊สมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิในส่วนผลิตแก๊สประมาณ 500-600 องศาเซลเซียส

3.3.3.6 หยุดการป้อนแก๊สหุงต้มและเริ่มป้อนซีลีเยอเข้าสู่ทางส่วนผลิตแก๊ส รอจนกระทั่งเริ่มมีแก๊สเกิดขึ้นในระบบ จึงหยุดป้อนถ่านไม้ โดยเชื้อเพลิงในส่วนเผาไหม้จะใช้คาร์บอนกระบวนการแกซีฟิเคชันจากส่วนผลิตแก๊สแทน

3.3.3.7 ป้อนซีลีเยอด้วยอัตราการป้อน 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และป้อนไอน้ำตามภาวะที่ต้องการศึกษา (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนในชีวมวลเท่ากับ 0, 0.5, 1, 1.5) รอจนมีปริมาณแก๊สมากพอจึงทำการเปิดปั๊มสูญญากาศเพื่อเก็บแก๊สที่อัตราการเก็บ 30 ลิตรต่อนาที แก๊สที่ถูกดูดออกมาจะผ่านหน่วยทำความสะอาดสครับเบอร์ จากนั้นจึงเก็บเข้าถุงเก็บแก๊ส (ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้นี้เป็นแก๊สที่ยังไม่ผ่านกระบวนการรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา)

3.3.3.8 เปิดเครื่องให้ความร้อนแก่เตาปฏิกรณ์ของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 500 กรัม ความสูงของเบดประมาณ 20 เซนติเมตร โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

3.3.3.9 เมื่ออุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ถึงภาวะตามที่ต้องการแล้ว จึงทำการปิดวาล์วของแก๊สก่อนเข้าหน่วยสครับเบอร์ และเปิดวาล์วสำหรับส่งแก๊สเข้าสู่ส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา แก๊สที่ได้จากส่วนผลิตแก๊สจะไหลเข้าสู่ส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา

จากนั้นแก๊สจะถูกดูดออกมาด้วยปั๊มสุญญากาศ และผ่านหน่วยทำความสะอาดสครับเบอร์ จากนั้นจึงเก็บเข้าถุงเก็บแก๊ส

3.3.3.10 หยุดการป้อนจีเลื่อย ไอน้ำ และออกซิเจน

3.3.3.11 เมื่ออุณหภูมิในส่วนเผาไหม้ลดลงต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส จึงทำการปิดระบบเครื่องทั้งหมด

3.3.3.12 นำตัวอย่างแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) และบันทึกผล

### 3.4 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

3.4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

- วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว

3.4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

- วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHN analyzer

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ศึกษาผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale fixed bed reactor) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลชนิดต่างๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลอะลูมินา (Ni/Al) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิล โมลิบดีนัมบนอะลูมินา (Ni-Mo-Al) จากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์อะลูมินา (NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบตามลำดับ (sequential impregnation) ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ และส่วนที่สอง ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (Dual-bed gasifier) และรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ในเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming reactor) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนแรก

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีลื้อย ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ส่วนที่ 2 คือ ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ ส่วนที่ 3 ผลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ และส่วนที่ 4 สมบัติของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ก่อนและหลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีลื้อย

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีลื้อยแบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าชีลื้อยมีปริมาณสารระเหยเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 78 โดยน้ำหนัก ในขณะที่มีปริมาณเถ้าเป็นองค์ประกอบเพียงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ชีลื้อยจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการทดลองในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่นี้ เนื่องจากระบบการผลิตแก๊สที่ใช้ ไม่มีไซโคลนที่ทำหน้าที่แยกของแข็งออกจากแก๊สที่เกิดขึ้นในส่วนของเตาเผา ก่อนที่วัสดุเบดร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังส่วนแกซิฟิเคชัน ทำ



ให้หากชีวมวลมีองค์ประกอบของเถ้าที่สูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีเถ้าปะปนออกมามาก อีกทั้งชี้อื่นๆไม่มีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่แล้ว และระบบการผลิตแก๊สของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ที่ทำการแยกส่วนเผาไหม้กับส่วนแกซิฟิเคชันออกจากกัน ผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จึงควรมีปริมาณไนโตรเจนปะปนอยู่น้อยมาก

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

องค์ประกอบแบบประมาณ	ชี้อื่นๆ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ความชื้น	9.10
สารระเหย	78.43
คาร์บอนคงตัว	8.51
เถ้า	3.96

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

องค์ประกอบแบบแยกธาตุ	ชี้อื่นๆ (%daf)
คาร์บอน	43.14
ไฮโดรเจน	5.07
ออกซิเจน	51.79
ไนโตรเจน	0.00

\*daf = dry ash free

#### 4.2 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการ

ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ (Dry reforming and steam reforming of methane) ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการ จะ

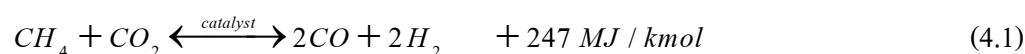
ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน 4 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลอะลูมินา (Ni/Al) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลโมลิบดีนัมอะลูมินา (Ni-Mo-Al) และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์อะลูมินา (NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) โดยผลการทดลองที่ได้จากการทดลองส่วนที่ 1 จะประกอบไปด้วย

#### 4.2.1 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al

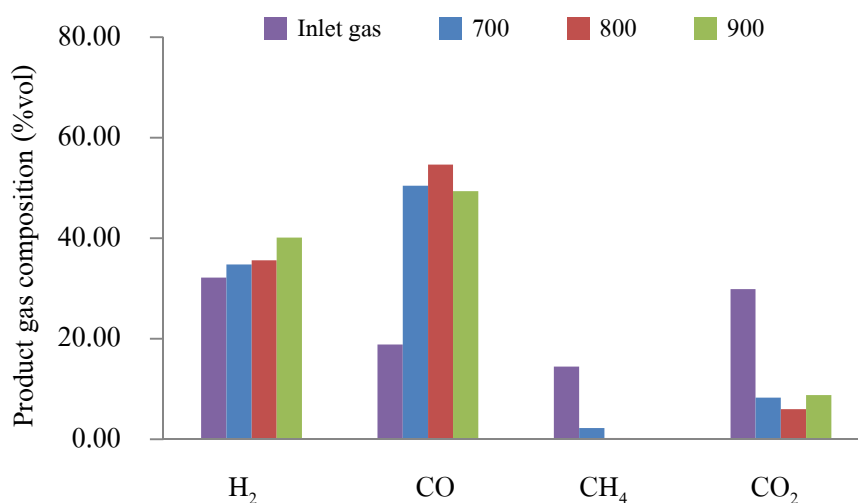
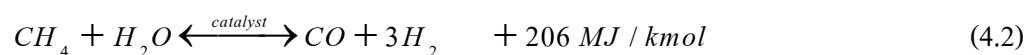
ผลของอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร) ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า องค์ประกอบของมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊สจะลดลงอย่างรวดเร็วจากปริมาณมีเทนเริ่มต้นที่ร้อยละ 14.44 เหลือเพียงร้อยละ 2.21 และ 0.54 สำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาคับด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (รูปที่ 4.1) และรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาคับด้วยไอน้ำ (รูปที่ 4.2) ตามลำดับ ในขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส จากร้อยละ 29.85 เหลือเพียงร้อยละ 8.32 ในกรณีของรีฟอร์มมิงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ แต่กลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 29.85 เป็นร้อยละ 33.89 ในกรณีของรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ซึ่งอาจเป็นผลจากมีการเกิดปฏิกิริยาน้ำเปลี่ยนเป็นแก๊ส (Water-gas shift) เกิดร่วมด้วยในรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีเทน (CH<sub>4</sub>) ในผลิตภัณฑ์แก๊สจะถูกเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ผ่านปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาทั้งสองจะสามารถเกิดได้ดีขึ้น สามารถบอกได้ว่า องค์ประกอบของมีเทนจะหมดไปที่อุณหภูมิดังกล่าว เนื่องจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนทั้งคู่ (Endothermic) แต่ในกรณีของปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยาน้ำเปลี่ยนเป็นแก๊ส จะเกิดการย้อนกลับของปฏิกิริยาขึ้น เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic) ส่งผลให้ในผลิตภัณฑ์แก๊สมีองค์ประกอบของ

คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนที่ลดลง และคาร์บอนมอนอกไซด์กลับเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.2

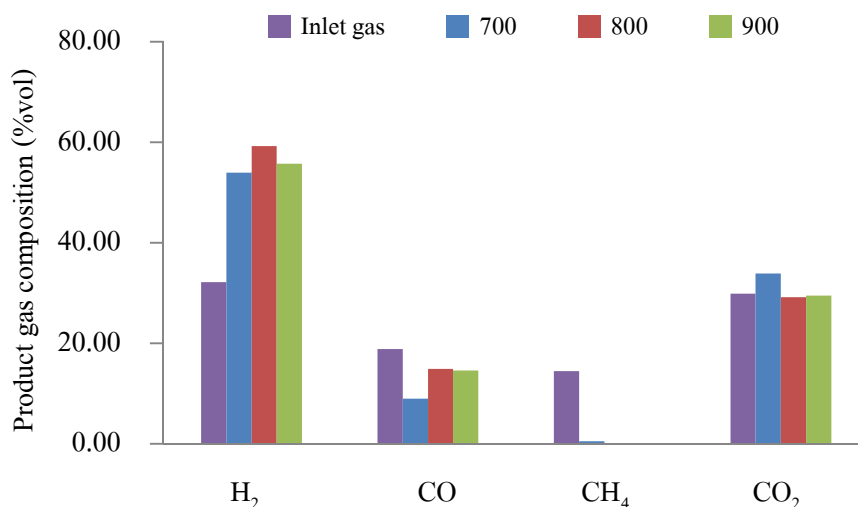
ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Dry or  $\text{CO}_2$  reforming of methane)



ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ (Steam reforming of methane)



รูปที่ 4.1 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al

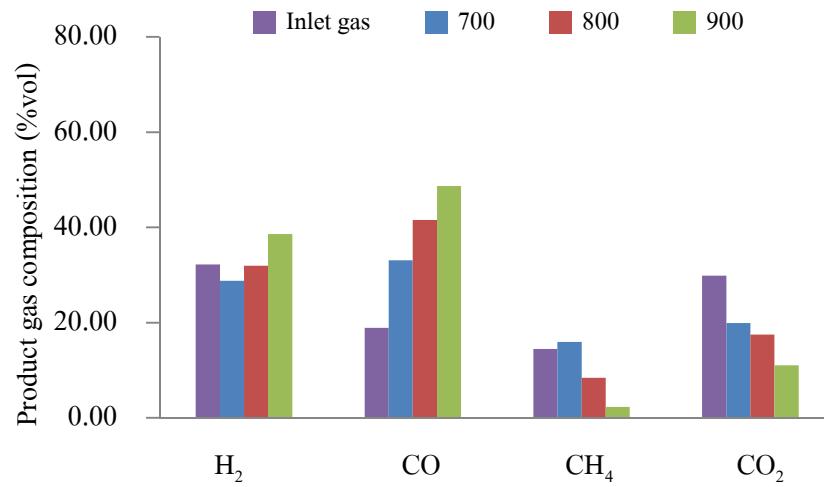


รูปที่ 4.2 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al

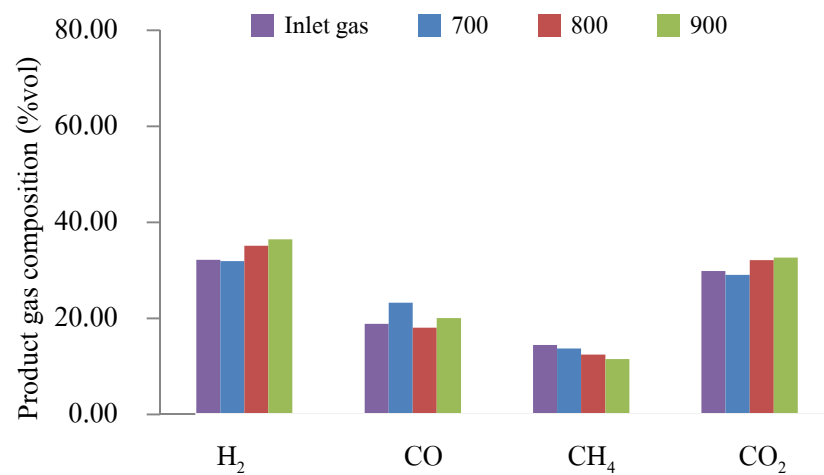
จากผลการทดลองที่ได้พบว่า ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ จะมีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นหลักมากกว่าการเลือกเกิดไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ต่างจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) เป็นหลัก ดังนั้นหากต้องการผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีค่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H<sub>2</sub>/CO ratio) สูงๆ ควรเลือกใช้รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยของมีเทนด้วยไอน้ำมากกว่า

#### 4.2.2 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo-Al

ผลของอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส(ร้อยละโดยปริมาตร) ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo-Al แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ ด้วย Ni-Mo-Al



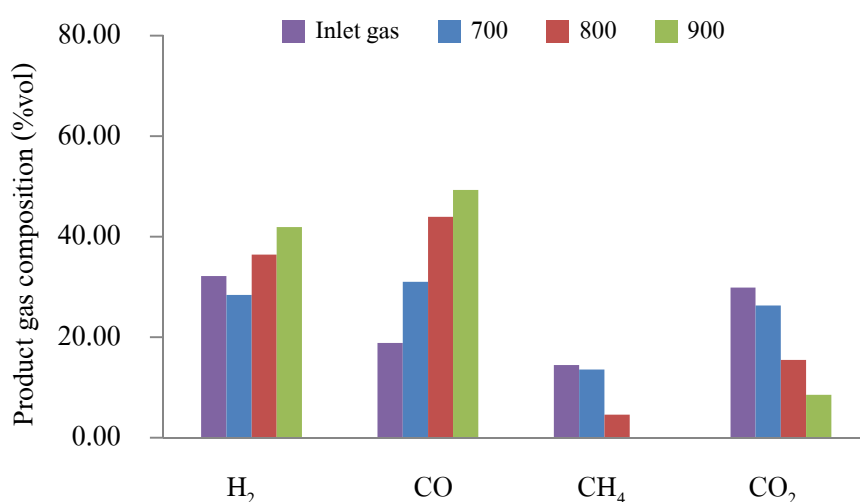
รูปที่ 4.4 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo-Al

จากผลการทดลองพบว่า องค์ประกอบของมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊สไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ แต่คาร์บอนไดออกไซด์กลับลดลงจากร้อยละ 29.85 เหลือร้อยละ 19.89 และคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18.88 เป็นร้อยละ 33.08 โดยที่ปริมาณไฮโดรเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo-Al อาจช่วยในการสลายตัวทางความร้อนของคาร์บอนไดออกไซด์กลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ในช่วงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนเลย และมีเทนจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงจากร้อยละ 14.44 เป็นร้อยละประมาณ 8.40 และ 2.29 ที่ช่วงอุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ในขณะที่รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo-Al แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สไม่ว่าจะเป็นไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิใดก็ตาม ดังรูปที่ 4.4 แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo-Al สามารถช่วยในการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ แต่ไม่สามารถช่วยการเร่งในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยไอน้ำ ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Huang และคณะ ที่ได้ทำการศึกษารีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Huang et al., 2011) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo-Al จะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al เนื่องจากโมลิตินัมที่เติมลงไปมีผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวที่น้อยกว่า

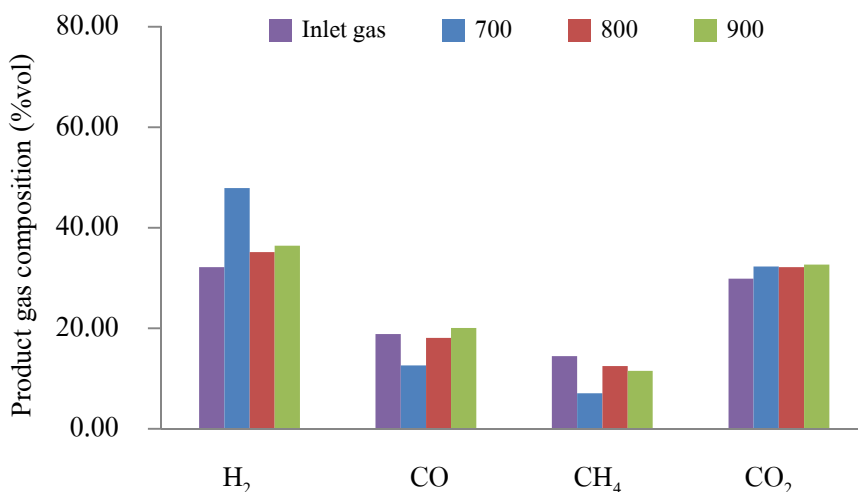
#### 4.2.3 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

ผลของอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละ โดยปริมาตร) ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ องค์ประกอบของมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊สจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แต่จะเริ่มลดลงจากร้อยละ 14.44 เหลือเพียงร้อยละ 4.60 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และมีเทนจะหมดไปที่

อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส คาร์บอนมอนอกไซด์ก็เพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากร้อยละ 18.88 เป็นร้อยละ 49.33 จากผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (4.1) ซึ่งที่อุณหภูมิสูงขึ้นช่วยให้ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดได้ดีขึ้น ในขณะที่รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊สจะลดลงจากร้อยละ 14.44 เป็นร้อยละ 7.09 แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำโดยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เกิดได้ไม่มากนัก แต่กลับมีปริมาณของมีเทนเกิดเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลของปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation) จากสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้นั่นเอง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ได้ผ่านขั้นตอนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 950 องศาเซลเซียส ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้อาจจะมีความว่องไวที่อุณหภูมิสูง (ศิวพรรณ มหาสุภาพ, “ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จากชีวมวลในเบดนิ่งสองชั้นตอน”, (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร สาขาวิชาการ เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553).)



รูปที่ 4.5 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ ด้วย NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



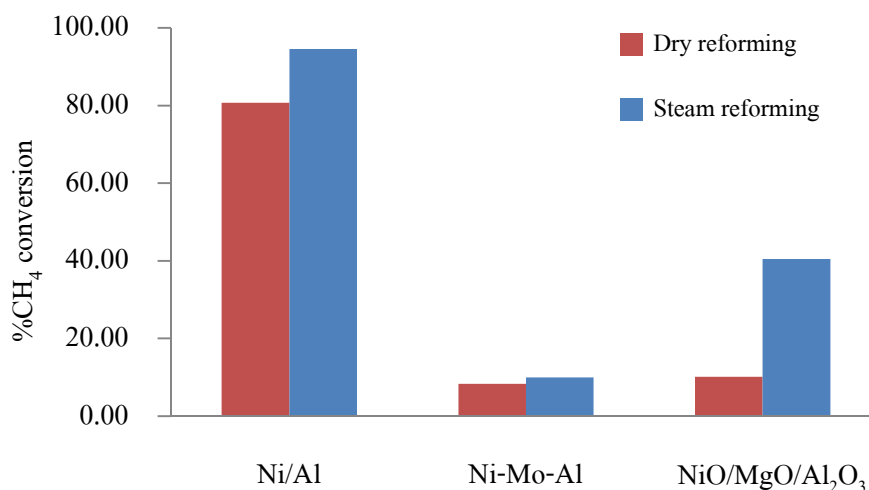
รูปที่ 4.6 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิในการทดลองต่างๆ ด้วย NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### 4.2.4 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทน และอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al Ni-Mo-Al และ NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทน ที่สภาวะอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.7 จากผลการทดลองพบว่าอัตราการเปลี่ยนร้อยละของมีเทนในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al จะมีร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนที่สูงที่สุดทั้งในกรณีของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ และสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo-Al และ NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ถึงสองเท่า โดยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al มีร้อยละการเปลี่ยนมีเทนประมาณร้อยละ 80 และ 95 สำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo-Al มีร้อยละการเปลี่ยนมีเทนประมาณร้อยละ 8 และ 9 สำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยคาร์บอนไดออกไซด์



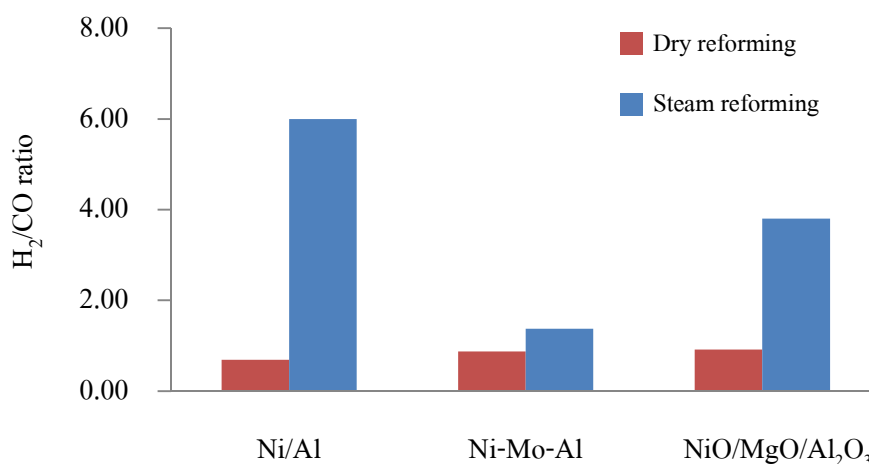
และไอน้ำ ตามลำดับ และตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีร้อยละการเปลี่ยนมีเทนประมาณร้อยละ 10 และ 40 สำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al, NiMo และ NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทน ที่สภาวะอุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 700 องศาเซลเซียส

ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ (Ni/Al Ni-Mo-Al และ NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H<sub>2</sub>/CO ratio) ที่สภาวะอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.8 จากผลการทดลองพบว่า H<sub>2</sub>/CO ratio ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al, Ni-Mo-Al และ NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> คือ 0.69, 0.87 และ 0.91 ตามลำดับ สำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และ 6.00, 1.37 และ 3.81 ตามลำดับ สำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่า H<sub>2</sub>/CO ratio ที่เข้าใกล้ 1 ตามหลักปริมาณสัมพันธ์

(stoichiometric) ของปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ 1:1 ดังสมการที่ (4.1) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยไอน้ำจะมีค่า  $H_2/CO$  ratio ที่มากกว่า 1 ตามหลักปริมาณสัมพันธ์ของปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ 3:1 ดังสมการที่ (4.2)



รูปที่ 4.8 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al, NiMo และ NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่สภาวะอุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 700 องศาเซลเซียส

จากผลที่ได้นี้สามารถสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการช่วยเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทน คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al เนื่องจากมีร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนที่สูง อีกทั้งในการทดลองส่วนที่สอง ได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีล้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ และรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ในเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ที่มีการใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันด้วย ซึ่งไอน้ำเหล่านี้อาจมีส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและผ่านเข้าไปในส่วนของเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาพร้อมกับแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al จึงมีความเหมาะสมสำหรับ

การนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองส่วนที่สอง เนื่องจากผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ต้องการควรมีค่า  $H_2/CO$  ratio ที่สูง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์มีคุณภาพที่ดีขึ้น เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตสารเคมี เช่น เมทานอล ที่ต้องการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้นที่มีค่า  $H_2/CO$  ratio ประมาณ 2 ตามหลักปริมาณสัมพันธ์

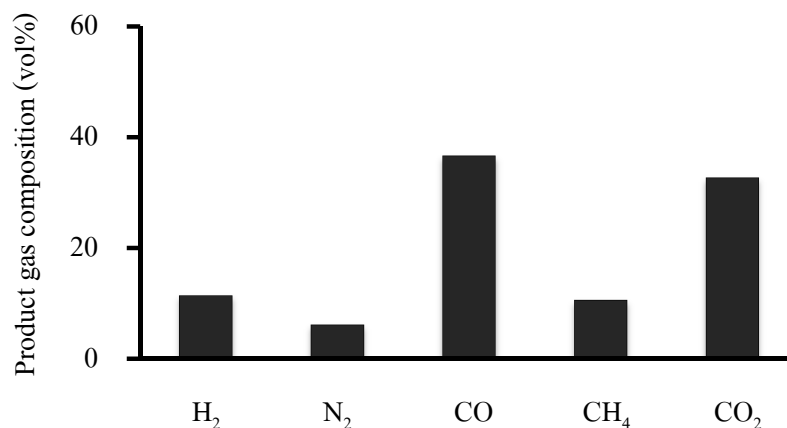
#### 4.3 ผลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่

ในการศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ด้วย โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วนย่อย คือ ส่วนแรก ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน (S/C ratio) ที่ 0.5, 1 และ 1.5 และส่วนที่สอง ศึกษาผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ โดยจะทำการศึกษาที่รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยทั้งสองส่วนนี้จะใช้อุณหภูมิเผาไหม้ที่ 800-850 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแกซิฟิเคชันที่ 500-600 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนชีวมวล 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการเก็บแก๊สที่ 25 ลิตรต่อนาที

##### 4.3.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่

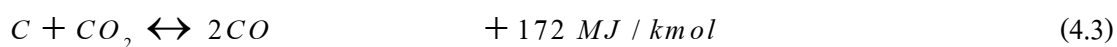
องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ โดยยังไม่มีกรป้อนไอน้ำ (S/C เท่ากับ 0) โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลไอน้ำต่อคาร์บอน (S/C ratio) เท่ากับ 0 อุณหภูมิในส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.9 ผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ได้ประกอบด้วยไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคาร์บอนมอนอกไซด์มีองค์ประกอบที่สูงที่สุดประมาณร้อยละ 32.15 และคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณร้อยละ 31.49 ในขณะที่ไฮโดรเจนและมีเทนอยู่ที่ประมาณร้อยละ 15.56 และ 12.24 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแกซิฟิเคชัน เช่น บาวดาร์ด (Boudouard) น้ำและแก๊ส (Water-gas) เปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส

(Water-gas shift) การเกิดมีเทน (Methanation) และรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ดังสมการที่ (4.3)-(4.8)

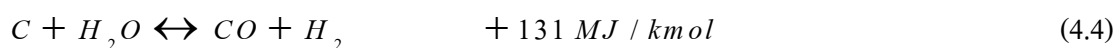


รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่สถานะที่ใช้ในการทดลอง: อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลไอน้ำต่อคาร์บอน 0 อุณหภูมิเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแก๊สไฟเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส

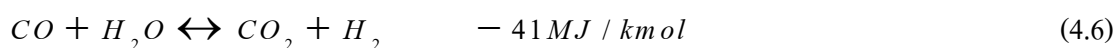
ปฏิกิริยาบาวดาร์ด (Boudouard reaction)



ปฏิกิริยาไอน้ำและแก๊ส (Water-gas reaction)



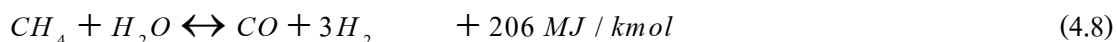
ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift reaction)



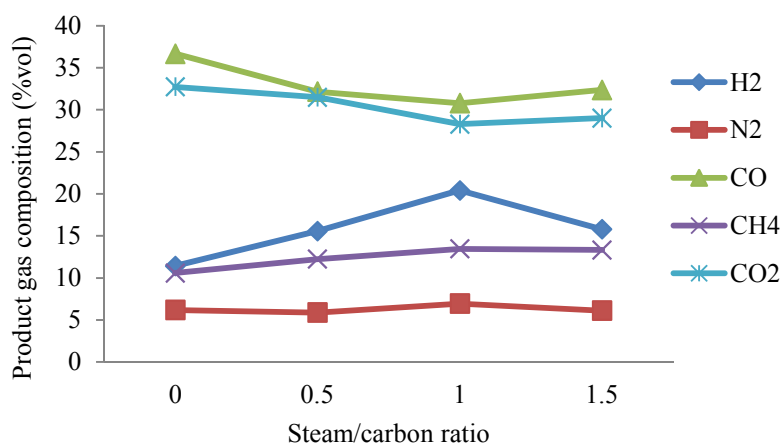
ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation)



ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming reaction)



จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าปริมาณไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ในผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ มีประมาณร้อยละ 6.18 ซึ่งถือว่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบทั่วไปที่จะมีปริมาณไนโตรเจนประมาณร้อยละ 40-50 ซึ่งปริมาณไนโตรเจนที่สูงมากเกินไป ซึ่งปริมาณไนโตรเจนที่สูงมากเกินไปทำให้แก๊สสังเคราะห์มีค่าความร้อน (Higher Heating Value, HHV) ที่ต่ำ ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการที่ต้องการพลังงานความร้อนสูง



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน (S/C ratio) ต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากขี้เลื่อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ สภาวะที่ใช้ในการทดลอง: อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแก๊สที่เย็น 500-600 องศาเซลเซียส

ผลของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน (S/C ratio) ต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ที่ผลิตจากจี้เลื่อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคลู โดยสถานะที่ใช้ในการทดลอง คือ อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลไอน้ำต่อคาร์บอน 0.5, 1 และ 1.5 อุณหภูมิในส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์แก๊สมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบสูงขึ้นเมื่อมีการป้อนไอน้ำเข้าไปในระบบ และจะมีปริมาณสูงที่สุดจากร้อยละ 11.42 เป็นร้อยละ 20.40 เมื่อใช้ S/C ratio เท่ากับ 1 และคาร์บอนมอนอกไซด์ในองค์ประกอบของแก๊สจะลดลงจากร้อยละ 36.67 เป็นร้อยละ 30.78 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากับไอน้ำผ่านปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift reaction) ดังสมการที่ (4.6) ในขณะที่มีเทนในองค์ประกอบแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งน่าจะเป็นผลจากปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift reaction) ตามด้วยปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation) ดังสมการที่ (4.6) และ (4.7) เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดไฮโดรเจนผ่านปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส จากนั้นโมเลกุลไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้ ผลิตภัณฑ์เป็นมีเทนสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม มีเทนในองค์ประกอบแก๊สควรจะลดลงเมื่อมีการป้อนไอน้ำให้แก่ระบบจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming reaction) ดังสมการที่ (4.8) แต่แนวโน้มที่ได้กลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันต่ำเกินไป (500-600 องศาเซลเซียส) ซึ่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนมีเทนด้วยไอน้ำที่เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (endothermic) จึงจำเป็นที่จะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่านี้ในการเกิดปฏิกิริยา และในช่วงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนที่ 1-1.5 พบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนลดลงจากร้อยละ 20.40 เป็นร้อยละ 15.78 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนสูงเกินไป ทำให้ในระบบมีไอน้ำที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาส่งผลให้ในเตาผลิตแก๊สมีความชื้นสูงขึ้น ทำให้ให้อุณหภูมิในส่วนแกซิฟิเคชันนี้ต่ำลง กระบวนการแกซิฟิเคชันจึงเกิดได้ยากขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เช่น ปฏิกิริยาบาวคาร์ด ปฏิกิริยาน้ำและแก๊ส และปฏิกิริยาเปลี่ยนมีเทนด้วยไอน้ำ ดังสมการที่ (4.3), (4.4), (4.5) และ (4.8) เป็นต้น และในไฮโดรเจนในองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์แต่ละตัวที่ได้ค่อนข้างคงที่และมีปริมาณน้อยมากประมาณร้อยละ 6 โดยปริมาตรเท่านั้น

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร) อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2/CO$ ) และค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) ของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากชี้เลี้ยงในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าแก๊สสังเคราะห์แต่ละตัวจะมีค่าความร้อน (HHV) ที่สูงประมาณ 10-12 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากแก๊สสังเคราะห์ที่แต่ละสภาวะ S/C ratio จะมีองค์ประกอบของมีเทนที่สูงใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 10-13 โดยปริมาตร ค่าความร้อนที่ได้จึงมาจากมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นหลัก เนื่องจากมีเทนเป็นแก๊สที่ให้ค่าความร้อนที่สูงที่สุด ประมาณ 39.82 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ให้ค่าความร้อนอยู่ที่ 12.75 และ 12.63 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์จากค่า  $H_2/CO$  ratio พบว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่นี้ยังมีคุณภาพที่ไม่ดีนัก เนื่องจากค่า  $H_2/CO$  ratio ของแก๊สสังเคราะห์มีค่าเพียง 0.31, 0.48, 0.66 และ 0.49 สำหรับ S/C ratio ที่ 0, 0.5, 1 และ 1.5 ตามลำดับ ซึ่งยังคงต่ำเกินไปสำหรับการนำไปใช้ในการผลิตสารเคมี ที่ต้องการแก๊สสังเคราะห์ที่มีค่า  $H_2/CO$  ไม่ต่ำกว่า 1.5 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่นี้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ให้ความร้อนได้ แต่ยังคงไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีในอุตสาหกรรม ดังนั้นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์จึงมีความจำเป็น เพื่อที่จะช่วยเพิ่มคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์

#### 4.3.2 ผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากชี้เลี้ยงในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่

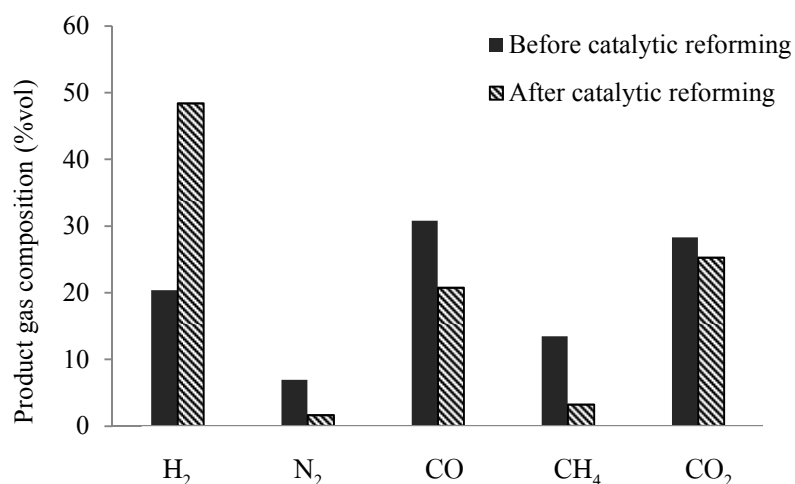
องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ก่อนผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (Before catalytic reforming) และหลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา (After catalytic reforming) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni/Al) ที่มีความเหมาะสมสำหรับการช่วยเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจากการทดลองที่ 4.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1 อุณหภูมิในส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในส่วนของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.11 องค์ประกอบของแก๊ส

ตั้งเคราะห์ก่อนและหลังรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยไฮโดรเจนร้อยละ 19.35 และ 48.42 ไนโตรเจนร้อยละ 2.56 และ 1.64 คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 27.54 และ 20.77 มีเทนร้อยละ 13.94 และ 3.23 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 36.57 และ 25.29 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบของแก๊สตั้งเคราะห์หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณไฮโดรเจนที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส ดังสมการที่ (4.1)-(4.2) และ (4.6) ซึ่งในส่วนของเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีการป้อนไอน้ำให้แก่ระบบ ดังนั้นไอน้ำที่ได้มาจากกาที่ไอน้ำเหลือจากการทำปฏิกิริยาในส่วนของแกซิฟิเคชัน ผ่านเข้ามายังส่วนของเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาพร้อมกับแก๊สตั้งเคราะห์นั่นเอง

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร) อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2/CO$ ) และค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) ของแก๊สตั้งเคราะห์ที่ผลิตจากชี้ที่อยู่ในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนต่างๆ

S/C ratios	Product gas composition (%vol)					$H_2/CO$	HHV
	$H_2$	$N_2$	CO	$CH_4$	$CO_2$	[-]	$MJ/Nm^3$
0	11.42	6.18	36.37	10.58	32.73	0.31	10.30
0.5	15.56	5.89	32.15	12.24	31.49	0.48	10.92
1	20.40	6.94	30.78	13.47	28.28	0.66	11.85
1.5	15.78	6.12	32.37	13.33	29.00	0.49	11.41

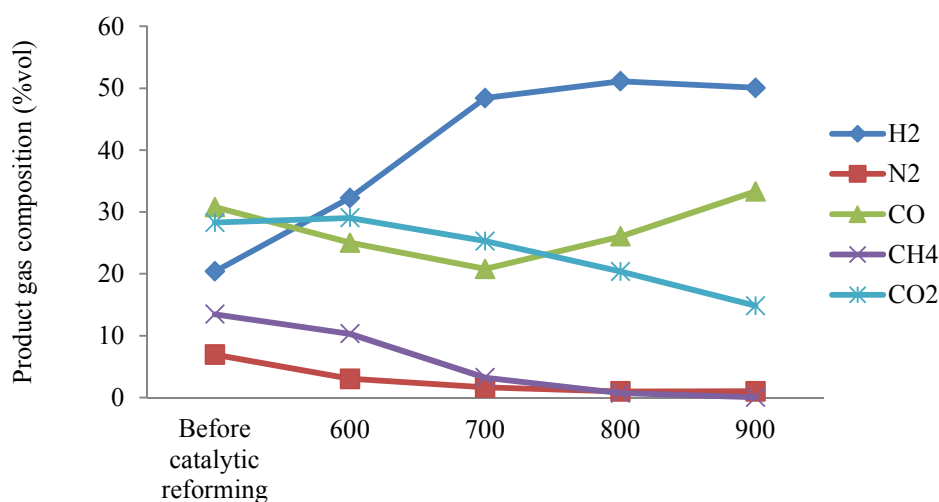




รูปที่ 4.11 องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ก่อนและหลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al สภาวะที่ใช้ในการทดลอง: อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที S/C ratio เท่ากับ 1 อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 700 องศาเซลเซียส

ผลของอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ก่อนและหลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al สภาวะที่ใช้ในการทดลองอัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที S/C ratio เท่ากับ 1 อุณหภูมิส่วนเตาเผา 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.12 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นประมาณ 700 องศาเซลเซียส ไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากร้อยละ 20.40 เป็น 48.42 ปริมาณมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊สลดลงจากร้อยละ 13.47 เหลือเพียง 3.23 และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงเล็กน้อยจากร้อยละ 30.78 และ 28.28 เป็นร้อยละ 20.77 และ 25.29 ตามลำดับ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าในช่วงอุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ (สมการที่ 4.2) เนื่องจากช่วงอุณหภูมินี้จะมีการเลือกเกิดไฮโดรเจนมากกว่าคาร์บอนมอนอกไซด์ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และอาจเกิดปฏิกิริยาอื่นร่วมด้วย เช่น รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (สมการที่ 4.1) และ

ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (สมการที่ 4.6) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ช่วงอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 700-900 องศาเซลเซียส ปริมาณไฮโดรเจนจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจากร้อยละ 48.42 เป็นร้อยละ 50.07 ในขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงอย่างรวดเร็วจากร้อยละ 20.77 เป็นร้อยละ 33.31 และร้อยละ 25.29 เป็นร้อยละ 14.84 ตามลำดับ และปริมาณมีเทนจะลดลงจนหมดไปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้จะมีการเลือกเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าไฮโดรเจน เนื่องจากที่อุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส จะเกิดรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (สมการที่ 4.1) เป็นหลัก เนื่องจากปริมาณไอน้ำที่มีอาจเหลือน้อยลง ทำให้ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนจึงเลือกเกิดผ่านคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าจากปริมาณของสารที่มากกว่า และอุณหภูมิที่สูงถึง 900 องศาเซลเซียส ทำให้รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดได้ดีเพราะความเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน และอาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (สมการที่ 4.6) ร่วมด้วยเนื่องจากปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อน



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al สภาวะที่ใช้ในการทดลอง: อัตราการเก็บแก๊ส 25 ลิตรต่อนาที S/C ratio เท่ากับ อุณหภูมิส่วนแก๊สฟีด 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

#### 4.4 สมบัติของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เถ้าในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ก่อนและหลังผ่านรีฟอร์มิงเชิงเร่งปฏิกิริยา

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร) อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2/CO$ ) และค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) ของแก๊สสังเคราะห์ก่อนและ หลังผ่านรีฟอร์มิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al แสดงในตารางที่ 4.4 จากผลการทดลองที่ได้พบว่า แก๊สสังเคราะห์แต่ละตัวจะมีค่าความร้อน (HHV) ที่ใกล้เคียงกันประมาณ 11-12 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร แต่ในกรณีของแก๊สสังเคราะห์หลังผ่านรีฟอร์มิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และก่อนผ่านรีฟอร์มิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ค่าความร้อนที่ได้จะมาจากมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นหลัก เนื่องจากแก๊สสังเคราะห์นี้มีมีเทนเป็นองค์ประกอบที่สูงประมาณ 10-13 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ต่างกับกรณีค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์หลังผ่านรีฟอร์มิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ที่จะมาจากไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นหลัก เพราะไม่มีมีเทนเป็นองค์ประกอบแล้ว และเมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์จากอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2/CO$  ratio) พบว่าแก๊สสังเคราะห์หลังผ่านรีฟอร์มิงเชิงเร่งปฏิกิริยาจะมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงขึ้น โดยแก๊สสังเคราะห์หลังผ่านรีฟอร์มิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะมี  $H_2/CO$  ratio ที่สูงขึ้น เท่ากับ 1.29, 2.33, 1.96 และ 1.50

จากผลการทดลองที่ได้ จึงสรุปได้ว่าแก๊สสังเคราะห์หลังผ่านรีฟอร์มิงเชิงเร่งปฏิกิริยาแล้วจะมีค่า HHV ประมาณ 10-11 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่า  $H_2/CO$  ratio ที่สูงที่สุดประมาณ 2.33 ทำให้แก๊สสังเคราะห์หลังผ่านรีฟอร์มิงเชิงเร่งปฏิกิริยานี้ น่าจะสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตสารเคมีสำคัญในอุตสาหกรรมได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร) อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2/CO$ ) และค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) ของแก๊สสังเคราะห์ ก่อนและหลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al

Temperature	Product gas composition (%vol)					$H_2/CO$	HHV
	$H_2$	$N_2$	CO	$CH_4$	$CO_2$	[-]	$MJ/Nm^3$
Before catalytic reforming	20.40	6.94	30.78	13.47	28.28	0.66	11.85
600	32.27	3.03	25.02	10.31	29.05	1.29	11.38
700	48.42	1.64	20.77	3.23	25.29	2.33	10.08
800	51.12	0.98	26.03	0.70	20.37	1.96	10.08
900	50.07	1.01	33.31	0.03	14.84	1.50	10.60

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยเรื่องผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ สามารถสรุปผลการทดลองได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 สรุปผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการ และส่วนที่ 2 ผลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่

5.1.1 สรุปผลของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al, Ni-Mo-Al และ NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการช่วยเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทน คือ Ni/Al เนื่องจากมีร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนที่สูงถึงร้อยละ 80 และ 95 สำหรับรีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ตามลำดับ และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทน คือ 700 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จะมีค่า H<sub>2</sub>/CO ratio ที่สูงถึง 6

5.1.2 สรุปผลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ก่อนและหลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา

แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ก่อนผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยามีค่าความร้อนที่สูงประมาณ 11 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ให้ความร้อนได้ แต่ยังคงไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีในอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณภาพที่ต่ำ ซึ่งพิจารณาจากจากค่า H<sub>2</sub>/CO ratio ของแก๊สสังเคราะห์ที่มีเพียง

0.66 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่จึงมีความจำเป็น เพื่อที่จะช่วยเพิ่มคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยามีค่าความร้อนประมาณ 10-11 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร และคุณภาพที่ดีขึ้น โดยมีค่า  $H_2/CO$  ratio ที่สูงที่สุดประมาณ 2.33 ซึ่งเป็นผลจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส ทำให้แก๊สสังเคราะห์หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยานี้ น่าจะสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตสารเคมีสำคัญในอุตสาหกรรมได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าองค์ประกอบของชีวมวลมีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้เช่นเดียวกัน จึงควรมีการศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลชนิดอื่น ๆ ด้วย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษากระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจจะต่ำเกินไปสำหรับกระบวนการนี้ จึงควรมีการศึกษากระบวนการแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งหากต้องการใช้อุณหภูมิในส่วนผลิตแก๊สที่สูงขึ้น จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิของส่วนเผาไหม้สูงกว่า 850 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำได้เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิของเตาเผาสูงกว่านี้จะส่งผลให้เกิดการหลอมของเตา ทำให้เกิดการอุดตันภายในท่อได้ จึงควรมีการปรับแต่งเตาเผาของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ เช่น เพิ่มความสูงของเตาเผาเพื่อช่วยเพิ่มระยะเวลาของวัสดุเบดในเตาเผาให้นานขึ้น ก่อนที่วัสดุเบดจะเข้าสู่ส่วนผลิตแก๊ส

เนื่องจากอุณหภูมิของแก๊สสังเคราะห์ที่ออกมาจากส่วนเตาผลิตแก๊สมีอุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ทำให้ในการรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาจำเป็นต้องมีการให้พลังงานแก่ระบบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในส่วนรีฟอร์มเมอร์ที่ได้ติดตั้งเพิ่มทำให้ต้องสูญเสียพลังงานไปกับส่วนนี้ จึงควรมีการศึกษารีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ ที่อาจช่วยลดอุณหภูมิที่ต้องใช้ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงลงได้ ซึ่งสามารถช่วยลดพลังงานที่ต้องใช้ลง

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

รติ แสงบุญ. การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชี้เลี้ยงในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ศิวพรรณ มหาสุภาพ. ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จากชีวมวลในเบดนิ่งสองชั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

### ภาษาอังกฤษ

Adolfo, E., Luna, C., and Iriarte, E. Carbon dioxide reforming of methane over a metal modified Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. Applied Catalysts A: General 343 (2008): 10-15

Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, UK : Elsevier, 2010.

Diego, L., Ortiz, M., Adanez, J., Garcia, F., and Labiano, F. Synthesis gas generation by chemical-looping reforming in batch fluidized bed reactor using Ni-based oxygen carriers. Chemical Engineering Journal 144 (2008): 289-298

Effendi, A., et al. Steam reforming of a clean model biogas over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in fluidized- and fixed-bed reactors. Catalysis Today 77 (2002): 181-189

Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., and Cabrita, I. The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. Fuel 82 (2003): 835-842

Frontera, P., et al. Catalytic dry-reforming on Ni-zeolite supported catalyst. Catalysis Today 179 (2012): 52-60

Goransson, K., Soderlind, U., He, J., and Zhang, W. Review of syngas production via biomass DFBGs. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011): 482-492

- Goransson, K., Soderlind, U., and Zhang, W. Experimental test on novel dual fluidised bed biomass gasifier for synthetic fuel production. Fuel 90 (2011): 1340-1349
- Hamel, S., Hasselbach, H., Weil, S., and Krumm, W. Autothermal two-stage gasification of low-density waste-derived fuels. Energy 32 (2007): 95-107
- Hao, Z., Zhu, Q., Lei, Z., and Li, H. CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> reforming over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aerogel catalysts in a fluidized bed reactor. Powder Technology 182 (2008): 474-479
- Higman, C. and Burgt, M. Gasification, USA : Elsevier Science, 2003.
- Huang, T., Huang, W., Huang, J., and Ji, P. Methane reforming reaction with carbon dioxide over SBA-15 supported Ni-Mo bimetallic catalysts. Fuel Processing Technology 92 (2011): 1868-1875
- Maluf, S. and Assaf, E. Ni catalysts with Mo promoter for methane steam reforming. Fuel 88 (2009): 1547-1553
- Quaak, P., Knoef, H., and Stassen, H. Energy from Biomass A review of Combustion and Gasification Technologies, USA : The International Bank for Reconstruction and Development, 1999.
- Saw, W., McKinnon, H., Gilmour, I., and Pang, S. Production of hydrogen-rich syngas from steam gasification of blend of biosolids and wood using a dual fluidised bed gasifier. Fuel 93 (2012): 473-478
- Xu, G., Murakami, T., Suda, T., Matsuzuwa, Y., and Tani, H. The Superior Technical Choice for Dual Fluidized Bed Gasification. Ind. Eng. Chem. Res. 45 (2006): 2281-2286
- Xu, G., Murakami, T., Suda, T., Matsuzaw, Y., and Tani, H. Two-stage dual fluidized bed gasification: Its conception and application to biomass. Fuel Processing Technology 90 (2009): 137-144
- Zhang, Y., Li, B., Li, H., and Liu, H. Thermodynamic evaluation of biomass gasification with air in autothermal gasifiers. Thermochimica Acta 519 (2011): 65-71



ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวล

## 1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis): ASTM D3172

## 1.1 ความชื้น (moisture): ASTM D3173

วิธีการทดลอง

1) อบครุชชีเบิ้ลในเตาอบ (oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นลงในเคสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบิ้ล

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบิ้ล ประมาณ 1 กรัม

3) อบครุชชีเบิ้ลพร้อมตัวอย่างในเตาอบโดยไม่ต้องปิดฝา ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นลงในเคสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบิ้ลพร้อมตัวอย่าง

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100 - 100(W_1 - W_2) / W$$

เมื่อ  $M$  = ร้อยละของความชื้น

$W_1$  = น้ำหนักของครุชชีเบิ้ลที่มีตัวอย่างหลังผ่านการอบ (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักของครุชชีเบิ้ล (กรัม)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

## 1.2 ปริมาณสารระเหย (volatile matter): ASTM D3175

วิธีการทดลอง

1) เผาครุชชีเบิลพร้อมฝานในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำครุชชีเบิลพร้อมฝานออกจากเตา ทำให้เย็นลงในเดสิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาน บันทึกผล

2) ชั่งตัวอย่างแห้งใส่ในครุชชีเบิลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝานให้เรียบร้อย

3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (tubular furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

4) นำครุชชีเบิลไปไว้บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

5) นำครุชชีเบิลลงไปที่กึ่งกลางเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที

6) นำครุชชีเบิลออกมาปล่อยให้เย็นลง แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W] - M$$

เมื่อ  $V$  = ร้อยละของสารระเหย

$W_5$  = น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

$W_6$  = น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

$M$  = ร้อยละความชื้น

**1.3 เถ้า (ash): ASTM D3174**

วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบิ้ลในเตาเผา (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นลงในเคสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบิ้ลและบันทึกผล
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งใส่ครุชชีเบิ้ล ประมาณ 1 กรัม
- 3) นำไปเผาบนตะเกียงบนเซนจนควันระเหยหมด
- 4) ใส่ครุชชีเบิ้ลในเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่
- 5) นำครุชชีเบิ้ลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็นด้วยอากาศ แล้วนำไปใส่เคสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W$$

เมื่อ  $A$  = ร้อยละของถ้ำ

$W_3$  = น้ำหนักของครุชชีเบิ้ลที่มีถ้ำ (กรัม)

$W_4$  = น้ำหนักของครุชชีเบิ้ล (กรัม)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

#### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - A - V - M$$

เมื่อ  $A$  = ร้อยละของถ้ำ

$V$  = ร้อยละของสารระเหย

$M$  = ร้อยละของความชื้น

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC - 2014 Gas Chromatograph (GC) ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า stationary phase และแก๊สพา (carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นภาพโครมาโทแกรม (chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (recorder)

โดยแก๊สโครมาโทกราฟีมีส่วนประกอบต่างๆดังนี้

1. แก๊สพา (carrier gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (flow controller)
3. ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (injector port)
4. คอลัมน์ (column)
5. เครื่องตรวจวัด (detector)
6. เครื่องบันทึก (recorder)

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1. แก๊สพา (carrier gas)

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติเป็นแก๊สเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูง และราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

## 2. คอลัมน์ (column)

คอลัมน์ คือ ส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคทาง GC เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้น ออกจากกันเป็นส่วน ๆ ดังนั้น โครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์มาก

## 3. เครื่องตรวจวัด (detector)

เครื่องตรวจวัด คือ เครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใด ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะสามารถให้สัญญาณกับสารต่าง ๆ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงาน

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- มีสภาพความไวสูง (high sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (selectivity)
- ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณในช่วงความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง
- มีเสถียรภาพ (stability) และความเที่ยง (reproducibility)

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ เทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD

### ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาจากแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่าน

ขดลวด (filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในเครื่องตรวจวัด และจะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

## ภาคผนวก ก

## การคำนวณ

## 1. การหาอัตราการป้อนไอน้ำ

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน (S/C ratio) = อัตราการป้อนไอน้ำ / อัตราการป้อนชีวมวล

ตัวอย่างการคำนวณ หาอัตราการป้อนไอน้ำให้มีสัดส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

จากข้อมูล: อัตราการป้อนชีวมวล 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ร้อยละของคาร์บอนในชีวมวล คือ 43.14

อัตราการป้อนไอน้ำ = สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน x อัตราการป้อนคาร์บอนในชีวมวล

$$= 1 \times ((3000 \text{ กรัมต่อชั่วโมง} \times 0.4314) / 12 \text{ กรัมต่อโมล})$$

$$= 107.85 \text{ โมลต่อชั่วโมง}$$

เปลี่ยนให้อยู่ในหน่วยลิตรต่อนาที

$$= (107.85 \text{ โมลต่อชั่วโมง} \times 18 \text{ กรัมต่อโมล} \times 1 \text{ ชั่วโมง})$$

$$= 1.94 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

## 2. การหาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส (high heating value, HHV)

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$HHV(MJ / Nm^3) = \frac{[12.75(\%H_2) + 12.63(\%CO) + 39.82(\%CH_4)]}{100}$$



ตัวอย่างการคำนวณ หาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันในเตาแก๊สไฟเออร์แบบเบดคู่หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ด้วยสภาวะการดำเนินงานที่อุณหภูมิของแกซีฟิเคชัน 500 - 600 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์รีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส	ร้อยละโดยปริมาตร
ไฮโดรเจน	48.42
ไนโตรเจน	1.64
คาร์บอนมอนอกไซด์	20.77
มีเทน	3.23
คาร์บอนไดออกไซด์	25.29

$$\begin{aligned} \text{ค่าความร้อน} &= \frac{[12.75(48.42) + 12.63(20.77) + 39.82(3.23)]}{100} \\ &= 10.08 \text{ เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

### 3. การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนของมีเทน (%CH<sub>4</sub> conversion)

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\%CH_4 \text{ conversion} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100$$

เมื่อ  $V_1$  = ร้อยละ โดยปริมาตรเริ่มต้นของมีเทน

$V_2$  = ร้อยละ โดยปริมาตรสุดท้ายของมีเทน

ตัวอย่างการคำนวณ หาค่าร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อุณหภูมิของรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 700 องศาเซลเซียส

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	ร้อยละโดยปริมาตร	
	เริ่มต้น	สุดท้าย
H <sub>2</sub>	32.20	54.50
CO	18.88	8.98
CH <sub>4</sub>	14.44	0.55
CO <sub>2</sub>	29.85	33.45

$$\begin{aligned}
 \%CH_4 \text{ conversion} &= \frac{14.44 - 0.55}{14.44} \times 100 \\
 &= 96.16
 \end{aligned}$$

## ภาคผนวก ง

## ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ง 1 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	34.36	35.16	34.76
CO	50.78	50.15	50.46
CH <sub>4</sub>	2.29	2.13	2.21
CO <sub>2</sub>	8.33	8.31	8.32
%CH <sub>4</sub> conversion	80.30	81.19	80.74

ตาราง ง 2 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 800 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	35.77	35.45	35.61
CO	54.41	54.92	54.66
CH <sub>4</sub>	0.25	0.22	0.24
CO <sub>2</sub>	6.05	5.90	5.98
%CH <sub>4</sub> conversion	97.80	98.07	97.94

ตาราง ง 3 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 900 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	41.30	38.99	40.15
CO	48.64	50.14	49.39
CH <sub>4</sub>	0.05	0.04	0.05
CO <sub>2</sub>	8.82	8.79	8.80
%CH <sub>4</sub> conversion	99.55	99.64	99.59

ตาราง ง 4 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	29.48	28.06	28.77
CO	33.28	32.87	33.08
CH <sub>4</sub>	16.12	15.72	15.92
CO <sub>2</sub>	19.03	20.75	19.89
%CH <sub>4</sub> conversion	8.07	8.49	8.28

ตาราง ง 5 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 800 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	32.05	31.89	31.97
CO	41.34	41.73	41.54
CH <sub>4</sub>	8.55	8.25	8.40
CO <sub>2</sub>	18.33	16.60	17.47
%CH <sub>4</sub> conversion	40.88	37.25	39.07

ตาราง ง 6 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 900 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	38.54	38.68	38.61
CO	48.68	48.68	48.68
CH <sub>4</sub>	2.42	2.17	2.29
CO <sub>2</sub>	11.17	10.86	11.02
%CH <sub>4</sub> conversion	80.66	82.35	81.51

ตาราง ง 7 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	28.30	28.48	28.39
CO	30.97	31.11	31.04
CH <sub>4</sub>	13.71	13.47	13.59
CO <sub>2</sub>	26.20	26.43	26.32
%CH <sub>4</sub> conversion	8.55	11.62	10.08

ตาราง ง 8 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 800 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	35.89	36.95	36.42
CO	43.11	44.74	43.93
CH <sub>4</sub>	5.37	3.84	4.60
CO <sub>2</sub>	16.53	14.38	15.45
%CH <sub>4</sub> conversion	58.40	71.34	64.87

ตาราง ง 9 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 900 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	41.80	41.99	41.89
CO	49.33	49.32	49.33
CH <sub>4</sub>	0.04	0.05	0.05
CO <sub>2</sub>	8.33	8.73	8.53
%CH <sub>4</sub> conversion	99.62	99.51	99.57

ตาราง ง 10 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	53.44	54.50	53.97
CO	9.02	8.98	9.00
CH <sub>4</sub>	0.53	0.55	0.54
CO <sub>2</sub>	34.33	33.45	33.89
%CH <sub>4</sub> conversion	94.97	94.21	94.59

ตาราง ง 11 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ที่ 800 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	58.66	59.77	59.21
CO	15.11	14.76	14.94
CH <sub>4</sub>	0.09	0.09	0.09
CO <sub>2</sub>	30.13	28.16	29.15
%CH <sub>4</sub> conversion	99.00	99.00	99.00

ตาราง ง 12 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ที่ 900 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	55.43	56.08	55.75
CO	14.77	14.47	14.62
CH <sub>4</sub>	0.00	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	29.51	29.52	29.51
%CH <sub>4</sub> conversion	99.99	99.99	99.99



ตาราง ง 13 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	32.32	31.59	31.96
CO	23.35	23.16	23.26
CH <sub>4</sub>	13.93	13.59	13.76
CO <sub>2</sub>	29.13	29.07	29.10
%CH <sub>4</sub> conversion	11.36	8.54	9.95

ตาราง ง 14 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 800 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	34.93	35.35	35.14
CO	17.93	18.21	18.07
CH <sub>4</sub>	12.57	12.42	12.49
CO <sub>2</sub>	32.05	32.24	32.14
%CH <sub>4</sub> conversion	12.18	16.97	14.58

ตาราง ง 15 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 900 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	37.90	34.98	36.44
CO	20.22	19.94	20.08
CH <sub>4</sub>	11.62	11.44	11.53
CO <sub>2</sub>	29.34	36.01	32.68
%CH <sub>4</sub> conversion	14.06	18.75	16.41

ตาราง ง 16 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 700 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	47.81	47.99	47.90
CO	12.54	12.63	12.59
CH <sub>4</sub>	7.02	7.16	7.09
CO <sub>2</sub>	32.57	32.04	32.31
%CH <sub>4</sub> conversion	41.30	40.49	40.90

ตาราง ง 17 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 800 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	48.43	48.41	48.42
CO	17.55	17.57	17.56
CH <sub>4</sub>	3.54	3.61	3.58
CO <sub>2</sub>	28.45	29.40	28.92
%CH <sub>4</sub> conversion	67.28	68.10	67.69

ตาราง ง 18 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาของมีเทนด้วยไอน้ำ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก อุณหภูมิรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ 900 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์ แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
H <sub>2</sub>	51.67	51.83	51.75
CO	22.97	22.81	22.89
CH <sub>4</sub>	0.01	0.01	0.01
CO <sub>2</sub>	25.71	23.90	24.81
%CH <sub>4</sub> conversion	99.90	99.88	99.89

ตาราง ง 19 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 0

ชนิดของผลิตภัณฑ์แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)
H <sub>2</sub>	11.42
N <sub>2</sub>	6.18
CO	36.67
CH <sub>4</sub>	10.58
CO <sub>2</sub>	32.73

ตาราง ง 20 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 0.5

ชนิดของผลิตภัณฑ์แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)
H <sub>2</sub>	15.56
N <sub>2</sub>	5.89
CO	32.15
CH <sub>4</sub>	12.24
CO <sub>2</sub>	31.49

ตาราง ง 21 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1

ชนิดของผลิตภัณฑ์แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)
H <sub>2</sub>	20.40
N <sub>2</sub>	6.94
CO	30.78
CH <sub>4</sub>	13.47
CO <sub>2</sub>	28.28

ตาราง ง 22 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากชีลื้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1.5

ชนิดของผลิตภัณฑ์แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)
H <sub>2</sub>	15.78
N <sub>2</sub>	6.12
CO	32.37
CH <sub>4</sub>	13.33
CO <sub>2</sub>	29.00

ตาราง ง 23 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เลื่อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1 อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)
H <sub>2</sub>	32.27
N <sub>2</sub>	3.03
CO	25.02
CH <sub>4</sub>	10.31
CO <sub>2</sub>	29.05

ตาราง ง 24 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากขี้เลื่อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1 อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 700 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)
H <sub>2</sub>	48.42
N <sub>2</sub>	1.64
CO	20.77
CH <sub>4</sub>	3.23
CO <sub>2</sub>	25.29

ตาราง ง 25 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1 อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)
H <sub>2</sub>	51.12
N <sub>2</sub>	0.98
CO	26.03
CH <sub>4</sub>	0.70
CO <sub>2</sub>	20.37

ตาราง ง 26 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ หลังผ่านรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1 อุณหภูมิส่วนเผาไหม้ 800-850 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชัน 500-600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนรีฟอร์มมิงเชิงเร่งปฏิกิริยา 900 องศาเซลเซียส

ชนิดของผลิตภัณฑ์แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร)
H <sub>2</sub>	50.07
N <sub>2</sub>	1.01
CO	33.31
CH <sub>4</sub>	0.03
CO <sub>2</sub>	14.84

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุกฤษฎ์ ภูเวชกุล เกิดเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี  
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
พระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา  
เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2553