

ผลเชิงเร่งปฏิบัติการของชาร์ตไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล

นางสาวกชนิภา มณีวรรณ

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.

CATALYTIC EFFECT OF CHAR ON HYDROGASIFICATION OF  
BIOMASS DERIVED VOLATILE

Miss Kodchanipha Maneewan

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

ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ตไฮโดรแกซีฟิเคชัน  
ของสารระเหยจากชีวมวล

โดย

นางสาวกชนิภา มณีวรรณ

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชดธारा

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.แก้วดี พงษ์พานิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชดธारा)

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

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

กชนิภา มณีวรรณ : ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล. (CATALYTIC EFFECT OF CHAR ON HYDROGASIFICATION OF BIOMASS DERIVED VOLATILE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ประพันธ์ คุณชลาภา, 113 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ทำให้ได้อัตราส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์เป็นมีเทนเพิ่มขึ้น จากการทดสอบผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ พบว่า ชาร์สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของชาร์ ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยและปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ทำให้มีเทนเพิ่มสูงขึ้น ในการศึกษาผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 600 เป็น 800 องศาเซลเซียส ปริมาณการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์ลดลง ภาวะในการเตรียมชาร์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเตรียมชาร์ด้วยไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็วที่ภาวะอุณหภูมิต่างๆ พบว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าชาร์จากไพโรไลซิสแบบเร็ว และยังให้ค่าความร้อน (HHV) ของผลิตภัณฑ์แก๊สสูงสุดที่ 14.76 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างชาร์ต่อชีวมวล พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างชาร์ต่อชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 2 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และพบว่าองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าเมื่อมีปริมาณชาร์เพิ่มขึ้น สามารถช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวชาร์ ปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชัน

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

# # 5372558423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: BIOMASS HYDROGASIFICATION / CHAR / CATALYTIC EFFECT /  
PYROLYSIS

KODCHANIPHA MANEEWAN : CATALYTIC EFFECT OF CHAR ON  
HYDROGASIFICATION OF BIOMASS DERIVED VOLATILE. ADVISOR : ASST.  
PROF.PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D.,113 pp.

In this research, catalytic effect of char on hydrogasification of biomass derived volatile was studied. Experiments were carried out in a fixed bed reactor. Results showed that an increase in H<sub>2</sub> flow rate gave more CO hydrogenation, forwarding CH<sub>4</sub> formation. Char was found to have a catalytic effect on tar cracking, resulting in higher carbon conversion into gaseous products. Moreover, volatile hydrogenation and CO hydrogenation were also affected by the presence of char causing more CH<sub>4</sub> production. An influence of hydrogasification temperature was also examined in a range of 600 to 800 °C. At a higher hydrogasification temperature, gaseous products were increased while tar was decreased. An explanation for this is that tar cracking is progressive at higher temperature since it is endothermic. In addition, condition of char preparation is an important factor affecting char properties. Char prepared from slow pyrolysis at 750 °C gave higher carbon conversion and gaseous products (CO, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>) more than the one from fast pyrolysis. Nevertheless high heating value of the gaseous products produced by slow- pyrolyzed char at 750 °C was found to have the highest heating value about 14.76 MJ/Nm<sup>3</sup>. Effect of char to biomass ratio showed that increase of this ratio from 0.5 to 2 gave higher carbon conversion and the composition of CO, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in the produced gas was also increased. This can emphasize that char acts as a catalyst for tar cracking, hydrogasification and CO hydrogenation.

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

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

Academic Year : 2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คุชฌารา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษา และวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวิไล พุกษาทร ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. สุชาติดา บุตรนาค กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกในการ ใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ใน ภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลัง ที่ให้ คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงกำลังใจ และการสนับสนุนด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## 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 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พลังงานชีวมวล.....	5
2.2 ชีวมวล.....	7
2.3 เทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวล.....	16
2.4 กระบวนการไพโรไลซิส.....	17
2.5 กระบวนการแกซิฟิเคชัน.....	23

	หน้า
2.6 กระบวนการไฮโดรแกซีฟิเคชัน.....	31
2.7 กระบวนการแกซีฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์.....	33
2.8 ชาร์.....	34
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	43
3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	43
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	43
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	53
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกระถินยักษ์.....	56
4.2 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์.....	57
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติของชาร์ด้วยเทคนิค SEM และ BET.....	58
4.4 ผลของไฮโดรเจน.....	66
4.5 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลในกระบวนการไฮโดรแกซีฟิเคชันของ สารละลายจากชีวมวล.....	68
4.6 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรแกซีฟิเคชัน.....	71
4.7 ผลของตัวแปรในการเตรียมชาร์(วิธีการไพโรไลซิส (แบบช้า,แบบเร็ว), อุณหภูมิ)....	73
4.8 ผลของอัตราส่วนระหว่างชาร์ต่อชีวมวลในกระบวนการไฮโดรแกซีฟิเคชัน.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	83



5.1 สรุปผลการทดลอง.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก.....	91
ภาคผนวก ข.....	94
ภาคผนวก ค.....	96
ภาคผนวก ง.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	รายละเอียดพื้นที่ปลูก ผลผลิตพืชหลัก และไม้ยางพารา ปี 2551 และ 2552 .....	6
2.2	ข้อแตกต่างชีวมวลกับเชื้อเพลิงฟอสซิล .....	10
2.3	องค์ประกอบธาตุของชีวมวลทั่วไปจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ.....	13
3.1	ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	48
4.1	สัญลักษณ์ของชาร์ที่เตรียมขึ้นจากสภาวะการเตรียมที่ต่างกัน.....	55
4.2	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของกระถินยักษ์.....	56
4.3	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของกระถินยักษ์.....	56
4.4	ผลการวิเคราะห์สมบัติของชาร์ด้วยเทคนิค SEM.....	59
4.5	ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้ ด้วยเทคนิค Brunauer, Emmett ,Teller (BET).....	64
4.6	ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวของชาร์จากการไพโรไลซิสกระถินยักษ์ที่อุณหภูมิต่างกันก่อนใช้และหลังใช้ ด้วยเทคนิค Brunauer, Emmett, Teller (BET).....	65
ค1	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard).....	98
ค2	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง.....	98
ค3	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง.....	100
ง1	ข้อมูลการทดลองผลของปริมาณไฮโดรเจนที่ภาวะอุณหภูมิในส่วนของไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์.....	103

ตารางที่	หน้า
ง2	ข้อมูลการทดลองผลของปริมาณไฮโดรเจนที่ภาวะอุณหภูมิในส่วนของไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส ต่อปริมาณ องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์.....103
ง3	ข้อมูลการทดลองผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของซาร์จากชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของ คาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน..... 104
ง4	ข้อมูลการทดลองผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของซาร์จากชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบ ของแก๊สผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน..... 105
ง5	ข้อมูลการทดลองผลของตัวแปรในการเตรียมซาร์ วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว และ อุณหภูมิ ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน.. 106
ง6	ข้อมูลการทดลองผลของตัวแปรในการเตรียมซาร์ วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว และ อุณหภูมิ ต่อปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน..... 108
ง7	ข้อมูลการทดลองผลของอัตราส่วนของชีวมวลต่อซาร์ ต่อร้อยละการเปลี่ยน ของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน..... 111
ง8	ข้อมูลการทดลองผลของอัตราส่วนของชีวมวลต่อซาร์ ต่อปริมาณองค์ประกอบของ แก๊สผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน..... 111
ง9	ข้อมูลการทดลองผลของค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชัน.....112

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วัฏจักรคาร์บอน .....	7
2.2	ค่าความร้อนของชีวมวล (ค่าความร้อนขั้นต่ำ (LHV) และ ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV)) ที่เปลี่ยนไปเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น.....	14
2.3	ต้นกระถินยักษ์.....	15
2.4	กระบวนการไพโรไลซิส .....	17
2.5	การสูญเสียมวลขององค์ประกอบชีวมวลแต่ละชนิดในการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	21
2.6	การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและการนำไปใช้ประโยชน์.....	23
2.7	ขั้นตอนของแกซีฟิเคชันและผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ.....	24
2.8	กระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล.....	26
2.9	กระบวนการไฮโดรแกซีฟิเคชัน.....	32
2.10	การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล.....	36
2.11	การเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา .....	38
3.1	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับเตรียมซาร์โดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า.....	44
3.2	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับเตรียมซาร์โดยวิธีไพโรไลซิสแบบเร็ว.....	45
3.3	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองขั้นตอน (two-stage fixed bed reactor).....	47
3.4	แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองขั้นตอน.....	47
3.5	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography).....	48

รูปที่	หน้า
3.6	ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ และการทดสอบต่างๆ.....51
4.1	พฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์จากการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคTG-DTA..... 57
4.2	ผลของปริมาณไฮโดรเจนต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ อนุกรมในส่วนของไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอนุกรมไฮโดรแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส..... 66
4.3	ผลของไฮโดรเจนต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชัน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อนุกรมในส่วนของไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และ อนุกรมไฮโดรแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส..... 67
4.4	ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของซาร์จากชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็น ผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อนุกรม 700 องศาเซลเซียส ซาร์เตรียมโดย วิธีไพโรไลซิสแบบช้าที่อนุกรม 750 องศาเซลเซียส..... 69
4.5	ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของซาร์จากชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สใน ไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อนุกรม 700 องศาเซลเซียส ซาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า ที่อนุกรม 750 องศาเซลเซียส..... 69
4.6	ผลของไฮโดรเจนและเชิงเร่งปฏิกิริยาของซาร์จากชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบ ของผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซิฟิเคชันที่อนุกรม 700 องศาเซลเซียส ซาร์เตรียมโดย วิธีไพโรไลซิสแบบช้า ที่อนุกรม 750 องศาเซลเซียส.....70
4.7	ผลของอนุกรมไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อนุกรม 600 – 800 องศาเซลเซียส ซาร์เตรียมโดย วิธีไพโรไลซิสแบบช้าที่อนุกรม 750 องศาเซลเซียส..... 72

รูปที่	หน้า
4.8	ผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน 600 – 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิส แบบช้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส..... 73
4.9	ผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน เป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดย วิธีไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส..... 74
4.10	ผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ต่อบริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส.....75
4.11	ผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ต่อดีค่าความร้อน (High Heating Value, HHV)ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ในไฮโดรแกซิฟิเคชันอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส.....77
4.12	ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ใน กระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์จากการไพโรไลซิส แบบช้า..... 78
4.13	ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อบริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สใน ไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า..... 79
4.14	ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อดีค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) ของ ผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า.....80

รูปที่	หน้า
4.15 ผลของอัตราส่วนของชาร์ตต่อชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์ตเตรียมโดยวิธีไพโรไลซิส แบบช้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส.....	81
4.16 ผลของอัตราส่วนของชาร์ตต่อชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สใน ไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์ตเตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส.....	82

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

พลังงานนับเป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญในการตอบสนองความต้องการของมนุษย์มา ยาวนานนับตั้งแต่ในอดีต ปัจจุบันรวมถึงอนาคต ทั้งในภาคครัวเรือนที่อยู่อาศัย ภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรมและภาคธุรกิจพลังงานที่ใช้ในภาคส่วนต่างๆ ส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมด ไป อาทิ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน แก๊สธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงานหนึ่งที่มีความสำคัญใน อุตสาหกรรม อาทิเช่น โรงงานผลิตไฟฟ้า เป็นต้น และการใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงยังมี ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมลพิษที่ปลดปล่อยระหว่างการใช้งานต่ำกว่าเชื้อเพลิง พอสซิลชนิดอื่น แต่แหล่งแก๊สธรรมชาตินั้นมีอยู่อย่างจำกัด จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการหา พลังงานทางเลือกเพื่อมาทดแทนชีวมวลเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมเนื่องจากชีวมวล เป็นเชื้อเพลิงที่หาได้ง่ายภายในประเทศ โดยได้มาจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและ อุตสาหกรรมบางชนิดนอกจากนี้การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงยังช่วยลดปริมาณแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะเรือนกระจก การศึกษา กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแก๊สธรรมชาติสังเคราะห์จึงได้รับความนิยมมากขึ้น

ไฮโดรแกซิฟิเคชัน (hydrogasification) เป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งเป็นแก๊ส เชื้อเพลิงภายใต้บรรยากาศที่มีไฮโดรเจนร่วมด้วยผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จะมีองค์ประกอบของมีเทน เพิ่มขึ้น และมีค่าความร้อนสูงเทียบเท่าแก๊สธรรมชาติ จึงเรียกผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการ นี้ว่าแก๊สธรรมชาติสังเคราะห์ (synthetic natural gas) จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ กระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน พบว่ากระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชันส่วนใหญ่จะดำเนินการที่ภาวะ ความดันและอุณหภูมิสูง ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เชื้อเพลิงที่นำมาศึกษาส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงจากถ่านหิน ปฏิกริยาหลักที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกริยา ระหว่างคาร์บอนในสถานะของแข็งกับไฮโดรเจน ซึ่งเป็นปฏิกริยาวิวิธพันธุ์ แต่งานวิจัยนี้เลือกใช้



ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของชีวมวลเป็นสารระเหยร้อยละ 60-70 จึงคาดว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชันของชีวมวลจะแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมานอกจากนี้การทำปฏิกิริยาที่ความดันบรรยากาศจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้ และเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าชาร์จากชีวมวลมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีความเป็นรูพรุนมีพื้นที่ผิวสูง หาได้ง่าย และมีโลหะอัลคาไลและโลหะอัลคาไลเอิร์ทเป็นองค์ประกอบ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล โดยจะศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากไพโรไลซิสที่ภาวะต่างๆต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล และผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊ส

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากไพโรไลซิสที่ภาวะต่างๆต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล
- 1.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากการไพโรไลซิสที่ภาวะต่างๆต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวลและผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของมีเทน และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 เตรียมเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน
- 1.4.3 เตรียมกระถินยักษ์โดยทำการบดย่อยและคัดขนาดกระถินยักษ์ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการและนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 6 ชั่วโมง
- 1.4.4 วิเคราะห์สมบัติของไม้กระถินยักษ์
- การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis ASTM D3172, D3173, D3174, D3175) ได้แก่ ความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว
  - การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน โดยเครื่อง CHN Analyzer
  - ศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนของไม้กระถินยักษ์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer (TG/DTA)
- 1.4.5 ศึกษาการเตรียมชาร์จากชีวมวลด้วยกระบวนการไพโรไลซิส
- 1.4.6 ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากการไพโรไลซิสที่ภาวะต่างๆต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวลโดยศึกษาผลของปัจจัย ได้แก่
- วิธีการไพโรไลซิส : ไพโรไลซิสแบบช้า, ไพโรไลซิสแบบเร็ว
  - อุณหภูมิในการไพโรไลซิส : 650, 750, 850 องศาเซลเซียส
- 1.4.7 ศึกษาผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส : 600, 700, 800 องศาเซลเซียส
- 1.4.8 วิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)
- 1.4.9 วิเคราะห์สมบัติของชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิส
- วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

- วิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค  $N_2$  adsorption-desorption measurement

#### 1.4.10 สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แก๊สสังเคราะห์จากไฮโดรแกซิฟิเคชันของชีวมวลมีความเข้มข้นของมีเทนและค่าความร้อนสูงขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พลังงานชีวมวล

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยนำไปใช้ในกิจกรรมเพื่อพัฒนาและสร้างความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ รวมทั้งใช้ในชีวิตรประจำวัน ซึ่งต้องพึ่งการแปรรูปพลังงาน เช่น การแปลงไม้ฟืนเป็นถ่าน หรือการแปลงพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล(เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านหิน) ให้เป็นไฟฟ้า หรือการแปลงไฟฟ้าเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ เช่น เครื่องปรับอากาศ เตารอบ เป็นต้น

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องหาพลังงานทางเลือกมาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่เดิม ซึ่งหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่สำคัญได้แก่ พลังงานจากชีวมวล ซึ่งเป็นพลังงานตามธรรมชาติจากมวลของพืชและสัตว์ ได้แก่ พืชเกษตรกรรม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เศษไม้ ขยะมูลฝอย มูลสัตว์ เป็นต้น โดยใช้กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง การผลิตก๊าซ การหมัก และการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช

การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนได้รับความนิยมจากหลายประเทศทั่วโลก ชีวมวลเป็นสิ่งที่พบได้โดยง่าย มีราคาถูก และยังเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ได้ประสิทธิภาพที่สูง และส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยลง ชีวมวลจึงเป็นพลังงานทางเลือกอีกทางที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามชีวมวลที่ถูกใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆในประเทศที่กำลังพัฒนานั้นพบว่ายังคงมีประสิทธิภาพต่ำ ส่งผลให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้ว ชีวมวลก็ยิ่งถือว่าส่งผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่า ชีวมวลเมื่อนำไปเผาจะมีการปล่อยแก๊สประเภทไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่น้อยมาก อีกทั้งยังมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบที่ต่ำ ทำให้การปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ต่ำไปด้วย ในกรณี

ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ที่ชีวมวลปล่อยออกมา ก็จะถูกดูดซับโดยชีวมวลชนิดใหม่ที่ต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในการเจริญเติบโต

### 2.1.1 ศักยภาพของพลังงานชีวมวลในประเทศไทย

ประเทศไทยนับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตทางการเกษตรคือ วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว กากอ้อย กาก ใย และทะลายปาล์ม เป็นต้น

ปริมาณชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดพื้นที่ปลูก ผลผลิตพืชหลัก และไม้ยางพารา ปี 2551 และ 2552 (หน่วย: พันไร่ / พันตัน)

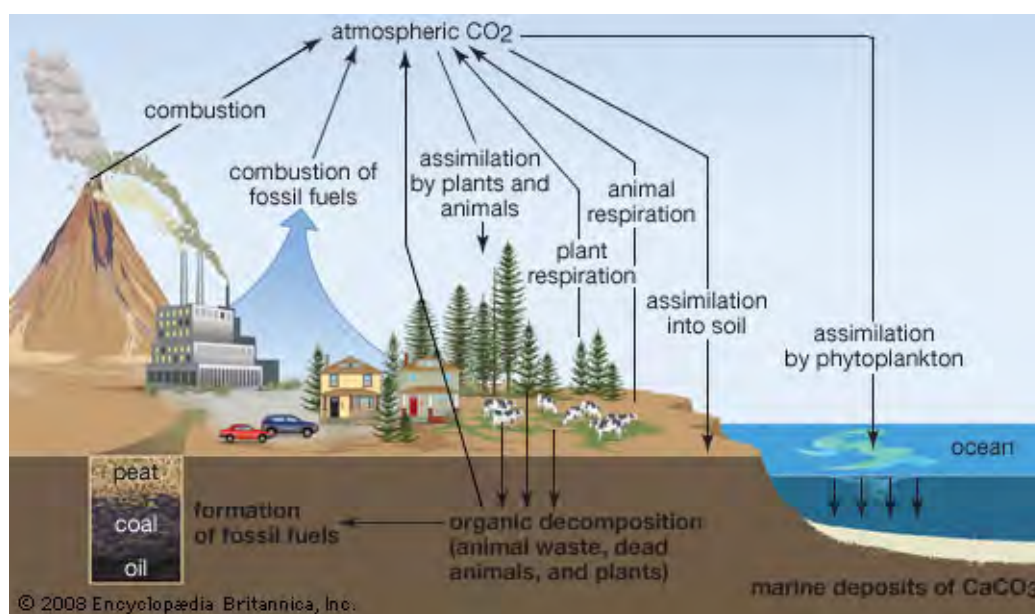
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดพื้นที่ปลูก ผลผลิตพืชหลัก และไม้ยางพารา ปี 2551 และ 2552 (หน่วย: พันไร่ / พันตัน)

ชนิด	2551		2552	
	พื้นที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต	พื้นที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต
อ้อย	6,588	73,502	6,023	66,816
ข้าว	66,772	31,651	68,519	31,508
ข้าวโพด	6,518	4,249	6,905	4,616
ปาล์มน้ำมัน	2,885	9,271	3,189	8,162
มันสำปะหลัง	7,397	25,156	8,584	30,088
ไม้ยางพารา	11,372	3,166	11,600	3,090

(ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552 : ออนไลน์)

## 2.2 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติซึ่งอาจเป็นสิ่งมีชีวิตหรือส่วนประกอบของธรรมชาติรวมทั้งสิ่งเหลือทิ้งจากสิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างทดแทนได้ โดยชีวมวลอาจจะเรียกว่าเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพดกอบและกะลามะพร้าว เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงพืชในกลุ่มของไม้โตเร็วที่ปลูกเพื่อใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงานโดยตรง เช่น กระถินยักษ์ กระถินณรงค์ กระถินเทพา กระถินลูกผสมและยูคาลิปตัส เป็นต้น ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้นพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้เป็นแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืชการนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงจึงได้พลังงานดังกล่าวออกมาและปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนสู่บรรยากาศวนเวียนเป็นวัฏจักร แสดงดังรูปที่ 2.1 (Laohalidanond, 2007)



รูปที่ 2.1 วัฏจักรคาร์บอน (carbon cycle)

(ที่มา : Encyclopaedia Britannica, 2008 : online)

### 2.2.1 แหล่งกำเนิดชีวมวล

ชีวมวลที่มีความสำคัญชนิดหนึ่ง คือ ไม้ โดยต้นไม้อาจจะถูกตัดจากในป่า และนำไปตัดเป็นท่อนเพื่อให้มีขนาดที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง แต่ไม้ อาจจะมีมูลค่าสูงเกินกว่าที่จะเอาไปใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งช่างไม้ อาจจะนำไม้เหล่านี้ไปใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งกากของเหลือจากไม้ที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว เช่น เปลือกไม้ ขี้เลื่อย และชิ้นส่วนของไม้ที่แตกหักไม่สามารถนำไปใช้ได้ เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงมากกว่า

ของเสียจากพืชการเกษตรสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ฟาง ข้าว กากมะพร้าว เมล็ดกาแฟ ต้นข้าวโพด หรือกากอ้อย การนำของเสียเหล่านี้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถลดปัญหาของเสียที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

### 2.2.2 ข้อแตกต่างระหว่างชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิล

2.2.2.1 ไม่มีปริมาณสำรอง ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นปีต่อปี จึงยากที่จะคาดการณ์ปริมาณที่เกิดขึ้นในระยะยาวได้ ซึ่งแตกต่างกับถ่านหินและแก๊สธรรมชาติ เพราะมีปริมาณสำรองที่เห็นชัดเจน

2.2.2.2 อุปทานไม่แน่นอน ชีวมวลจะเกิดขึ้นตามฤดูกาลเช่นเดียวกับผลผลิตทางการเกษตร ดังนั้นช่วงฤดูเก็บเกี่ยวจะมีปริมาณมาก นอกฤดูเก็บเกี่ยวจะมีปริมาณน้อยลงทำให้ราคาสูงขึ้น และมีลักษณะเป็นวงจรเช่นนี้ทุกปี นอกจากนี้ฝนตกไม่ต้องตามฤดูกาลมีส่วนทำให้ปริมาณชีวมวลในปีนั้นๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วย และยังขึ้นกับราคาของผลผลิตในปีที่แล้ว เช่น ถ้าราคาหัวมันสำปะหลังมีราคาตกต่ำ ชาวไร่ส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนไปปลูกข้าวโพดแทนในปีหน้า ดังนั้นปริมาณชั่งข้าวโพดในปีหน้าจะเพิ่มขึ้นแต่แห่งมันสำปะหลังจะลดลง

2.2.2.3 อุปสงค์ของอุตสาหกรรมอื่นๆ (Demand) ถ้ามีอุตสาหกรรมอื่นๆ ร่วมบริโภคด้วย แต่อุปทานคงที่ มีผลทำให้ชีวมวลมีราคาสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อุตสาหกรรมที่บริโภคชีวมวลมีดังนี้

ด้านเกษตรกรรม เช่น การนำแกลบปูลู่โรงเลี้ยงไก่ การเพาะเห็ดจากขี้เลื่อย ฟางข้าวและทะลายปาล์ม ซึ่งหลังจากใช้แล้วชีวมวลเหล่านี้ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้อีก เช่น การทำปุ๋ย

โรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันโรงงานที่ใช้ความร้อนในกระบวนการผลิตนิยมใช้ ชีวมวลทดแทนน้ำมันเตามากขึ้น เช่น โรงงานผลิตถุงมือยาง โรงงาน น้ำมันพืช และโรงงานแปรงมัน เป็นต้น เพราะน้ำมันเตามีราคาแพงกว่าชีวมวลหลายเท่าตัว

อุตสาหกรรมเผาอิฐมอญ เป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่ทำกันภายในครอบครัวเมื่อหลายร้อยปีมาแล้ว ใช้แกลบหรือเศษไม้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาอิฐ ปัจจุบันนี้มีผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทดแทนหลายชนิด เช่น อิฐบล็อก อิฐมวลเบา และผนังสำเร็จรูป ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานความร้อนในกระบวนการผลิต และใช้แรงงานน้อยในการติดตั้งเมื่อเทียบกับอิฐมอญ

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลัก และเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้นำชีวมวลมาทดแทนส่วนหนึ่ง เช่น แกลบ กะลาปาล์ม และขี้เลื่อย เนื่องจากมีราคาถูกกว่า อย่างไรก็ตามชีวมวลในปัจจุบันมีราคาสูงขึ้นมาก ซึ่งถ้ามีราคาสูงเท่ากับถ่านหินแล้ว คาดว่าโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ คงลดปริมาณการบริโภคลง หรืออาจจะยกเลิกการใช้ชีวมวลซึ่งขึ้นกับนโยบายผู้บริหาร

2.2.2.4 วิธีการซื้อขาย ส่วนใหญ่ใช้เงินสดเช่นเดียวกับการซื้อสินค้าเกษตร ไม่มีวงเงินเครดิตเหมือนสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป

2.2.2.5 การขนส่ง เนื่องจากชีวมวลจะมีน้ำหนักเบา ค่าใช้จ่ายในการขนส่งแต่ละครั้งสูงกว่าเชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น น้ำมันเตา 12,000 ลิตร 10,000 บาท/เที่ยว คิดเป็นค่าใช้จ่าย 20บาท/กิกะจูล แต่แกลบ 10 ตัน เสียค่าใช้จ่ายถึง 74 บาท/กิกะจูล เป็นต้น หรือในกรณีการขนส่งแก่เกษตรกรชาติทางท่อ เสียค่าใช้จ่ายเพียง 20 บาท/ล้านปีทิวหรือ 20 บาท/กิกะจูล



จากที่ได้กล่าวมาสามารถสรุปข้อแตกต่างระหว่างชีวมวลกับเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ดังตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** ข้อแตกต่างระหว่างชีวมวลกับเชื้อเพลิงฟอสซิล (ที่มา : ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549)

	เชื้อเพลิงฟอสซิล	ชีวมวล
1. ปริมาณสำรอง	มี	ไม่มี
2. อุปทาน	สม่ำเสมอ	แปรผันตามฤดูกาล
3. การผันแปรของราคา	คาดการณ์ไม่ได้	คาดการณ์ได้
4. เครดิตการซื้อขาย	มี	ไม่มี
5. ต้นทุนขนส่ง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง

### 2.2.3 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) ความเหมาะสมของชีวมวลในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะพิจารณาจากสัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ที่อยู่ในชีวมวล

### 2.2.3.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content)

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

ถ้าพิจารณาปริมาณความชื้นจากการวัดแบบเปียก (wet basis) น้ำหนักของน้ำจะคิดจากผลรวมของร้อยละน้ำหนักของน้ำหนักของน้ำ เถ้า และ วัตถุแห้ง แต่เมื่อต้องการคำนวณปริมาณความชื้นจากการวัดแบบแห้ง (dry basis) น้ำหนักของน้ำจะคิดจากผลรวมของร้อยละน้ำหนักของเถ้าและวัตถุแห้ง และสุดท้ายเมื่อต้องการคำนวณปริมาณความชื้นจากการวัดแบบแห้งที่ไม่มีเถ้า (dry-and-ash-free basis) น้ำหนักของน้ำจะคิดจากผลรวมร้อยละน้ำหนักของชีวมวลที่แห้งเท่านั้น เนื่องจากความชื้นของชีวมวลมีผลต่อคุณภาพของชีวมวลในการใช้เป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นการวัดพื้นฐานที่ใช้จึงควรจะต้องกล่าวถึงทุกครั้ง

### 2.2.3.2 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 องค์ประกอบของเถ้าจะมีผลต่อการเผาไหม้

และแกซีพีเคชันที่อุณหภูมิสูง เช่น ถ้าเกิดการหลอม (slagging ash) ในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการเผาไหม้ หรือแกซีพีเคชันทำให้ปัญหาในระบบแบบเบดของไหล (fluidized-bed systems)

### 2.2.3.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter content)

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

### 2.2.3.4 องค์ประกอบธาตุ (Elemental composition)

สารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในชีวมวลส่วนใหญ่จะประกอบด้วยธาตุต่างๆ เช่น คาร์บอนออกซิเจนและไฮโดรเจน ชีวมวลบางชนิดจะมีไนโตรเจนและซัลเฟอร์อยู่ด้วย แสดงในตารางที่ 2.3

### 2.2.3.5 ค่าความร้อน (Heating value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ได้รับจากเชื้อเพลิงนั้น ในสถานะแวดล้อมมาตรฐาน ประกอบด้วยอุณหภูมิสถานะของน้ำ (ของเหลวหรือไอ) และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาสันดาป (คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ เป็นต้น) สถานะมาตรฐานเหล่านี้ นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางการวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวล

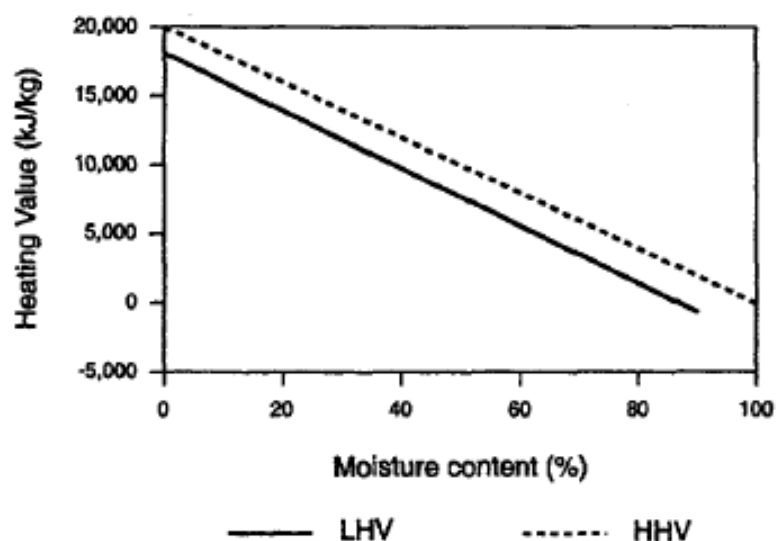
พลังงานทางเคมีที่ได้จากเชื้อเพลิงจะพิจารณาจากค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (จุล) ต่อน้ำหนักของเชื้อเพลิง (kg) ในการคำนวณค่าพลังงานนี้จะต้องอ้างอิงจากสถานะมาตรฐาน ซึ่งอาจแตกต่างกัน ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดี คือ ค่าความร้อนขั้นต่ำ (Lower heating value, LHV) และค่าความร้อนขั้นสูง (Higher heating value, HHV) สำหรับค่าความร้อนขั้นต่ำ (LHV) จะอ้างอิงจากสถานะของน้ำเป็นไอ และจะอ้างอิงจากสถานะของน้ำที่เป็นของเหลวสำหรับค่าความร้อนขั้นสูง (HHV)

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบธาตุของชีวมวลทั่วไปจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ที่มา : BTG, 2530)

ธาตุ	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (%wt) (ข้อมูลพื้นฐานแบบแห้งไม่มีเถ้า)
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

ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบที่เป็นน้ำอยู่ด้วย ซึ่งจะถูกลดปล่อยออกมาในรูปของไอน้ำเมื่อชีวมวลได้รับความร้อน ทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีของชีวมวลถูกใช้ไปในการเปลี่ยนสถานะของน้ำให้เป็นไอน้ำ 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)

#### 2.2.3.6 ปริมาตรความหนาแน่น (Bulk density)

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

## 2.2.4 กระถินยักษ์

กระถินยักษ์ *leucaena lencocephala* (lam.) de wit แสดงดังรูปที่ 2.3 เป็นไม้ขนาดกลาง ไม่ผลัดใบลำต้นเรียบสีน้ำตาลแดงกระพี้มีสีเหลืองอ่อนเกือบขาวแก่นมีสีน้ำตาลแดง เปลือกบาง เนื้อไม้เป็นเส้นตรงเลื่อยได้ ตบแต่งได้ง่ายเนื้อไม้ใช้ในการก่อสร้างได้ดีมีรอบตัดพินสั้น อายุ 5 - 6 ปีก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดีในการทำเสา รั้วพิน ถ่าน จนถึงการทำเยื่อกระดาษจากการทดลองในต่างประเทศพบว่า ถ่านที่ทำจากไม้กระถินยักษ์ให้ความร้อนสูงประมาณ 7,000 แคลอรีต่อกิโลกรัมเทียบเท่าประมาณ 70 % ของน้ำมันเตา ถ้าพิจารณาในแง่ของการปลูกป่าเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้วจะเห็นได้ว่าการปลูกป่ากระถินยักษ์จะช่วยแก้ปัญหาพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงที่กำลังขาดแคลนในอนาคตได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ใบกระถินยักษ์สามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้อีกด้วย เนื่องจากมีคุณค่าทางอาหารสูงแต่หากให้เป็นอาหารสัตว์ติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้สัตว์ขนร่วงและหยุดเจริญเติบโตได้เนื่องจากมีสาร mimosine นอกจากนี้กระถินยักษ์เป็นพืชตระกูลถั่ว จึงสามารถปลูกเพื่อบำรุงดินได้ในต่างประเทศมีรายงานว่าแบคทีเรียในปมรากสามารถตรึงไนโตรเจนได้มากกว่า 5,000 กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 เฮกตาร์ ดังนั้นการปลูกป่ากระถินยักษ์จะช่วยปรับปรุงป่าที่เสื่อมโทรมให้กลับเป็นสภาพป่าที่อุดมสมบูรณ์ได้เพราะกระถินยักษ์เติบโตเร็วมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและช่วยในการปรับปรุงดินและในแง่ของเกษตรกรรมการปลูกพืชระหว่างต้นกระถินยักษ์ก็จะช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีอีกด้วย



รูปที่ 2.3 ต้นกระถินยักษ์ (ที่มา : Meyer, 2007 : online)

## 2.3 เทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวล

เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิมหรืออาจจะกล่าวได้ว่าเปลี่ยนเป็นพลังงานหรือเชื้อเพลิงนั้นสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทหลักๆ คือ

2.3.1 กระบวนการแปลงสภาพเชิงกายภาพ (physical conversion process) ได้แก่

- การอัดแท่ง (densification)
- การคัดแยกเฉพาะส่วน
- การหีบคั้นน้ำมัน (oil extraction)

2.3.2 กระบวนการแปลงสภาพเชิงชีวเคมี (biochemical conversion process) ซึ่งใช้เป็นเชื้อจุลินทรีย์ตัวดำเนินการได้แก่

- กระบวนการหมักย่อยยับอากาศเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ
- กระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตเอทานอล

2.3.3 กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (thermochemical conversion process) ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนนี้สามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆ ได้ 3 กระบวนการ คือ

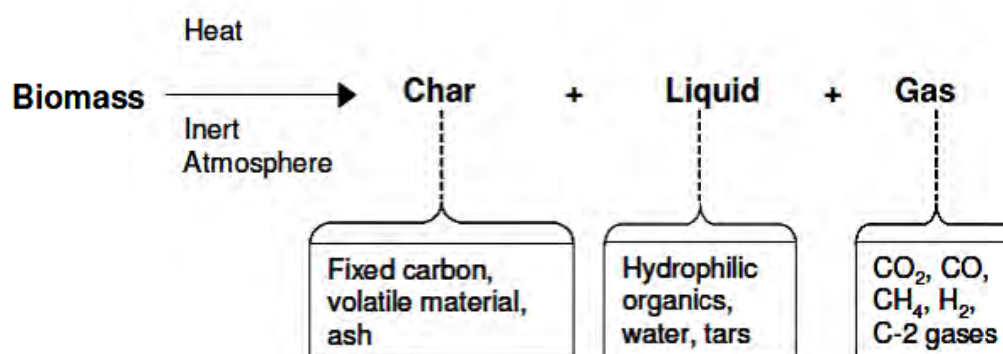
- กระบวนการเผาไหม้ (combustion)
- กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis)
- กระบวนการแกซิฟิเคชัน (gasification)

ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการดำเนินการและวัตถุประสงค์หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการอย่างไรก็ตาม แม้ว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีจะเป็นกระบวนการที่ใช้สภาวะในการดำเนินงานที่รุนแรงน้อยกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน แต่วิธีการนี้ค่อนข้างให้

ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลค่อนข้างมาก จึงทำให้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนมีความน่าสนใจมากกว่าทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่หลากหลายกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี

## 2.4 กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการที่ให้ความร้อนแก่สารใดสารหนึ่งเพื่อย่อยสลายโมเลกุลของสารนั้นให้มีขนาดเล็กลงภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนหรืออากาศ แสดงดังรูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้มีทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และ โดยส่วนที่เป็นของแข็ง เรียกว่า ถ่านชาร์ ซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุถ่านเป็นหลักและมีเถ้าอินทรีย์ผสมอยู่ด้วย ส่วนของเหลวที่ควบแน่นได้ที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า ของเหลวไพโรลิกเนียส หรือน้ำมันไพโรไลซิส ลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำคล้ายน้ำมันดิบ บางครั้งเรียกว่า น้ำมันดิบชีวภาพ (bio-crude oil) กระบวนการไพโรไลซิสสามารถควบคุมให้เกิดผลิตภัณฑ์สถานะใดสถานะหนึ่งมากที่สุดได้ โดยการควบคุมปัจจัยที่สำคัญต่างๆ ของกระบวนการ เช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น



รูปที่ 2.4 กระบวนการไพโรไลซิส (ที่มา : Brownsort, 2009)



กระบวนการทางเคมีกายภาพระหว่างไพโรไลซิสเป็นดังนี้ (Mohan, Pittman, and Steele, 2006)

1. การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปยังชีวมวลเพื่อเพิ่มอุณหภูมิข้างในชีวมวลให้สูงขึ้น
2. การเริ่มเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้นมีการปล่อยไอสารระเหยและเกิดเป็นถ่าน
3. การไหลของสารระเหยร้อนผ่านเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างกัน
4. การควบแน่นของไอสารระเหยโมเลกุลใหญ่บางส่วนในเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่และตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองที่สามารถเปลี่ยนสารระเหยขั้นต้นเป็นน้ำมันดิบ
5. การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองแบบเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเองไปพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้นมีการแข่งขันแย่งสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา
6. การแตกตัวของความร้อนเพิ่มขึ้นมีปฏิกิริยาร่วมเกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแก๊ส ปฏิกิริยาเปลี่ยนโมเลกุลของแข็งเป็นแก๊สด้วยน้ำ ปฏิกิริยาการรวมตัวของสารอนุกรมปฏิกิริยาการไล่น้ำซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาอุณหภูมิและความดัน

## 2.4.1 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการไพโรไลซิส

### 2.4.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่างๆ และชนิดของพืชนั้น สารเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างกันไป โดยในองค์ประกอบหลัก ซึ่งได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เมื่อได้รับความร้อน องค์ประกอบเหล่านี้ของไม้จะถูกย่อยสลายทางความร้อนในวิธีที่แตกต่างกันออกไปและได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายเพื่อให้เข้าใจกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ เราจำเป็นต้องพิจารณาพฤติกรรมของกระบวนการไพโรไลซิสของแต่ละองค์ประกอบหลักของไม้ก่อน

### - การไพโรไลซิสเซลลูโลส

ที่ผ่านมาการศึกษาไพโรไลซิสของเซลลูโลสอย่างกว้างขวาง ปฏิกริยาไพโรไลซิสของเซลลูโลสเป็นแบบดูดความร้อน และพบว่าเมื่อเซลลูโลสได้รับความร้อนถึงที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะเกิดการลดลงของระดับความเป็นพอลิเมอร์ กระบวนการไพโรไลซิสเกิดขึ้นช้าๆ และได้ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ และเศษกากถ่านออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส เซลลูโลสจะเริ่มย่อยสลายทางความร้อนเร็วขึ้น ได้เป็นน้ำมันดินที่ควบแน่นได้ออกมา เหลือแต่กากถ่านไว้ เซลลูโลสเกิดการแตกตัวทางความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ 240 ถึง 350 องศาเซลเซียสได้แอนไฮโดรเซลลูโลส (anhydrocellulose) และ เลโวกลูโคแซน (levoglucosan) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส กระบวนการไพโรไลซิสของเซลลูโลสจะเกิดขึ้นรวดเร็วมากขึ้นไปอีก และที่มากกว่า 500 องศาเซลเซียส สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะเริ่มถูกย่อยสลายทางความร้อนได้เป็นสถานะแก๊ส

### - การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลส

เมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลส ปฏิกริยาไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสเป็นแบบคายความร้อน การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 260 องศาเซลเซียส และเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่ามาก และได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีถ่านชาร์และน้ำมันดินน้อยกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่จะไม่แตกตัวออกเป็นกลุ่มเลโวกลูโคแซนมาก กรดอะซิติกที่ออกมาช่วงไพโรไลซิสของชีวมวลจะช่วยลดกลุ่มอะเซทิล (deacetylation) ของเฮมิเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้อแข็งจะมีไซแลนมากและกลูโคแมนแนน (glucomannan) น้อย ในขณะที่เฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้ออ่อนจะมีไซแลนน้อยและกาแลคโตกลูโคแมนแนนมาก

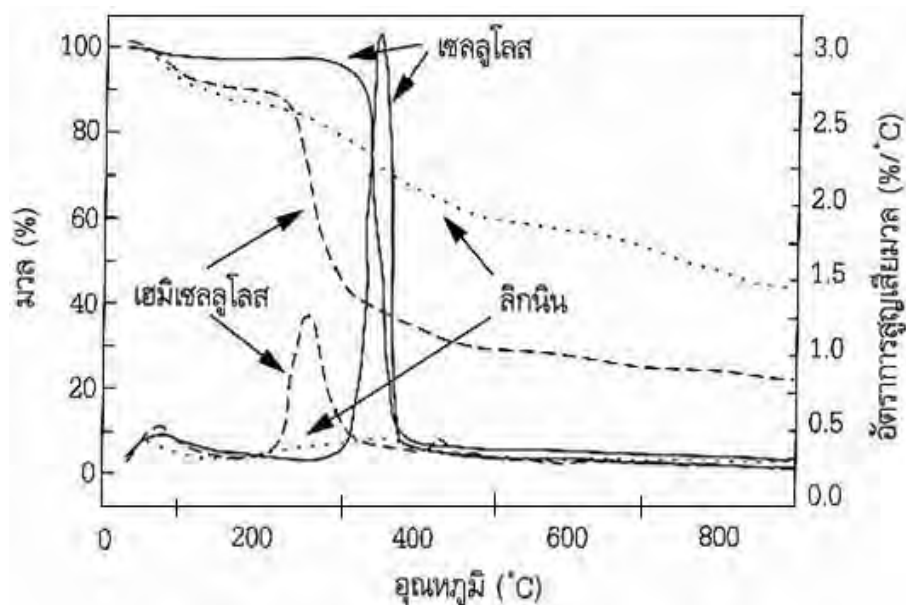
### - การไพโรไลซิสลิกนิน

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของลิกนินขึ้นอยู่กับวิธีการแยกเอาลิกนินออกมาซึ่งอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเริ่มแตกตัวไปบางส่วนได้ การแตกตัวทางความร้อนของลิกนินอิสระ จึงอาจจะแตกต่างจากลิกนินที่อยู่ในเนื้อชีวมวล แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะพฤติกรรมควรจะบ่งชี้ไปในแนวทางที่คล้ายกันได้ ลิกนินถือว่าเป็นองค์ประกอบที่เสถียรที่สุดของชีวมวล แตก

ตัวได้ยากกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และมีช่วงอุณหภูมิที่แตกตัวกว้าง (160-900 องศาเซลเซียส) ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของลิกนินเป็นแบบคายความร้อน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส อัตราการย่อยสลายตัวทางความร้อนของลิกนินจะช้ามาก การแตกตัวของลิกนินจะเกิดขึ้นชัดเจนที่อุณหภูมิระหว่าง 280 และ 500 องศาเซลเซียส โดยอัตราสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 350 ถึง 450 องศาเซลเซียส การแตกตัวของลิกนินจะได้กลุ่มฟินอลออกมา และจะเกิดปริมาณถ่านชาร์มากกว่าเซลลูโลส ที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะมีถ่านชาร์จากลิกนินเกิดขึ้นเกิด 50% โดยมวลตั้งต้น

### - การไพโรไลซิสชีวมวล

พฤติกรรมของชีวมวลระหว่างที่เกิดการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับพฤติกรรมขององค์ประกอบหลักของชีวมวล จากรูปที่ 2.5 แสดงถึงการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง thermogravimetry analyzer (TGA) ขององค์ประกอบของชีวมวล ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสของชีวมวลมาจากการรวมกันแบบเชิงเส้นของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแต่ละองค์ประกอบแยกกัน โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นแหล่งหลักของการเกิดสารระเหยและน้ำมันดิน ในขณะที่ลิกนินเป็นแหล่งหลักของการเกิดถ่านชาร์ ชีวมวลจะสลายตัวออกเป็นผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาต่างๆพร้อมกัน ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจาก การแตกตัวในปฏิกิริยาปฏิกิริยาและจากปฏิกิริยาชั้นสอง



รูปที่ 2.5 การสูญเสียมวลขององค์ประกอบชีวมวลแต่ละชนิดในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆ  
(ที่มา : นคร ทิพยวงศ์, 2552)

#### 2.4.1.2 อุณหภูมิในการไพโรไลซิส

ช่วงอุณหภูมิของการไพโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้น คือ ชั้นแรก ที่อุณหภูมิระหว่าง 200-300 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย และแก๊สจะประกอบด้วยคาร์บอนในรูปออกไซด์ และน้ำเป็นส่วนใหญ่ ชั้นที่สอง ที่อุณหภูมิระหว่าง 300-500 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวปลดปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ชั้นที่สาม ที่อุณหภูมิระหว่าง 500-800 องศาเซลเซียส จะมีการไล่แก๊สออกอีกเป็นครั้งที่สอง พร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของชาร์รวมไปถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

#### 2.4.1.3 อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออก

อย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่วไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า  $10^3$ - $10^5$  องศาเซลเซียสต่อวินาที การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นซาร์ ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ซาร์จำนวนน้อยมาก

## 2.4.2 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

### - ไพโรไลซิสแบบช้า

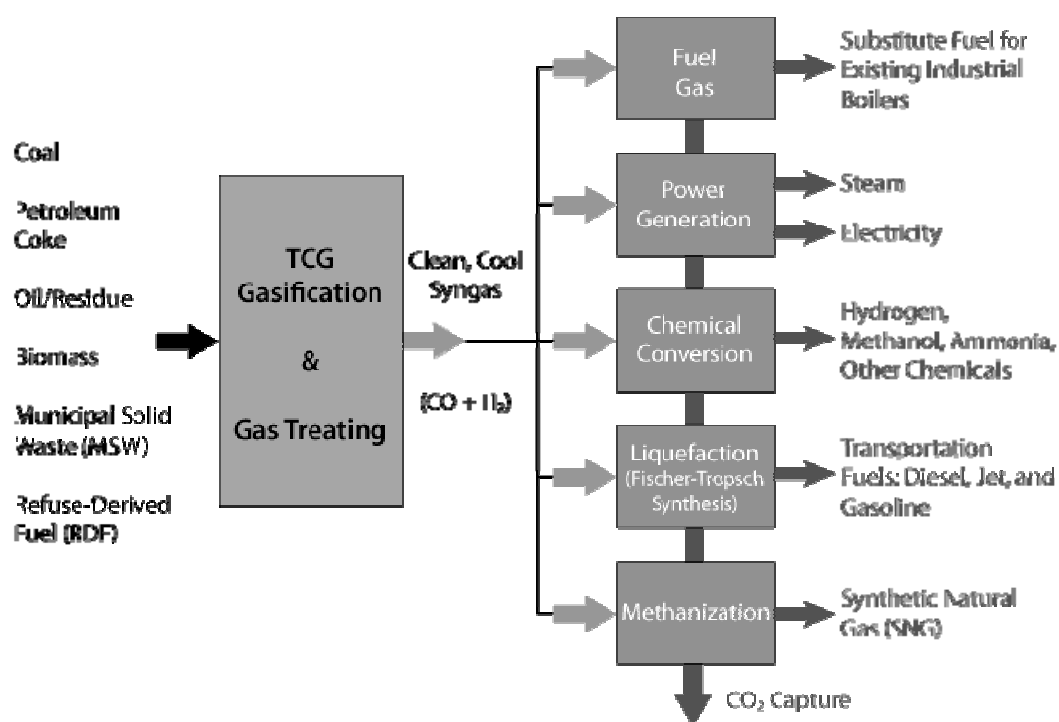
กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าหรือแบบทั่วไป คือกระบวนการที่ใช้ในการทำถ่าน (carbonization) ในกระบวนการไพโรไลซิสทั่วไป ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ไอสารระเหยอยู่ในปฏิกิริยาเป็นเวลานาน 5 ถึง 30 นาที ไม่หลุดออกไปเร็วจึงทำให้องค์ประกอบของไอสารระเหยยังคงเข้าทำปฏิกิริยากันอย่างต่อเนื่อง โดยได้เป็นถ่านและของเหลวออกมา กระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและมีอัตราการให้ความร้อนช้า จะให้ผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะออกมา หากควบคุมกระบวนการให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและมีอัตราการให้ความร้อนช้า จะส่งผลให้เกิดถ่านซาร์มากขึ้น

### - ไพโรไลซิสแบบเร็ว

ไพโรไลซิสแบบเร็วจำเป็นต้องใช้อัตราการให้ความร้อนสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับแบบช้า หากกระบวนการไพโรไลซิสมีอัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น ปริมาณการเกิดสารระเหย แก๊ส และของเหลวจะมากขึ้น กระบวนการลักษณะนี้เรียกว่า ไพโรไลซิสเร็ว (fast pyrolysis) โดยทั่วไปกระบวนการนี้จะได้น้ำมันดิบชีวภาพประมาณ 60-70% โดยน้ำหนัก ถ่านซาร์ 15-25% และแก๊สเบาที่ไม่ควบแน่น 10-20% ขึ้นกับชนิดชีวมวล

## 2.5 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

แก๊สซิฟิเคชัน (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 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ให้ความร้อนได้โดยตรง หรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีสำคัญในอุตสาหกรรมได้ เช่น เมทานอลและเอทานอล เป็นต้น ดังรูปที่ 2.6



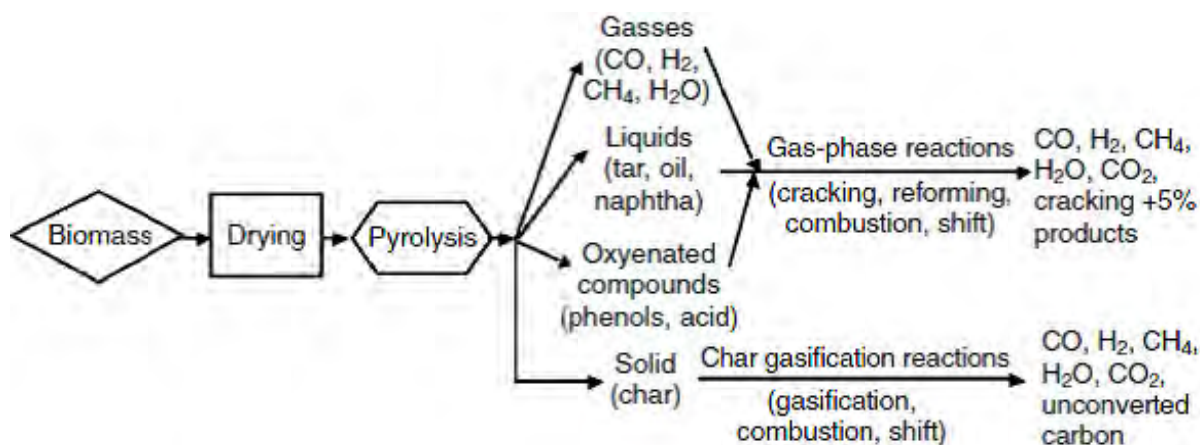
รูปที่ 2.6 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และการนำไปใช้ประโยชน์

(ที่มา : Syngasco, 2012 : online)

### 2.5.1 กระบวนการแกชฟิเคชัน (Gasification process)

กระบวนการแกชฟิเคชันโดยทั่วไปจะเป็นไปตามขั้นตอนต่างๆดังนี้ (แสดงในรูปที่ 2.7)

- การอบแห้ง(Preheating and drying)
- ไพโรไลซิส (Pyrolysis)
- แกชฟิเคชันของชาร์(Char Gasification)
- ปฏิกริยาสันดาป (Combustion)



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนของแกชฟิเคชันและผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ

(ที่มาจาก Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2012)

ชีวมวลที่ได้รับความร้อน (อบแห้ง) จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลผ่านไพโรไลซิส ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส (แก๊ส ของแข็งและของเหลว) จะทำปฏิกิริยากับตัวกลาง (ไอน้ำ อากาศและออกซิเจน) กลายเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการแกชฟิเคชัน พลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการอบแห้ง ไพโรไลซิสและปฏิกิริยาดูดความร้อนอื่นๆ จะได้มาจากปฏิกิริยาสันดาปซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

### 2.5.1.1 การอบแห้ง (Drying)

ชีวมวลเมื่อได้รับความร้อน ความชื้นที่อยู่ในชีวมวลจะถูกขับออกมาในรูปของไอน้ำเพื่อที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีค่าความร้อนที่สูงขึ้น ช่วงอุณหภูมิของการที่ชีวมวลจะถูกอบแห้งในกระบวนการแก๊สไพเคชันจะอยู่ที่ประมาณ 100-200 องศาเซลเซียสสมการที่ (2.1) แสดงปฏิกิริยาการอบแห้งของชีวมวลเมื่อได้รับความร้อน

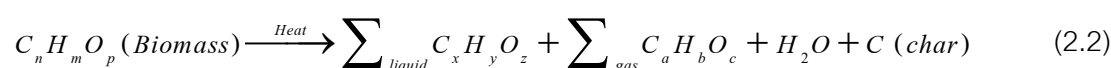
ปฏิกิริยาการอบแห้งของชีวมวล (Drying)



### 2.5.1.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่จะเกิดขึ้นก่อนแก๊สไพเคชัน ชีวมวลจะได้รับความร้อนในภาวะที่ไม่มีอากาศหรือออกซิเจนในช่วงอุณหภูมิที่กำหนดในขั้นต้นของ ไพโรไลซิส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นแก๊สที่ควบแน่นได้ (condensable gases) และของแข็งชาร์ (solid char) แก๊สควบแน่นอาจจะถูกสลายด้วยความร้อนกลายเป็นแก๊สที่ไม่ควบแน่น (non-condensable gases) เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และมีเทน (CH<sub>4</sub>) ของเหลวและชาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 การสลายตัวของแก๊สควบแน่นนี้จะเกิดผ่านปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous reactions) ของแก๊ส และบางส่วนอาจเกิดผ่านปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous reactions) ของแก๊สและของแข็ง ในปฏิกิริยาของแก๊ส ไอของสารควบแน่นจะสลายเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงไม่สามารถควบแน่นได้ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

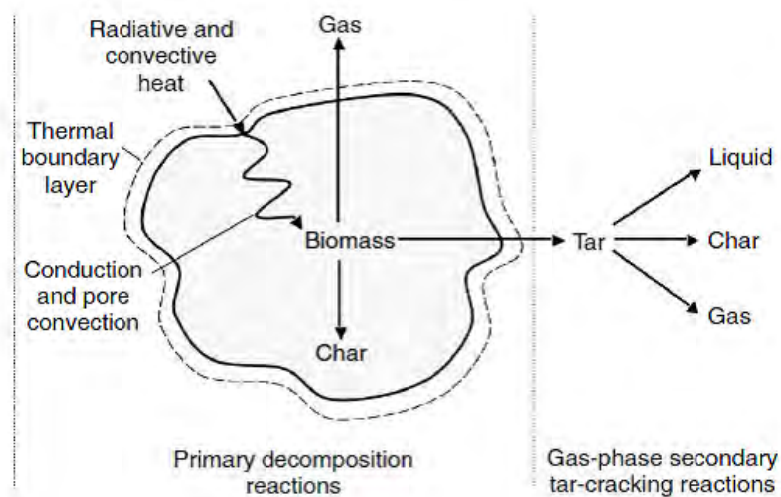
ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของชีวมวล



ไพโรไลซิสของชีวมวลจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว ในกรณีของไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) จะมีผลิตภัณฑ์เป็นของแข็ง



หรือชาร์เป็นหลัก ในขณะที่ไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในรูปของเหลวมากกว่า



รูปที่ 2.8 กระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล

(ที่มา : Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory, 2012)

### 2.5.1.3 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

แก๊สซิฟิเคชันจะเกิดจากการไพโรไลซิส โดยกระบวนการนี้จะเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไฮโดรคาร์บอนในเชื้อเพลิง ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) เช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีอื่นๆระหว่างแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการ แก๊สซิฟิเคชันของชาร์ก็สำคัญเช่นเดียวกัน ชาร์ที่ผลิตได้จากไพโรไลซิสของชีวมวลไม่จำเป็นจะต้องเป็นคาร์บอนบริสุทธิ์ แต่ยังมีไฮโดรคาร์บอนจำนวนหนึ่งที่มีไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) และออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) 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) โดยอุณหภูมิสำหรับช่วงแก๊สซิฟิเคชันนี้จะอยู่ที่ประมาณ 500-900 องศาเซลเซียส

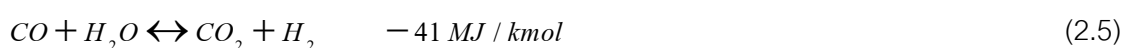
ปฏิกิริยาบาวดาร์ต (Boudouard reaction)



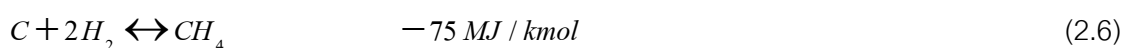
ปฏิกิริยาน้ำและแก๊ส (Water-gas reaction)



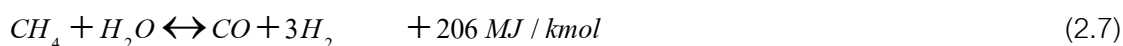
ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift reaction)



ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation)



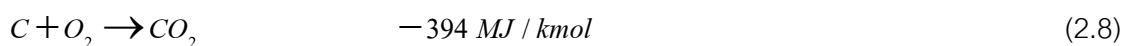
ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming reaction)

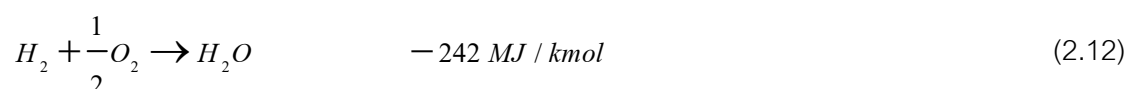
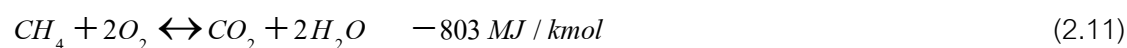
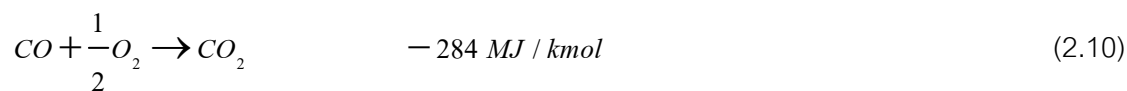
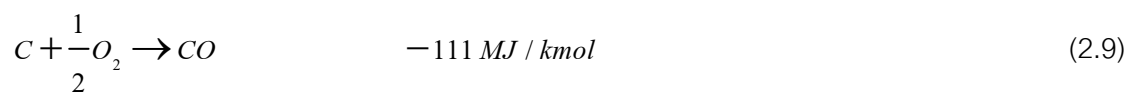


#### 2.5.1.4 ปฏิกิริยาสันดาป (Combustion)

ปฏิกิริยาในกระบวนการแกซีฟิเคชันส่วนใหญ่เป็นแบบดูดความร้อน ในการที่จะทำได้พลังงานความร้อนสำหรับปฏิกิริยาดูดความร้อนต่างๆ เช่น การอบแห้ง ไพโรไลซิสและแกซีฟิเคชัน ดังนั้น ปฏิกิริยาสันดาป ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จึงมีความจำเป็นสำหรับกระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาสันดาป ในกระบวนการแกซีฟิเคชันจะเป็นปฏิกิริยาเผาไหม้ด้วยออกซิเจน ( $O_2$ ) หรืออากาศของซาร์จากไพโรไลซิสของชีวมวลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและแก๊สเผาไหม้ได้บางชนิดที่ได้จากกระบวนการ ดังแสดงในสมการที่ (2.8)-(2.12)

ปฏิกิริยาสันดาป (Combustion or oxidation reactions)





ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนอื่นๆในกระบวนการ อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาสันดาปของซาร์และแก๊สเผาไหม้อื่นๆประมาณ 850-1300 องศาเซลเซียส

## 2.5.2 ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟเคชัน

ในกระบวนการแกซิฟเคชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือการไพโรไลซิสของชีวมวลในขั้นตอนแรกซึ่งจะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไอน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่างๆที่เกิดขึ้นด้วยหลังจากนั้นจะเกิดขั้นตอนที่ 2 คือ กระบวนการแกซิฟเคชัน โดยน้ำมันทาร์และซาร์เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น (Davi, 2005) แสดงดังรูปที่ 2.13 ผลิตรภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการแกซิฟเคชันมี 3 ประเภทคือ

### 2.5.2.1 ผลิตรภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่าถ่านซาร์สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน (ถ่านไร้ควัน) เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่นเป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตรภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

### 2.5.2.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำอีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างส่วนมากพวกวงแหวนแนพทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทิลีนโมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่  $C_5 - C_8$  ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิดโดยแบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วนคือ

- น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิ  $< 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอีน เอทิลเบนซีน ไซลีน
- น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ  $200 - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ได้แก่ ฟีนอล ไพรดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ  $250 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  ได้แก่ ไดเมทิล แนพทาลีน
- น้ำมันแอนทาซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ  $300 - 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  ได้แก่ ฟลูออรีน พีแนพทีน
- พิตช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิ  $> 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภท พวกไขซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

### 2.5.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนหรือการผลิตไฟฟ้า

#### การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง

1. พลังงานความร้อนตรงสามารถนำแก๊สเชื้อเพลิงมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนตรงเนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงสามารถส่งไปตามท่อในระยะใกล้ได้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำความดันเพื่อผลิตไอน้ำและนำไอน้ำมาใช้กับเครื่องจักรกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า

2. ใช้ผลิตไฟฟ้าในเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยนำแก๊สเชื้อเพลิงส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์แก๊สเพื่อผลิตไฟฟ้า
3. นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมีนอกจากการใช้ประโยชน์ดังที่กล่าวในข้างต้นแก๊สเชื้อเพลิงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี เช่น เซลล์เชื้อเพลิงคาร์บอนเหลว (molten carbonate fuel cells) และสารตั้งต้นในการผลิตเมทานอลโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเป็นตัวสังเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง

### 2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการแกซิฟิเคชัน (Factors affecting to gasification process)

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

ความชื้นในชีวมวลช่วยทำให้สัดส่วนของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงแก๊สสูงขึ้น แต่ความชื้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊สและค่าความร้อนที่ได้ลดลง ความชื้นของชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลแหล่งที่มาและการเตรียมสภาพก่อนนำไปผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

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

ขนาดของเชื้อเพลิงจะมีผลกับการเกิดความดันลดภายในเตาปฏิกรณ์ ถ้าเกิดความดันลดภายในเครื่องมากเกินไปจะทำให้ต้องใช้พลังงานในการนำอากาศเข้าและพาแก๊สที่ได้ออกจากเตามาก เครื่องยนต์จำเป็นต้องมีแรงดูดมากพอที่จะเอาชนะความดันตกของระบบทั้งหมดในทางทฤษฎีอากาศควรสัมผัสกับพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงให้มากที่สุด เพื่อให้ได้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น และเกิดกระบวนการได้เร็วยิ่งขึ้น ในเตาผลิตแก๊สขนาดเล็กหากใช้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่เกินไปจะเกิดปัญหาการเผาไหม้ข้ามบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดถ่านลอมตัวเป็นของเหลวเหนียว เพราะถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเทียบกับขนาดเตาปฏิกรณ์ เมื่อเผาไหม้แล้วเชื้อเพลิงจะไหลลงไม่สะดวกและไม่ทันกับการเผาไหม้ที่มีอากาศเท่าเดิม อัตราการป้อนอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิงจึงสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงพอที่จะเหนียวนำไปเกิดการลอมตัวของถ่านได้ จึงควรทำให้เชื้อเพลิงมีขนาดที่พอเหมาะเพื่อทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ดีขึ้น

### 2.5.3.3 การกระจายขนาด (Size Distribution)

เชื้อเพลิงที่ไม่สร้างปัญหาให้กับเตาปฏิกรณ์ต้องมีขนาดที่เท่ากันสม่ำเสมอไม่แตกต่างกันมากนักเพราะหากขนาดแตกต่างกันมากอากาศและแก๊สจะไหลผ่านตามช่องว่างที่เกิดจากเชื้อเพลิงขนาดใหญ่และเล็ก ทำให้บางบริเวณมีการเผาไหม้รุนแรงแต่บางบริเวณเย็นตัวลงและอาจสลับกันในเวลาต่อมาทำให้เกิดการหลอมกันเป็นก้อน (clinker)

### 2.5.3.4 ปริมาตรหนาแน่น (Bulk Density)

ค่าที่แสดงลักษณะการใช้ปริมาตรของเชื้อเพลิงนั้นกล่าวคือเมื่อใส่อนุภาคเชื้อเพลิงปริมาณหนึ่งลงในภาชนะจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคของเชื้อเพลิงเกิดขึ้น ช่องว่างเหล่านี้ก็มีปริมาตรเช่นกัน ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมต่ำลง

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

สารระเหย (Volatile matter) ที่ปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาสามารถควบแน่นได้ที่อุณหภูมิ 100 - 500 องศาเซลเซียสซึ่งจะก่อตัวเป็นทาร์ถ้าเชื้อเพลิงมีสารระเหยมากอาจทำให้เกิดปัญหาได้ เนื่องจากทาร์อาจเกาะฝังตัวบนผนังจึงต้องแยกออกก่อนนำไปใช้งาน

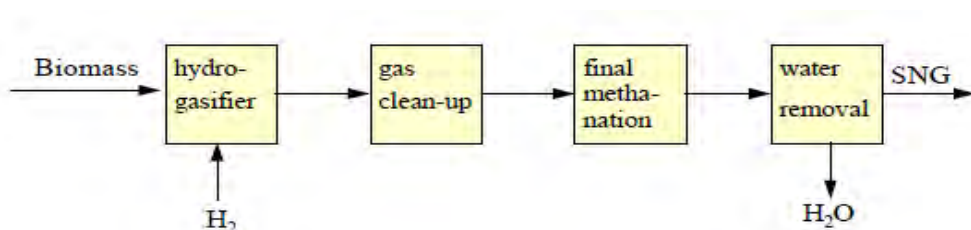
### 2.5.3.6 ี่เถ้า (Ash)

เถ้าเกิดจากแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในเชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนขณะเผาไหม้สัดส่วนของเถ้าในเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการทำงานของเตาปฏิกรณ์ถ้าสัดส่วนเถ้าในเชื้อเพลิงมีค่าสูงก็จะทำให้พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงลดลงและเตาปฏิกรณ์ต้องสำรองเนื้อที่เก็บเถ้ามากขึ้นและหากเถ้าหลอมตัวจะมีปัญหาในการเผาไหม้และการกำจัด

## 2.6 กระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน

กระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน (Hydrogasification) เป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงภายใต้บรรยากาศที่มีไฮโดรเจนร่วมด้วยแสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนโดยตรงแสดงดังสมการที่ (2.13) ซึ่งสามารถให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีองค์ประกอบของมีเทนสูงเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและเกิดซ้ำลงที่อุณหภูมิสูงผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแก๊สมีเทนซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงจึงเป็นแก๊สที่มีความต้องการให้เกิดในการแก๊สซิฟาย

มากแต่ว่าปฏิกิริยานี้เกิดน้อยมากนอกจากจะมีการป้อนไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญของปฏิกิริยาเข้าเพิ่มเติม



รูปที่ 2.9 กระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน (ที่มา: Production of Substitute Natural Gas by biomass hydrogasification,2002)

ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชันแบ่งออกเป็น 2 ปฏิกิริยาได้แก่

### 2.6.1 ปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous reaction)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในรูปของสารระเหยกับไฮโดรเจนผลิตภัณฑ์ที่ได้คือมีเทน ดังสมการที่ 2.14



### 2.6.2 ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous reaction)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนในรูปของแข็งกับไฮโดรเจนผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ มีเทน ดังสมการที่ 2.15



## 2.7 กระบวนการแกซีฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์ (Gasification Processes in the Reactors)

เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน คือ เตาผลิตแก๊ส(Gasifier) โดยลำดับของการเกิดปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันของชีวมวลจะขึ้นอยู่กับประเภทและการออกแบบเตาปฏิกรณ์โดยทั่วไปแล้วเตาปฏิกรณ์หรือเตาผลิตแก๊ส(Gasifier) ที่ใช้ในกระบวนการแกซีฟิเคชันมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภทหลัก คือ เตาปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Moving or fixed-bed reactor) เตาปฏิกรณ์แบบของไหล (Fluidized-bed reactor) และเตาปฏิกรณ์แบบไหลผ่าน (Entrained-flow reactor)ซึ่งเตาผลิตแก๊สแต่ละชนิดยังแบ่งลักษณะของลำดับการเกิดปฏิกิริยาภายในเตาที่ต่างกันตามรูปแบบการไหลของแก๊สและเชื้อเพลิงอีกด้วย

### 2.7.1 เตาปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed or Moving Bed Reactor)

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

### 2.7.2 เตาปฏิกรณ์แบบเบตของไหล (Fluidized-Bed Reactor)

เตาผลิตแก๊สของไหลแบบฟองอากาศ(Bubbling fluidized bed) เชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์จะผสมกันอย่างรวดเร็วภายในเบตของไหล ตัวทำปฏิกิริยา (อากาศออกซิเจน และไอน้ำ) ที่ทำหน้าที่เป็นแก๊สของไหลจะถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทางด้านล่าง เตาผลิตแก๊สแบบเบตของไหลโดยทั่วไปนั้น เชื้อเพลิงของแข็งหลังจากถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์จะสัมผัสกับเบตของแข็งที่ร้อน จากนั้นจะเกิดการอบแห้ง (Drying) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ของเชื้อเพลิงแข็งอย่างรวดเร็วเกิดเป็นชาร์และแก๊สต่างๆ

### 2.7.3 เตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน (Entrained-Flow Reactor)

เตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน (Entrained-flow gasifier) เป็นเตาปฏิกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันแบบผสม (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) เตาปฏิกรณ์แบบนี้นิยมใช้อุณหภูมิที่ 1400 องศาเซลเซียส โดยอนุภาคของแข็งขนาดเล็กของเชื้อเพลิงจะไหลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์พร้อมกับตัวทำปฏิกิริยา แสดงเตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่านทั้ง 2 ชนิด โดย



ชนิดแรก ออกซิเจนที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำปฏิกิริยา จะไหลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทางด้านข้าง และชนิดที่ 2 เชื้อเพลิงและออกซิเจนจะไหลเข้าทางด้านบน ปฏิกิริยาสันดาป(สมการที่ 2.8-2.9) จะเกิดขึ้นทันทีบริเวณที่ออกซิเจนถูกป้อนเข้าไป เชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์พร้อมกับน้ำในรูปของสารละลาย และเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันที่ได้รับพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของชาร์และแก๊สอื่นๆภายในเตาปฏิกรณ์อย่างรวดเร็ว อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์แบบนี้จะสูงกว่าเตาปฏิกรณ์แบบอื่นๆ ส่งผลให้ถ่านเกิดการหลอมตัว และทาร์ที่เกิดขึ้นเกิดการสลายตัวทางความร้อนจนหมด ทำให้มีร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนที่สูง โดยบางครั้งมีการออกแบบเตาผลิตแก๊สแบบไหลผ่าน (Entrained-flow gasifier) เป็นแบบถ่วงวนเนื่องจากต้องการให้ของแข็งผสมให้เข้ากันอย่างต่อเนื่อง

## 2.8 ชาร์ (char)

ชาร์หรือถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการไพโรไลซิสหรือแกซิฟิเคชันของชีวมวล โดยชาร์จะได้ออกมาจากการเผาไหม้ชีวมวลภายใต้บริเวณที่มีอากาศอยู่อย่างเบาบางหรือในกระบวนการแยกสารอินทรีย์ในสถานะที่มีอากาศอยู่น้อยมากเมื่อมีการให้ความร้อนระหว่างกระบวนการจะช่วยกำจัดน้ำมันดินและสารประกอบอื่นๆจากชีวมวลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการได้แก๊สสารประกอบหลักเช่นคาร์บอน (80%) ไฮโดรคาร์บอน (10 -20%) ถ่าน (0.5 -10%) และแร่ธาตุต่างๆเช่นกำมะถันและฟอสฟอรัส

ชาร์สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีกเช่นถ่านกัมมันต์แนฟทาดีน แอนทราซีนและสารประกอบไซยาโนเจน เป็นต้นแต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน (ถ่านไร้ควัน) เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดีเช่นเป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำการเผาอิฐการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรโรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดงเพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

### 2.8.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตชาร์

วัสดุที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตชาร์

- เป็นของเหลือทิ้ง ราคาถูกและหาได้ง่าย
- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง
- มีปริมาณสารระเหยและสารอินทรีย์ต่ำ
- มีคุณสมบัติคงที่ เช่น ไม่สลายตัวเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานาน

วัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบโดยตรงมักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ (หมายถึงสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ) เป็นส่วนใหญ่ สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

- พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชี้เลื่อย ชานอ้อย หรือ ชังข้าวโพด เป็นต้น
- พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ (Lignite) พีท (Peat) เป็นต้น
- ส่วนต่างๆ ของสัตว์ เช่น เลือด กระดูก เป็นต้น

สำหรับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่าน มักเป็นถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์อินทรีย์วัตถุ หรือที่เรียกว่า ถ่านสังเคราะห์ (Artificial char) หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural char)

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตชาร์ พบว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและสารระเหยสูง เช่น ไม้ ลิกนิน มักได้ชาร์ที่มีปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) สูง และความหนาแน่นต่ำ ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว จะได้ชาร์ที่มีปริมาตรของรูพรุนเล็ก (Micropore volume) สูง อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของชาร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น วิธีการผลิต ภาวะที่ใช้ เป็นต้น

### 2.8.2 การผลิตชาร์

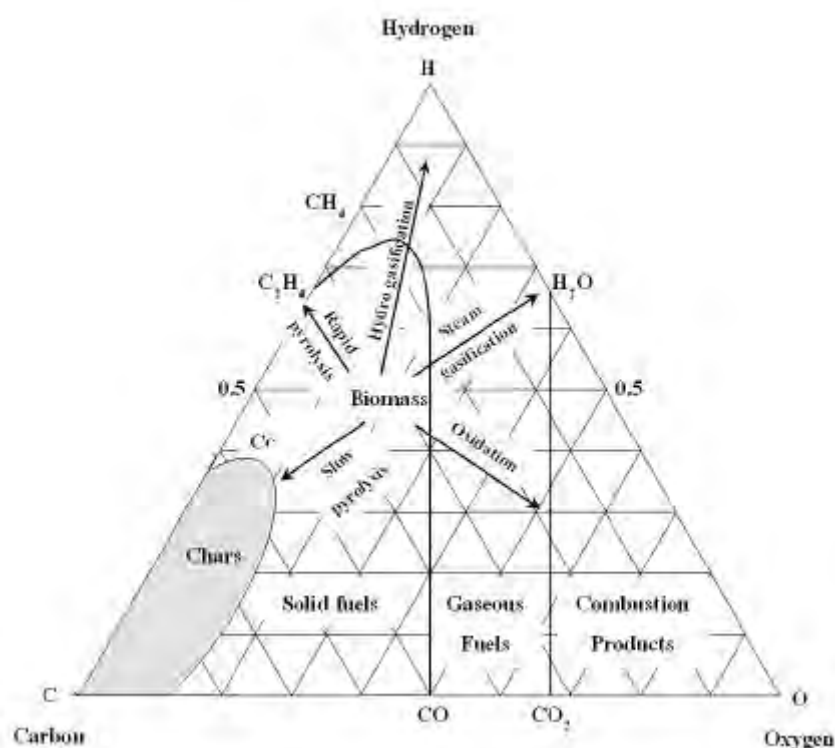
กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (char) ที่เป็นของแข็ง ทาร์ และแก๊ส โดยการเผาในที่อับอากาศ ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อม ที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะที่มี

ออกซิเจนน้อย หรือในที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้ บางส่วนของชาร์และแก๊ส (Kohan and Barkodor, 1979)

กระบวนการแปรรูปโดยความร้อน ได้แก่ ไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ โดยแผนภาพอธิบายกระบวนการเหล่านี้ไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.10

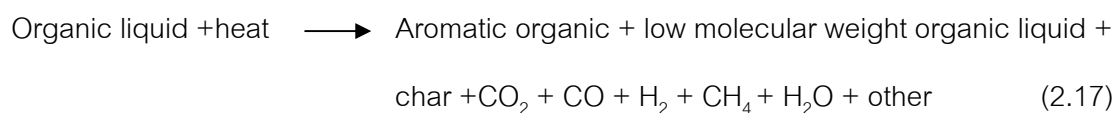
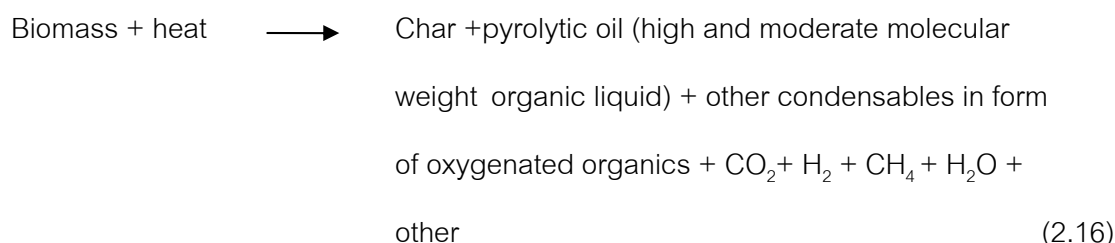
Kohan และ Barkodor (1979) ได้ให้คำนิยามกว้างๆ ของกระบวนการไพโรไลซิส ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีวัตถุประสงค์ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เกิดการสลายตัวทาง ความร้อนโดยมีบริเวณอย่างน้อยหนึ่งบริเวณ ที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนในที่มีออกซิเจน และได้อธิบายถึงความแตกต่างของวิธีการไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ว่า พื้นฐานของ กระบวนการเหล่านี้ คือ ปริมาณอากาศที่ใช้มีส่วนสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิง

ไพโรไลซิสโซนเป็นส่วนที่มีอากาศน้อยกว่าร้อยละ 20 ของอากาศที่ใช้ทางทฤษฎี เผาไหม้ อากาศระหว่างร้อยละ 25-50 เป็นส่วนแก๊สซิฟิเคชัน และส่วนของการเผาไหม้มีอากาศ ตั้งแต่ร้อยละ 100 ขึ้นไป

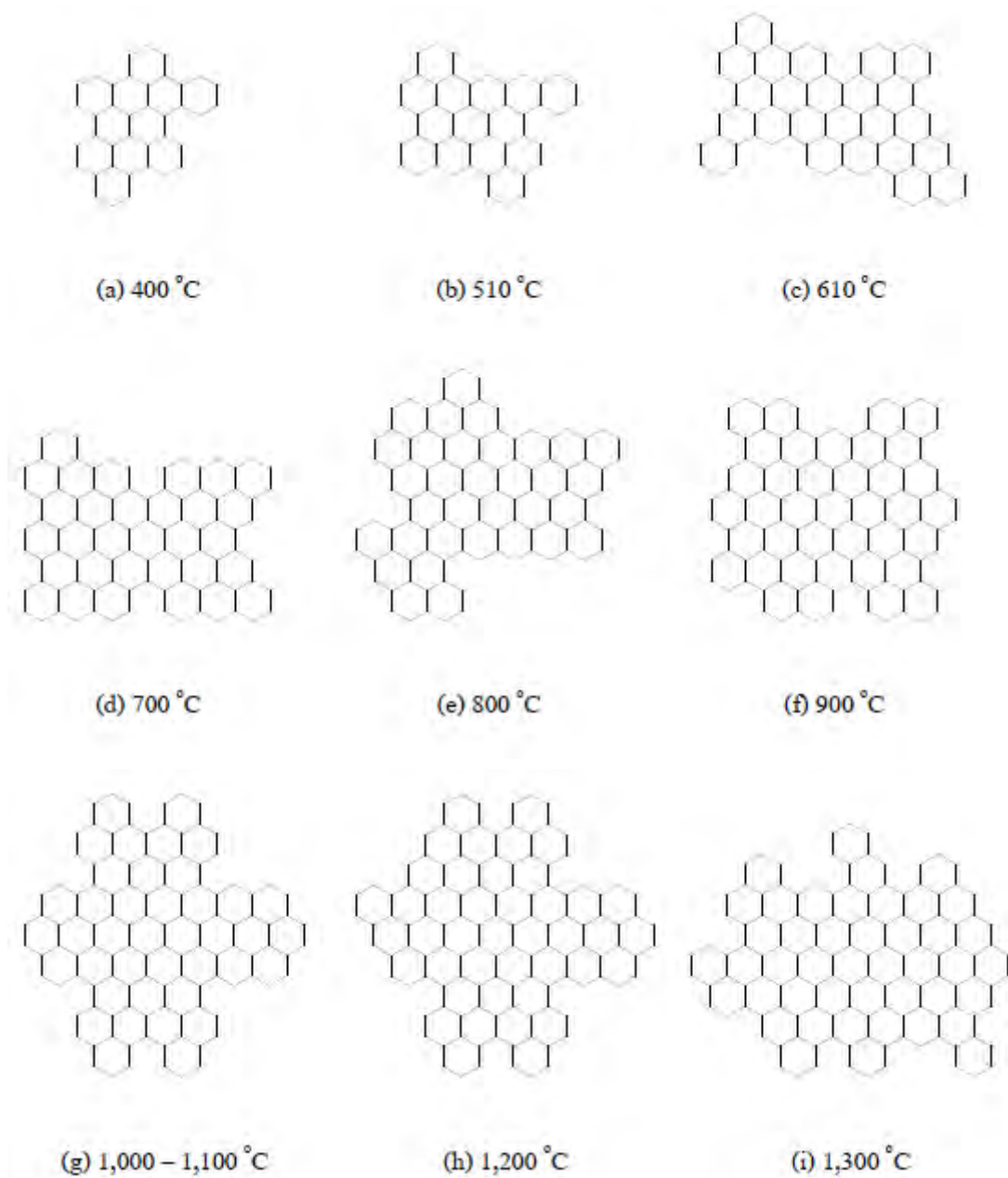


รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล (ที่มา : Basu, 2010)

เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวทางความร้อน จะเกิดอนุกรมของปฏิกิริยาต่างๆ ได้ แก๊สที่มีพลังงานปานกลาง น้ำมันที่มีองค์ประกอบซับซ้อน และ ชาร์ ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.16 ถึง 2.19



การไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การไพโรไลซิสแบบช้า และแบบรวดเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ (local equilibrium) โดยอัตราการให้ความร้อนจะช้าพอที่จะทำให้เกิดสมดุลตามอุณหภูมิ ในกรณีนี้ปริมาณและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับแนวของอุณหภูมิเดิม (temperature history) ส่วนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดในช่วงการให้ความร้อน แต่การไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ของช่วงอุณหภูมิสุดท้าย



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา

(ที่มา : Hassler, 1974)

ในกระบวนการผลิตซาร์ขั้นต้นเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของซาร์ ซาร์ที่ได้ควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีสีดำตลอด (uniformly black)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า
- มีความเป็นรูพรุนสูง
- มีพื้นที่ผิวมาก
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (shiny surface)
- ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)

กระบวนการไพโรไลซิสทำให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนเป็นการไถ่ทาร์แล้วเป็นไค้ก การไพโรไลซิสให้ได้ชาร์ที่มีคุณสมบัติดังต้องการทำได้โดยปรับสภาวะของปฏิกิริยาไพโรไลซิสให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ

#### ก. คุณสมบัติของการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ได้แก่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือชาร์ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือทาร์และแก๊ส ซึ่งทาร์และแก๊สจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆจำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอโรมาติกหลักที่เล็กลายเป็นโครงสร้างของชาร์ โดยการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เผา แสดงดังรูปที่ 2.11 ส่วนโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่า จะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง เช่น น้ำ แอมโมเนีย ทาร์ และแก๊สต่างๆ

สิ่งสำคัญที่สุดของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการไพโรไลซิส เพราะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบออกมาเป็นสารระเหยที่อุณหภูมิสูง ชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่น ถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการไพโรไลซิส เป็นผลทำให้ปริมาตรทั้งหมดของรูพรุนเล็กๆที่เกิดขึ้นในขั้นแรกของการไพโรไลซิสลดลง และชาร์มีความแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งการลดลงของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะมากขึ้นเมื่อคาร์บอนคงตัวลดลง

## ข. อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อน เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที อันเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็ว

ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ผลก็คือจะได้ชาร์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าชาร์ที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบน้อย ทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำปฏิกิริยากะตุ้น ตัวกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

## ค. ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction)

ตัวกลางของปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณที่เป็นถ่านจะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า พบว่าการไพโรไลซิสโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดจะใช้พลังงานต่ำ เพราะความร้อนจากการเผาไหม้ของสารระเหยจะให้ความร้อนกับเตาฟลูอิดไคซ์เบด จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ชาร์ที่มีรูพรุน และการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัสดุดิบ

การไพโรไลซิสจะมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (softening period) และช่วงหลังการอ่อนตัว (after softening period) ในช่วงการอ่อนตัวควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำ เพื่อให้แก๊สหลุดออกมาจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอุดแน่นภายในโพรง (Bansal, 1988)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jeon และคณะ (2007) ศึกษาผลของไฮโดรแกซีฟิเคชันเทียบกับไพโรไลซิสของไม้สนต่อการเกิดมีเทน ที่อุณหภูมิ 770 องศาเซลเซียส ความดัน 5 บาร์พบว่าเมื่อมีการป้อนไฮโดรเจนองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณมีเทนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนไฮโดรเจน เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณของไฮโดรเจนโมเลกุลรอบคาร์บอนมอนอกไซด์ และบริเวณส่วนที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของสารตั้งต้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนกับคาร์บอน ทำให้ปริมาณมีเทนเพิ่มขึ้น

Onay (2007) ศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิการไพโรไลซิสเมล็ดดอกคำฝอย (safflower) ต่อคุณสมบัติของชาร์ที่ได้ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งและทำการทดลองที่ภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิส 400, 600 และ 700 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อัตราการไหล 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 100, 300 และ 800 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงกระบวนการกลั่นสลาย (devolatilization) เกิดได้มากขึ้น ทำให้ชาร์มีรูพรุนเพิ่มขึ้น สำหรับทุกอัตราการให้ความร้อน (100, 300 และ 800 องศาเซลเซียสต่อนาที) พื้นที่ผิวของชาร์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 600 องศาเซลเซียสและจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 700 องศาเซลเซียสเนื่องจากที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โครงสร้างของชาร์มีจำนวนรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ลดลงและรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวลดลง สำหรับผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างของชาร์ พบว่าอัตราการให้ความร้อนสูงส่งผลให้ชาร์มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และมากที่สุดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 800 องศาเซลเซียสต่อนาที จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของชาร์ขึ้นอยู่กับภาวะของกระบวนการไพโรไลซิส

Gilbert และคณะ (2009) ศึกษาผลของชาร์ต่อการสลายตัวของทาร์ในกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง และทำการทดลองไพโรไลซิสชีวมวลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจน อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการ



ไพโรไลซิสชีวมวลจะผ่านส่วนการแตกตัวของทาร์ภายในท่อปฏิกรณ์ซึ่งมีชาร์บรจอยู่ อุณหภูมิชาร์เบดอยู่ที่ 500-800 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิสูงทาร์แตกตัวได้มากขึ้น และจากการเปรียบเทียบกรณีมีชาร์และไม่มีชาร์ที่อุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้ของชาร์จากการไพโรไลซิสชีวมวลเป็นร้อยละ 21 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าคงที่ทุกการทดลอง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์หลักของการไพโรไลซิสคือทาร์ มีปริมาณถึงร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของส่วนการแตกตัวของทาร์ จากการเปรียบเทียบกรณีมีชาร์และไม่มีชาร์ที่อุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้ของทาร์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นร้อยละ 7 และ 4 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่มีชาร์ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น

Zhang และคณะ (2005) ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและถ่านหินต่อการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ(batch reactor) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดันของไฮโดรเจน 7.1 เมกะพาสคาล พบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและถ่านหินสูงขึ้น และผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในส่วนของการเกิดมีเทนเมื่ออัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและถ่านหินต่างกัน พบว่าปริมาณของมีเทนเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและถ่านหินเพิ่มจาก 0.05 กรัมของไฮโดรเจนต่อกรัมของถ่านหินเป็น 0.2 กรัมของไฮโดรเจนต่อกรัมของถ่านหิน

Lee และคณะ (2006) ศึกษาไฮโดรแกซิฟิเคชันเพื่อผลิตแก๊สธรรมชาติสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านหินปิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง ทำการทดลองในไฮโดรแกซิไฟเออร์แบบไหลผ่าน (entrained-flow hydrogasifier) โดยศึกษาผลของความดัน (60-80 บรรยากาศ), อุณหภูมิ (600-800 องศาเซลเซียส) และอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อถ่านหิน (0.3-0.5) ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สและการเปลี่ยนของคาร์บอน พบว่าความเข้มข้นของแก๊สธรรมชาติสังเคราะห์และการเปลี่ยนของคาร์บอนเพิ่มขึ้นเมื่อความดันและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อถ่านหินมีผลต่อการเปลี่ยนของคาร์บอนและความเข้มข้นของแก๊สธรรมชาติสังเคราะห์ โดยเมื่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อถ่านหินเพิ่ม การเปลี่ยนของคาร์บอนและความเข้มข้นของแก๊สธรรมชาติสังเคราะห์จะเพิ่มสูงขึ้น

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากการไพโรไลซิสที่ภาวะต่างๆต่อไฮโดร แกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวลและศึกษาผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

#### 3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. กระจกนิยักรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 – 500 ไมโครเมตร
2. แก๊สอาร์กอน 99.99% จากบริษัทแพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
3. แก๊สไฮโดรเจน 99.99% จากบริษัทแพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
4. อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ขนาดอนุภาค 150 ไมโครเมตร จากบริษัท Chemin
5. ซิลิกาเจล จากบริษัทวิทยาศาสตร์ จำกัด

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

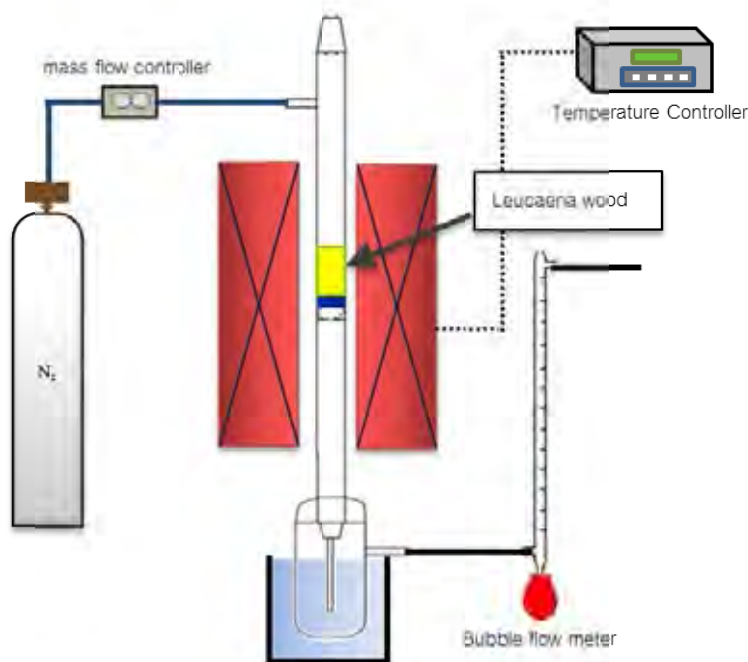
##### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมกระจกนิยักร

1. เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ
2. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด
3. ตะแกรงร่อนขนาด 250 และ 500 ไมโครเมตร

##### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชาร์โดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis)

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบ fixed-bed ทำจากแก้วควอทซ์ (quartz) ทนความร้อนสูง 45 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 22 มิลลิเมตร โดยที่บริเวณกึ่งกลางมีการสอดแก้วเพื่อรองรับกระจกนิยักร

2. อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหล (mass flow controller) ของแก๊สไนโตรเจน โดยควบคุมอัตราการไหลรวมให้คงที่ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
3. เครื่องให้ความร้อน (tube furnace) ในการเกิดปฏิกิริยาตามอุณหภูมิที่ต้องการ (650 – 850 องศาเซลเซียส)
4. อุปกรณ์ดักจับทาร์ (tar trap)
5. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (bubble flow) ของแก๊สขาออก

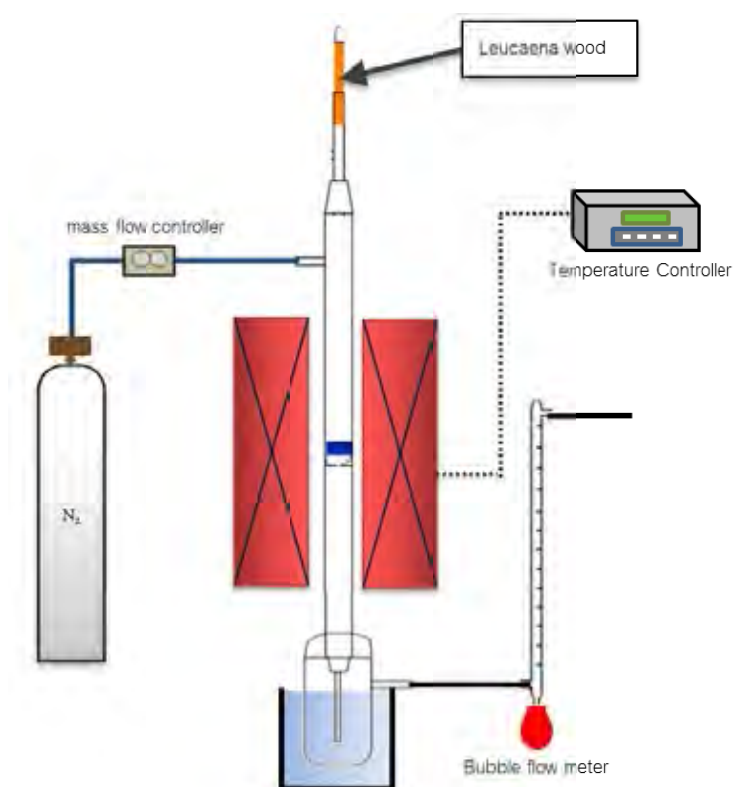


รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับเตรียมซาร์โดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า

### 3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมซาร์โดยวิธีไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis)

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบ drop-tube fixed-bed ทำจากแก้วควอทซ์ (quartz) ทนความร้อนสูง 45 เซนติเมตรเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 มิลลิเมตรเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 22 มิลลิเมตรโดยที่บริเวณกึ่งกลางมีการคอดแก้วเพื่อรองรับซาร์

2. อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหล (mass flow controller) ของแก๊สไนโตรเจน โดยควบคุมอัตราการไหลรวมให้คงที่ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
3. เครื่องให้ความร้อน (tube furnace) ในการเกิดปฏิกิริยาตามอุณหภูมิที่ต้องการ (650 - 850 องศาเซลเซียส)
4. อุปกรณ์ดักจับทาร์ (tar trap)
5. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (bubble flow) ของแก๊สขาออก

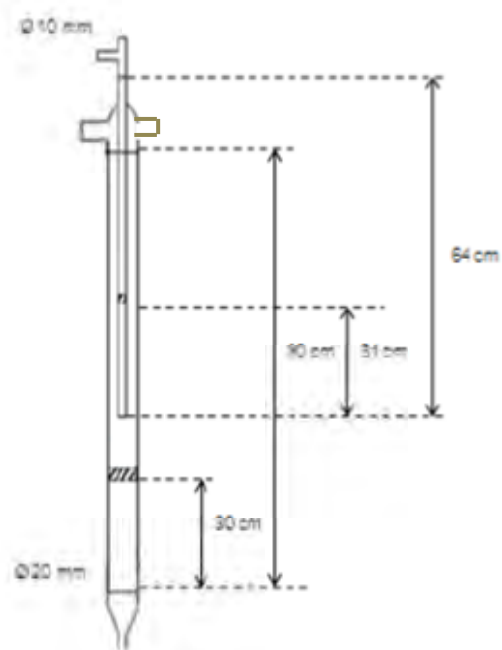


รูปที่ 3.2 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับเตรียมคาร์บอนไฟเบอร์โดยวิธีไพโรไลซิสแบบเร็ว

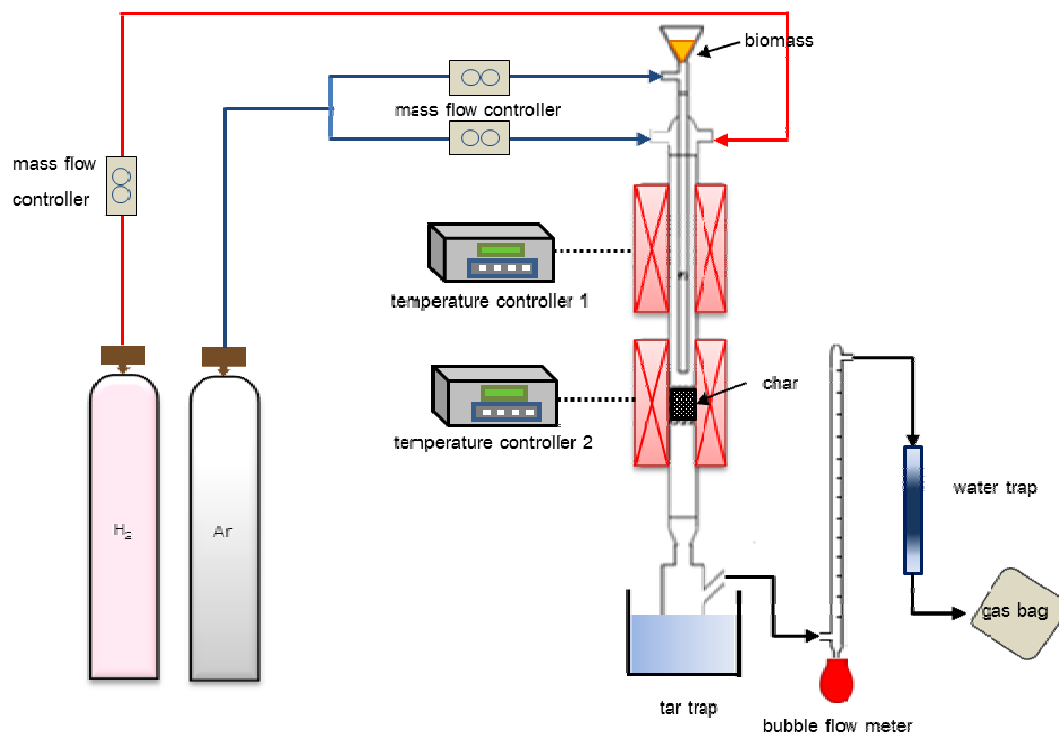
### 3.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยส่วนต่างๆดังต่อไปนี้

1. ถังแก๊สอาร์กอน 99.99%
2. ถังแก๊สไฮโดรเจน 99.99%
3. เครื่องให้ความร้อน (tube furnace)
4. เครื่องปฏิกรณ์เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอนเป็นท่อ 2 ชั้นโดยท่อชั้นในทำจากแก้วควอทซ์ (quartz) ทนความร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1 เซนติเมตร หนา 0.12 เซนติเมตร ยาว 64 เซนติเมตร จากนั้นทำการสอดท่อแก้วควอทซ์ที่ตำแหน่ง 31 เซนติเมตรเหนือปลายท่อด้านล่างเพื่อใช้รองรับชีวมวล ส่วนท่อชั้นนอกทำจากแก้วควอทซ์เช่นเดียวกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 เซนติเมตร หนา 0.12 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร โดยมีการสอดท่อแก้วควอทซ์ที่ตำแหน่ง 30 เซนติเมตรเหนือปลายท่อด้านล่างเพื่อใช้รองรับชาร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3
5. อุปกรณ์ดักจับทาร์ (tar trap)
6. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (bubble flow) ของแก๊สขาออก
7. อุปกรณ์ดักความชื้น (water trap)
8. ถุงเก็บแก๊สดั่วอย่าง (gas bag) ขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน (two-stage fixed bed reactor)



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน

### 3.2.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC- 2014 ดังรูปที่ 3.5 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากเตาปฏิกรณ์ โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สแสดงดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

แก๊สพา (carrier gas)	แก๊สอาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์	Unibeads C packed column
อุณหภูมิการฉีด (injector temperature)	120 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (oven column temperature)	50 ถึง 180 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD)

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมกระถินยักษ์

บดและคัดขนาดไม้กระถินยักษ์ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 ถึง 500 ไมโครเมตร ด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อนขนาด 250 และ 500 ไมโครเมตร นำกระถินยักษ์ตามขนาดที่ต้องการไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 6 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการศึกษาวิจัย

#### 3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

##### 1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)

วิเคราะห์ตามมาตรฐานของ ASTM D3172-3175 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว

##### 2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHN analyzer

#### 3.3.3 การเตรียมชาร์โดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis)

1. ชั่งกระถินยักษ์หนัก 3.5 กรัม ใส่ลงในท่อที่รองด้วย quart wool บริเวณปลายท่อ จะได้ความสูงเบดประมาณ 5 เซนติเมตร
2. เปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในออก
3. เปิดสวิตช์ของเตาให้ความร้อน ซึ่งจะให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อให้การไพโรไลซิสเกิดอย่างช้าๆตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยทำการเตรียมชาร์ที่อุณหภูมิ 650, 750 และ 850 องศาเซลเซียส
4. นำชาร์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติด้วยเทคนิค SEM และ BET

#### 3.3.4 การเตรียมชาร์โดยวิธีไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis)

1. ชั่งกระถินยักษ์หนัก 2.5 กรัม เพื่อเตรียมปล่อยลงในท่อของเครื่องปฏิกรณ์แบบ



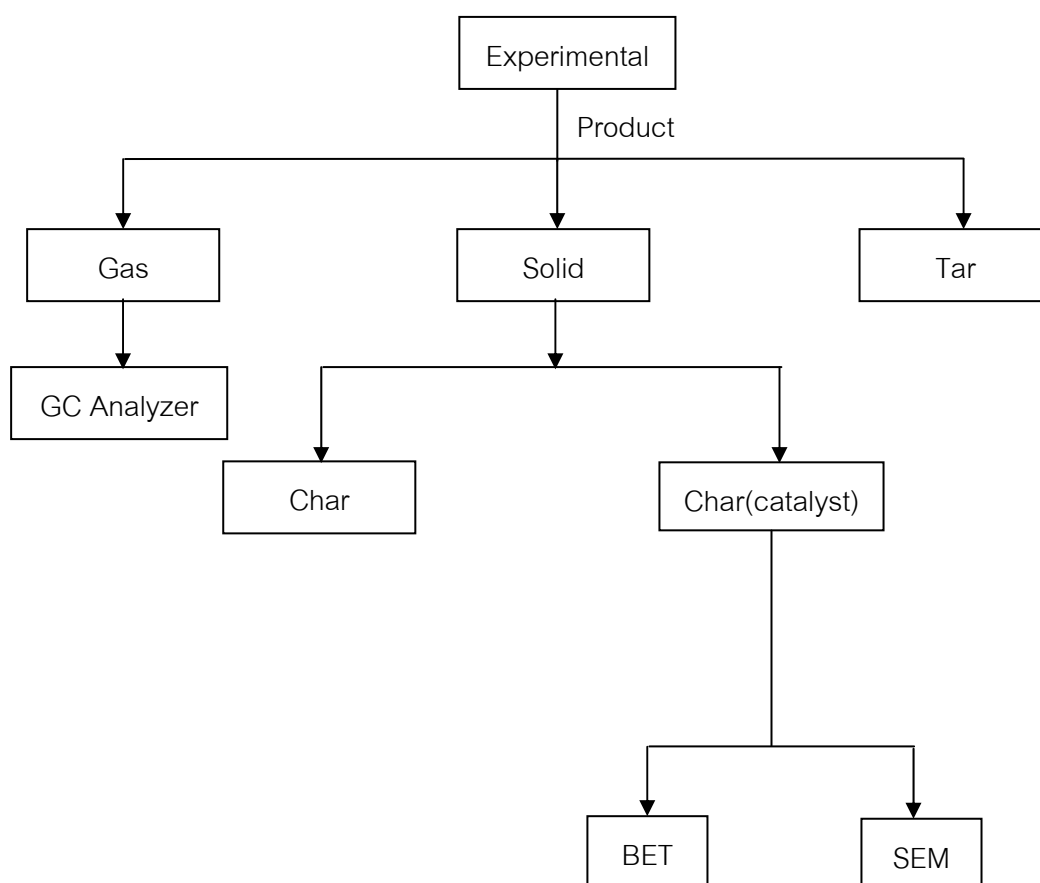
เบตนิ่งโดยใส่ quart wool รองบริเวณปลายของท่อ เพื่อรองรับซาร์ไว้

2. เปิดแก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อให้ได้ อากาศที่อยู่ภายในออก พร้อมทั้งเปิดสวิตช์ของเตาให้ความร้อน
3. เมื่ออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการรอจนเข้าสู่ภาวะคงที่หลังจาก นั้นทำการป้อนกระถินยักษ์ทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อให้การไพโรไลซิส เกิดอย่างรวดเร็ว โดยทำการเตรียมซาร์ที่อุณหภูมิ 650, 750 และ 850 องศา เซลเซียส
4. นำซาร์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติด้วยเทคนิค SEM และ BET

### 3.3.5 การไฮโดรแกซิฟิเคชันสารระเหยจากชีวมวลโดยใช้ซาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ชั่งกระถินยักษ์หนัก 2.5 กรัม เพื่อเตรียมปล่อยลงในท่อชั้นในของเครื่องปฏิกรณ์ แบบเบตนิ่งโดยใส่ quart wool รองบริเวณปลายของท่อชั้นใน เพื่อรองรับซาร์ไว้
2. ชั่งซาร์ 0.5 กรัม อะลูมินาบอล 7.5 กรัม ใส่ลงในท่อชั้นนอกที่รองด้วย quart wool บริเวณส่วนที่คอดของท่อ จะได้ความสูงเบตประมาณ 5 เซนติเมตร
3. ประกอบท่อชั้นในและท่อชั้นนอกเข้าด้วยกันแล้วนำไปใส่ลงในเตาให้ความร้อน ตามลักษณะดังรูปที่ 3.3
4. เปิดแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหลเข้าท่อชั้นใน 30 มิลลิลิตรต่อนาที และเข้าท่อชั้นนอก 80 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาทีและเปิดแก๊สไฮโดรเจน เข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหลเข้าท่อชั้นนอก 10 มิลลิลิตรต่อนาที รวมอัตราการ ไหลทั้งหมด 120 มิลลิลิตรต่อนาที
5. เปิดสวิตช์ของเตาให้ความร้อนทั้งส่วนที่ 1 (ไพโรไลซิส) และส่วนที่ 2 (ไฮโดรแกซิฟิ เคชัน) โดยในส่วนที่ 1 ควบคุมอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และส่วนที่ 2 ทำการ ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส
6. เมื่ออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการ (600-800 องศาเซลเซียส) รอ จนเข้าสู่ภาวะคงที่หลังจากนั้นทำการ ป้อนกระถินยักษ์ปริมาณ 0.5 กรัม ทาง ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์

7. เก็บแก๊สที่ได้ทุกๆ 15 นาทีเป็นเวลา 60 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 2 ลิตรแล้ว นำแก๊สที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาชนิดของแก๊สและสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิดด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
8. ปิดเครื่องให้ความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาและแก๊สไฮโดรเจน
9. เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียสจึงปิดแก๊สอาร์กอน และเก็บชาร์ที่ใช้แล้วพร้อมกับชิ้นส่วนที่เหลือ (residual) และเก็บไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.6
10. คำนวณค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ (ภาคผนวก ค)



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ และการทดสอบต่างๆ

การศึกษาค้นคว้าเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ตไฮโดรแกซีฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล มีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้

- ก. อุณหภูมิไฮโดรแกซีฟิเคชัน (600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส)
- ข. ชาร์ตที่เตรียมโดยวิธีต่างกัน (วิธีไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และ วิธีไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis))
- ค. อุณหภูมิในการเตรียมชาร์ต (650, 750 และ 850 องศาเซลเซียส)
- ง. อัตราส่วนระหว่างชาร์ตต่อชีวมวล (0:0.5, 0.25:0.5, 0.5:0.5 และ 1:0.5)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล โดยจะศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากไพโรไลซิสที่ภาวะต่างๆต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล และผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดำเนินการต่างๆ ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจน, อุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน, วิธีเตรียมชาร์โดยการไพโรไลซิสแบบช้าและการไพโรไลซิสแบบเร็ว, อุณหภูมิของการเตรียมชาร์ และอัตราส่วนของชาร์ต่อชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์และปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากไฮโดรแกซิฟิเคชันที่ภาวะต่างๆโดยมีชาร์จากการไพโรไลซิสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) พร้อมทั้งศึกษาลักษณะของชาร์ก่อนและหลังทำปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM และการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวของชาร์ด้วยเทคนิค BET ซึ่งสามารถแบ่งผลการทดลองได้เป็น 8 ส่วน ดังนี้

- 1) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระถินยักษ์ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)
- 2) ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TG-DTA)
- 3) ผลการวิเคราะห์สมบัติของชาร์ด้วยเทคนิค SEM และ BET
- 4) ปริมาณไฮโดรเจน
  - ปริมาณไฮโดรเจนต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน

- ปริมาณไฮโดรเจนต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน
- 5) ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลในไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล
- ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน
  - ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน
- 6) ผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน
- ผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์
  - ผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส
- 7) ผลของตัวแปรในการเตรียมชาร์ (วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว และอุณหภูมิ)
- วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว
- ผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน
  - ผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชัน
  - ผลของค่าความร้อน
- อุณหภูมิ
- ผลของอุณหภูมิในการเตรียมชาร์ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน
  - ผลของอุณหภูมิในการเตรียมชาร์ต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชัน
  - ผลของค่าความร้อน

## 8) ผลของอัตราส่วนของชาร์ตต่อชีวมวล

- ผลของอัตราส่วนของชาร์ตต่อชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน เป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน
- ผลของอัตราส่วนของชาร์ตต่อชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบของ ผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ของชาร์ตที่เตรียมขึ้นจากภาวะการเตรียมที่ต่างกัน

สัญลักษณ์	วิธีการไพโรไลซิส	อุณหภูมิในการไพโรไลซิส
S650	Slow pyrolysis	650°C
S750	Slow pyrolysis	750°C
S850	Slow pyrolysis	850°C
F650	Fast pyrolysis	650°C
F750	Fast pyrolysis	750°C
F850	Fast pyrolysis	850°C

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกระถินยักษ์

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของกระถินยักษ์ ทั้งการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) แสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่ากระถินยักษ์มีองค์ประกอบของสารระเหยสูงถึงร้อยละ 79.48 ขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำร้อยละ 8.78 จึงเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบป้อนในการทดลอง เพื่อศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของกระถินยักษ์

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, as received)	
ความชื้น (Moisture)	9.68
สารระเหย (Volatile matter)	79.48
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)*	8.78
เถ้า (Ash)	2.06

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของกระถินยักษ์

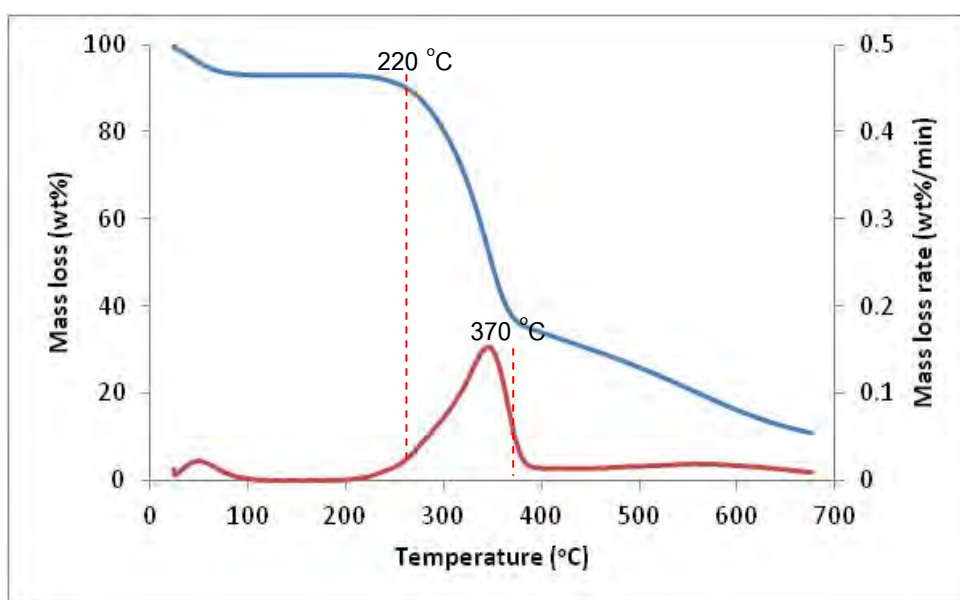
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, daf)	
คาร์บอน (C)	49.99
ไฮโดรเจน (H)	6.19
ไนโตรเจน (N)	0.81
ออกซิเจน (O)*	43.01
ค่าความร้อน (MJ/kg) (daf)	18.92

คาร์บอนคงตัว\* = 100-ผลรวมขององค์ประกอบแต่ละชนิดยกเว้นคาร์บอนคงตัว

ออกซิเจน\* = 100-ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

## 4.2 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกระดิ่งยักซ์

รูปที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกระดิ่งยักซ์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TG-DTA) ภายใต้บรรยากาศเฉื่อย ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า กระดิ่งยักซ์เริ่มมีการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 220 องศาเซลเซียส และมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 370 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกระดิ่งยักซ์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคTG-DTA

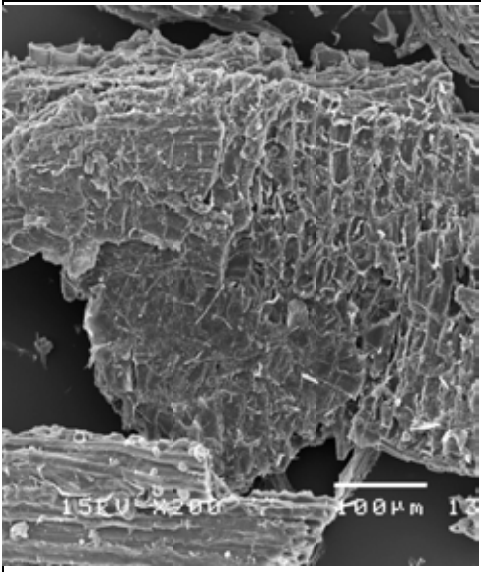
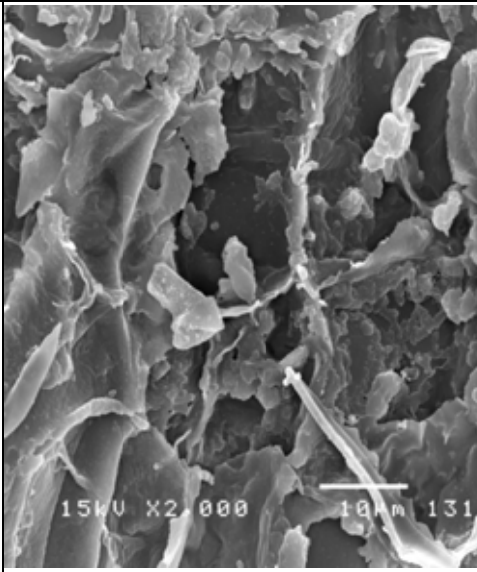
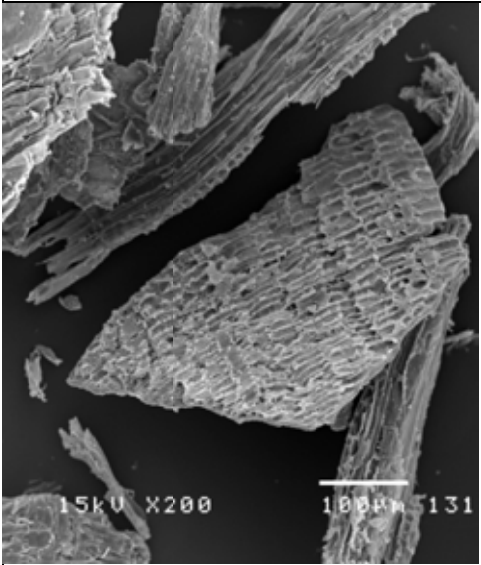
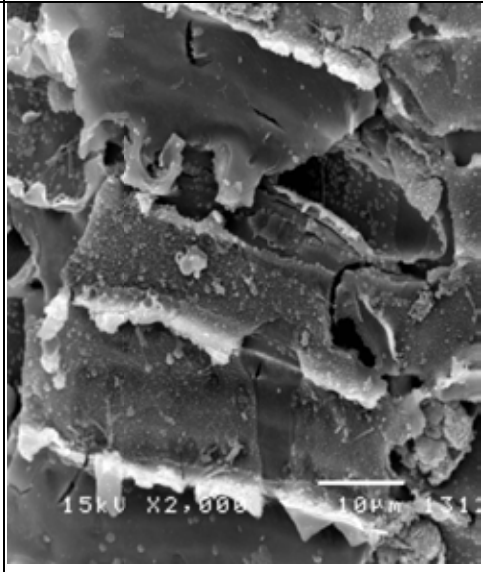


### 4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติของชาร์ด้วยเทคนิค SEM และ BET

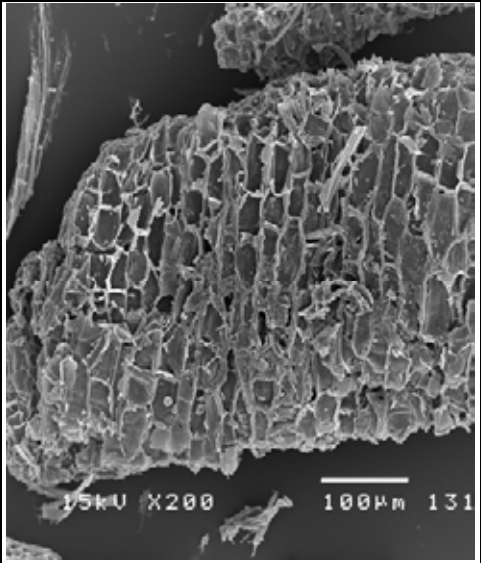
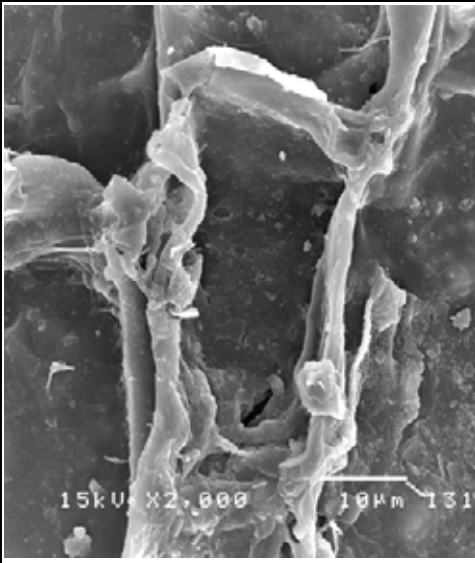

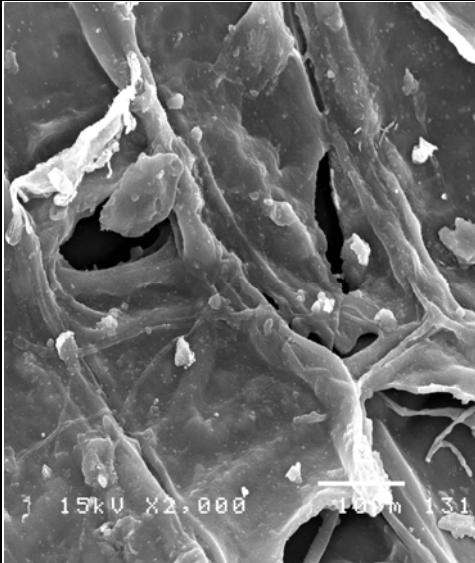
#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์ด้วยเทคนิค SEM

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์จากการไพโรไลซิสกระถินยักษ์ ที่อุณหภูมิ 650 750 และ 850 องศาเซลเซียส โดยวิธีการไพโรไลซิสแบบช้าและการไพโรไลซิสแบบเร็ว ทั้งก่อนและหลังใช้ ด้วยเทคนิค SEM แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสและวิธีไพโรไลซิสมีผลต่อโครงสร้างของชาร์ที่ได้ ซึ่งอนุภาคของชาร์นั้นเกิดจากการปลดปล่อยสารระเหย (devolatilization) ส่งผลให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสต่างกัน ทำให้โครงสร้างของชาร์ที่ได้มีลักษณะต่างกัน จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์ก่อนใช้ พบว่าโครงสร้างรูพรุนของชาร์เพิ่มขึ้น และมีความหนาของผนังรูพรุนลดลงเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 650 องศาเซลเซียส เป็น 750 องศาเซลเซียส เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้นทำให้การปลดปล่อยสารระเหยเกิดได้ดีขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสเป็น 850 องศาเซลเซียสทำให้โครงสร้างของชาร์มีรูพรุนลดลง เนื่องจากโครงสร้างของชาร์เกิดการสลายตัวทางความร้อน (Guerrero et al.,2005 และ Min et al.,2011) จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์หลังใช้ พบว่าชาร์จากการไพโรไลซิสทั้งแบบช้าและแบบเร็วที่อุณหภูมิ 650, 750 และ 850 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างรูพรุนเปลี่ยนแปลงไปจากชาร์ก่อนใช้ เนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อน ทำให้มีความเป็นรูพรุนลดลง และจากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์ที่เตรียมจากการไพโรไลซิสโดยวิธีต่างกัน พบว่าการไพโรไลซิสแบบช้าให้ชาร์ที่มีโครงสร้างรูพรุนน้อยกว่าการไพโรไลซิสแบบเร็ว เนื่องจากการไพโรไลซิสแบบเร็วนั้นเป็นการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว จะได้ชาร์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Okumura et al.,2009) ซึ่งผลของอุณหภูมิและวิธีการไพโรไลซิสชาร์ต่อประสิทธิภาพของชาร์จะได้กล่าวไว้ในส่วนถัดไป

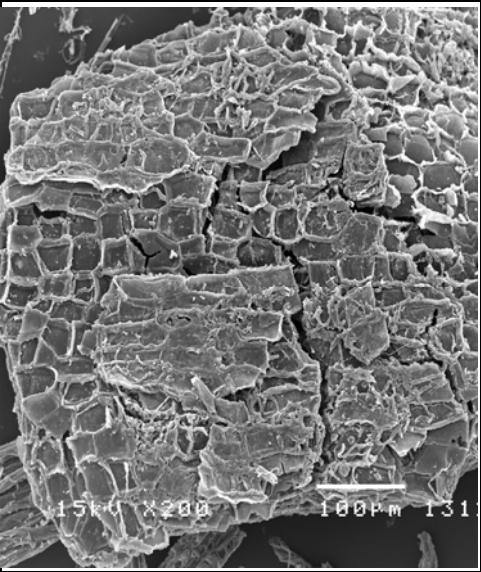
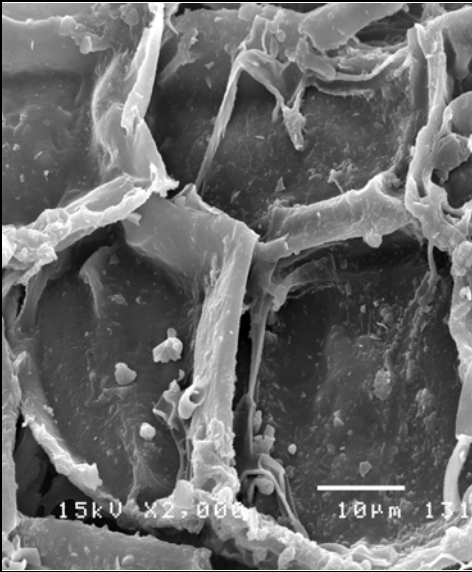

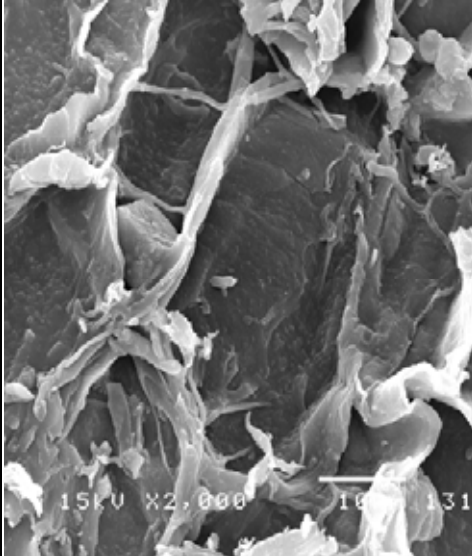
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์ด้วยเทคนิค SEM

Pyrolysis	Pyrolysis temp.		
Slow pyrolysis	650 °C	Before reaction	
		x 200µm	x 2000µm
			
		After reaction	
x 200 µm	x 2000 µm		


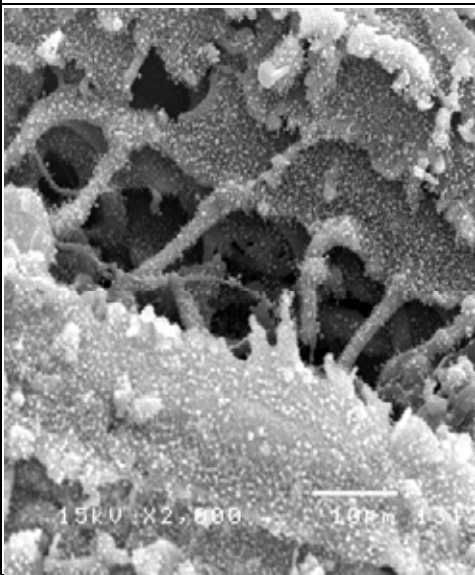
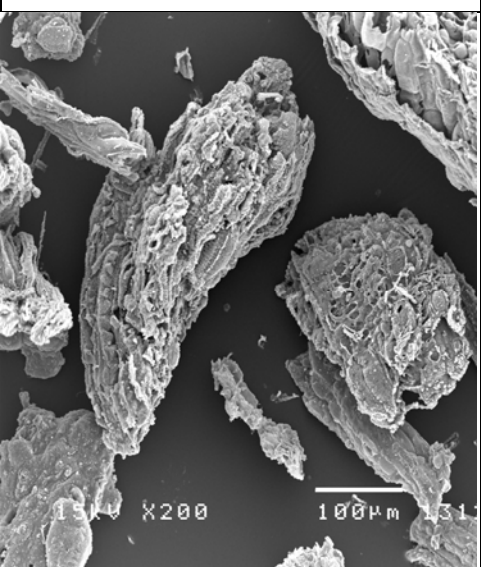
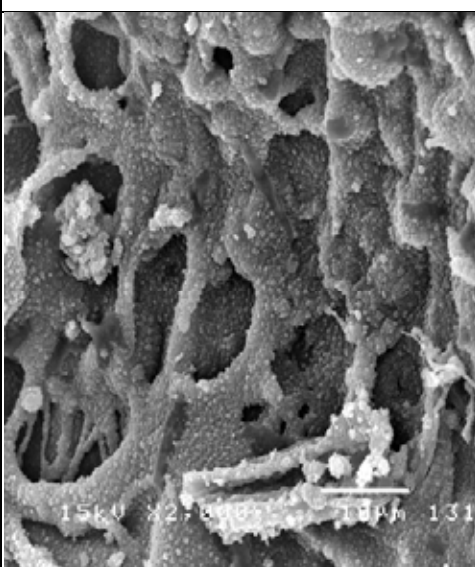
ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์ด้วยเทคนิค SEM

Pyrolysis	Pyrolysis temp.		
Slow pyrolysis	750 °C	Before reaction	
		x 200 $\mu\text{m}$	x 2000 $\mu\text{m}$
			
		After reaction	
		x 200 $\mu\text{m}$	x 2000 $\mu\text{m}$
			

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์ด้วยเทคนิค SEM

Pyrolysis	Pyrolysis temp.		
Slow pyrolysis	850 °C	Before reaction	
		x 200 $\mu\text{m}$	x 2000 $\mu\text{m}$
			
		After reaction	
x 200 $\mu\text{m}$	x 2000 $\mu\text{m}$		
			

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์ด้วยเทคนิค SEM

Pyrolysis	Pyrolysis temp.		
Fast pyrolysis	750 °C	Before reaction	
		x 200 $\mu\text{m}$	x 2000 $\mu\text{m}$
			
		After reaction	
x 200 $\mu\text{m}$	x 2000 $\mu\text{m}$		
			

#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวของชาร์ด้วยเทคนิค BET

การวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวของชาร์จากการไพโรไลซิสกระถินยักษ์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส โดยวิธีการไพโรไลซิสแบบช้าและการไพโรไลซิสแบบเร็วทั้งก่อนและหลังใช้ด้วยเทคนิค Brunauer, Emmett, Teller (BET) แสดงดังตารางที่ 4.5 จากตารางพบว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วก่อนใช้มีพื้นที่ผิว 5.16 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุน 0.0166 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบช้าก่อนใช้ เนื่องจากวิธีไพโรไลซิสทั้งสองวิธีนั้นแตกต่างกันที่อัตราการให้ความร้อน การไพโรไลซิสแบบช้าจะเป็นการให้ความร้อนอย่างช้าๆ แก่ชีวมวลทำให้การปลดปล่อยสารระเหยเกิดขึ้นอย่างช้าๆ พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจะมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการไพโรไลซิสแบบเร็ว ซึ่งเป็นการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว แก่ชีวมวล ทำให้การปลดปล่อยสารระเหยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จะได้ชาร์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมาก (Onay, 2007 และ Guerrero et al., 2004) เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของชาร์จากการไพโรไลซิสหลังใช้พบว่า ชาร์จากการไพโรไลซิสทั้งสองวิธีมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้ามีพื้นที่ผิวลดลงเหลือ 0.73 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนลดลงเหลือ 0.0092 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วมีพื้นที่ผิวลดลงเหลือเพียง 0.32 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนลดลงเหลือ 0.0020 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม จะเห็นว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลงมากกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า เนื่องจากการไพโรไลซิสแบบเร็วนั้นเป็นการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว แก่ชีวมวล ทำให้การปลดปล่อยสารระเหยเกิดอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลทำให้โครงสร้างรูพรุนของชาร์ที่ได้ไม่แข็งแรง เมื่อนำไปใช้จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ง่าย ส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนหลังใช้ลดลง ซึ่งพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของชาร์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของชาร์ด้วย ทั้งนี้ผลของวิธีการไพโรไลซิสชาร์ต่อประสิทธิภาพของชาร์จะได้กล่าวไว้ในส่วนถัดไป

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวของซาร์ที่เตรียมด้วยวิธีต่างกันก่อนใช้และหลังใช้ ด้วยเทคนิค Brunauer, Emmett, Teller (BET)

ซาร์	พื้นที่ผิว BET (ตร.ม./กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
S750 Before reaction	2.18	0.0092	131.4
S750 After reaction	0.73	0.0056	307.7
F750 Before reaction	5.16	0.0166	128.80
F750 After reaction	0.32	0.0020	484.0

การวิเคราะห์ปริมาณพื้นผิวของซาร์จากการไพโรไลซิสกระถินยักษ์ที่อุณหภูมิต่างกันก่อนและหลังใช้ด้วยเทคนิค Brunauer, Emmett, Teller (BET) แสดงดังตารางที่ 4.6 จากตารางพบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของซาร์ก่อนใช้เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 650 เป็น 750 องศาเซลเซียส เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การปลดปล่อยสารระเหยเกิดได้มากขึ้น ทำให้ซาร์มีความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสเป็น 850 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของซาร์ลดลง เนื่องจากโครงสร้างของซาร์เกิดการสลายตัวทางความร้อน การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของซาร์หลังใช้พบว่า ซาร์จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 650 750 และ 850 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อนและจากปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้น

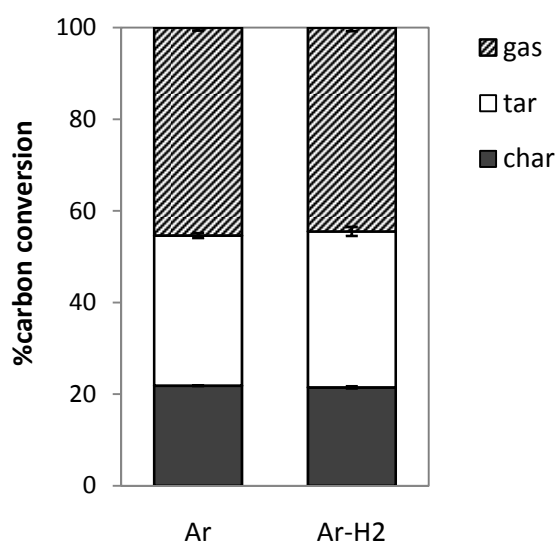
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวของซาร์จากการไพโรไลซิสกระถินยักษ์ที่อุณหภูมิต่างกัน ก่อนใช้และหลังใช้ ด้วยเทคนิค Brunauer, Emmett, Teller (BET)

ซาร์	พื้นที่ผิว BET (ตร.ม./กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
S650 Before reaction	1.88	0.0073	146.8
S650 After reaction	0.47	0.0042	384.2
S750 Before reaction	2.18	0.0092	131.4
S750 After reaction	0.73	0.0056	307.7
S850 Before reaction	2.07	0.0089	143.2
S850 After reaction	0.64	0.0051	357.1



#### 4.4 ผลของไฮโดรเจน

ผลของไฮโดรเจนที่ภาวะอุณหภูมิในส่วนของไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างภาวะที่มีการป้อนไฮโดรเจนกับภาวะที่ไม่มีการป้อนไฮโดรเจน พบว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนทั้งสองภาวะไม่แตกต่างกัน ดังนั้นไฮโดรเจนไม่ส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แก๊ส ทาร์ และชาร์ แต่จะส่งผลต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สซึ่งจะกล่าวในส่วนถัดไป



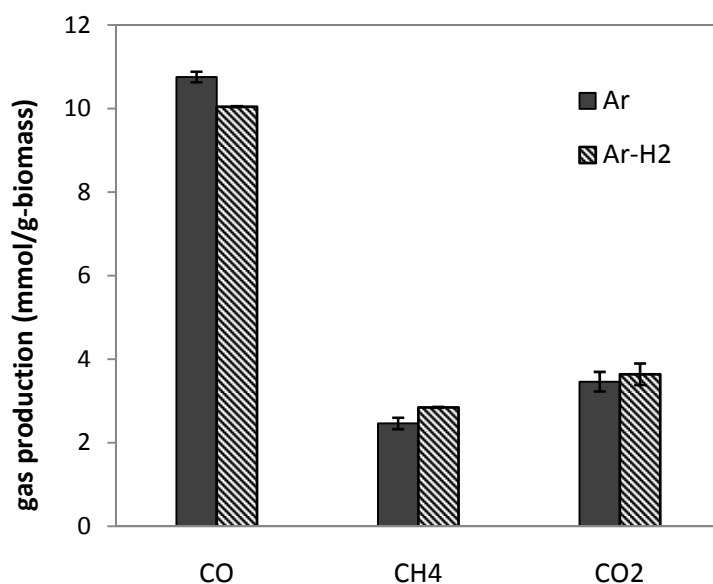
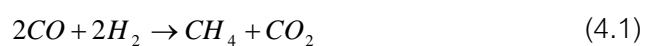
รูปที่ 4.2 ผลของไฮโดรเจนต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์

อุณหภูมิในส่วนของไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาผลของไฮโดรเจนที่ภาวะอุณหภูมิในส่วนของไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแสดงดังรูปที่ 4.3 เปรียบเทียบระหว่างภาวะที่มีการป้อนไฮโดรเจนกับภาวะที่ไม่มีการป้อนไฮโดรเจน พบว่าเมื่อป้อนไฮโดรเจนทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าการป้อนไฮโดรเจนทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนโมเลกุลรอบโมเลกุลของคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้น นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชันระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นมีเทน (Jeon et al.,2007) ดังสมการ (4.1)

CO hydrogenation

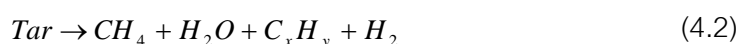


รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณไฮโดรเจนต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส  
ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่ 700 องศาเซลเซียส

#### 4.5 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลในไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล

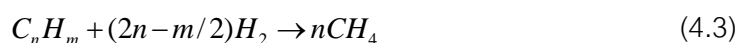
ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน แสดงดังรูปที่ 4.4 พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ใช้ชาร์ กับกรณีใช้ชาร์ พบว่ากรณีใช้ชาร์ให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก ร้อยละ 36.4 เป็นร้อยละ 46.3 ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลงจากร้อยละ 42.6 เป็นร้อยละ 31.4 แสดงให้เห็นว่าชาร์สามารถช่วยสนับสนุนหรือเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ (Tar cracking) ดังสมการที่ (4.2) เนื่องจากชาร์มีความเป็นรูพรุน และมีพื้นที่ผิวมาก (Gilbert et al., 2009 และ Sun et al., 2011) ส่งผลให้ทาร์ถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์มากขึ้นนั่นเอง

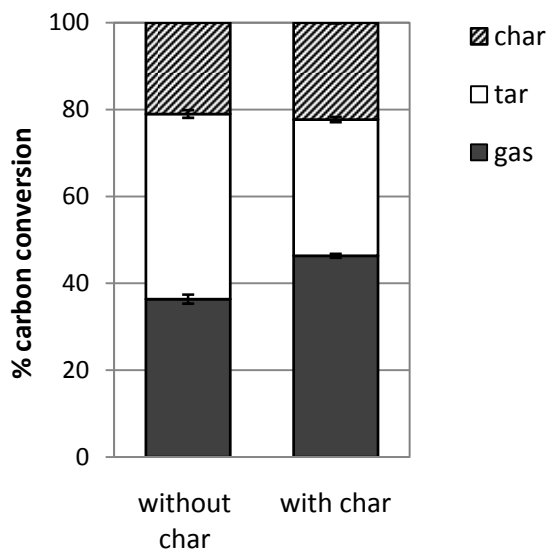
Tar cracking:



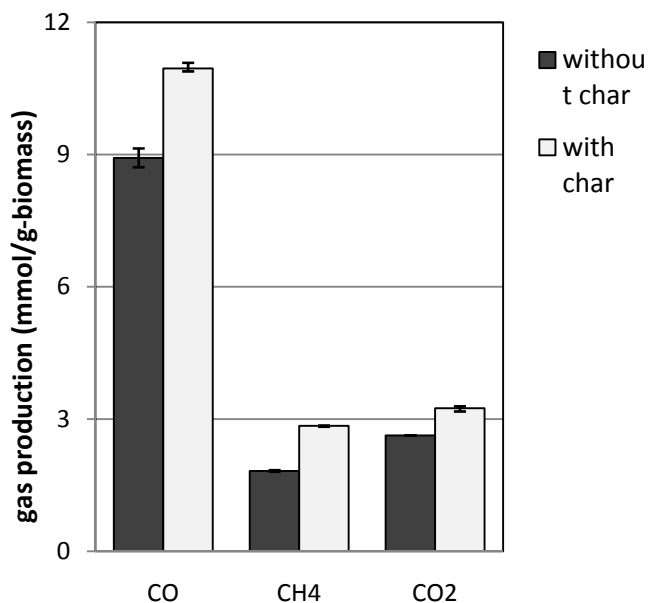
รูปที่ 4.5 แสดงผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชัน พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ใช้ชาร์กับกรณีใช้ชาร์ พบว่ากรณีมีชาร์คาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น จาก 8.9 เป็น 11.0 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล และมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 1.8 เป็น 2.8 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล สามารถอธิบายได้ว่าการใช้ชาร์ นอกจากจะช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์และปฏิกิริยาคาร์บอนฟอร์มเมชันแล้ว ชาร์ยังช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหย ดังสมการที่ (4.3) (Gomez-Barea et al., 2013) ปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ดังสมการที่ (4.1) ทำให้มีเทนเพิ่มสูงขึ้น (Yang et al., 2012) และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นนั้น เนื่องมาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลายเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

Hydrogasification

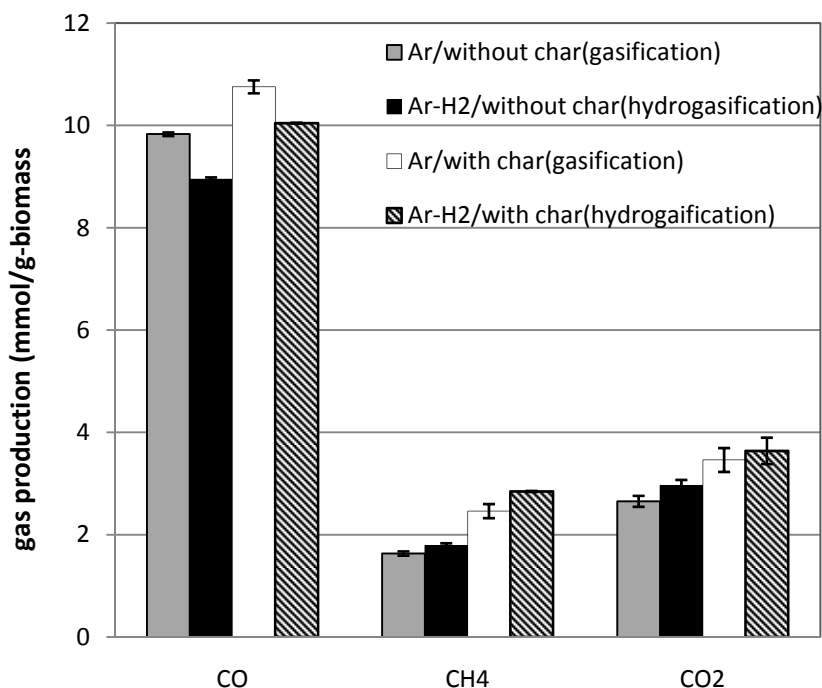




รูปที่ 4.4 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ผลของไฮโดรเจนและเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในแก๊สไพเคชั่นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

จากผลของไฮโดรเจนและผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สดังรูปที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบผลของไฮโดรเจนในกรณีไม่มีชาร์ พบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบของมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรแก๊สไพเคชั่นดังสมการที่ (4.3) และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชันระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไฮโดรเจนเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ (4.1) จึงสรุปได้ว่าในกรณีไม่มีชาร์ปฏิกิริยาไฮโดรแก๊สไพเคชั่น และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชันเกิดขึ้นได้

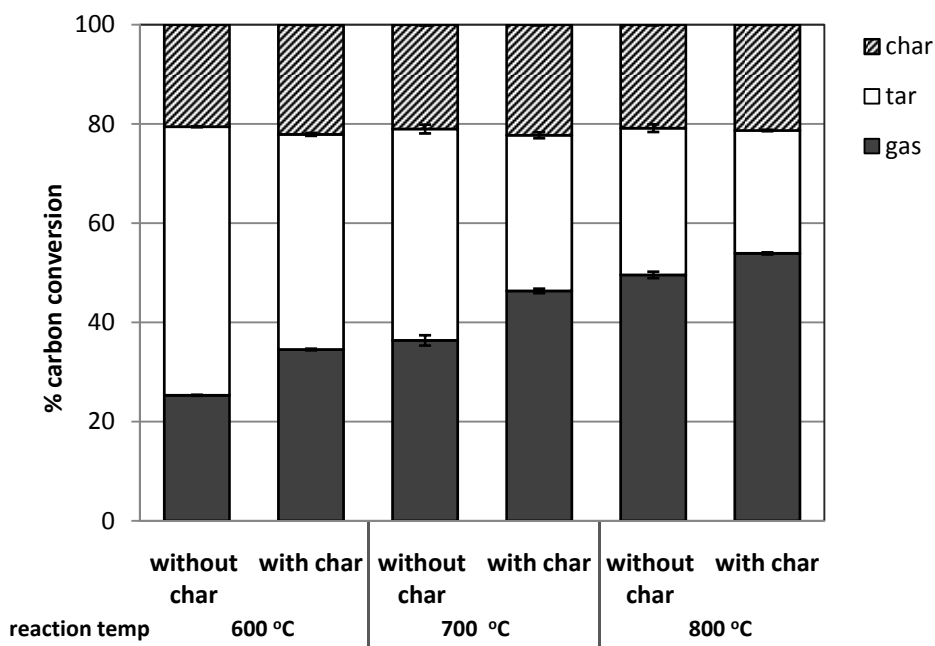
เมื่อเปรียบเทียบผลของชาร์ในกรณีที่ไม่มีไฮโดรเจน พบว่ากรณีมีชาร์ส่งผลให้แก๊สผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากชาร์ช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวทาร์เป็นแก๊ส แต่ในกรณีที่มีชาร์และมีไฮโดรเจน พบว่าคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นมากกว่าในกรณีมีชาร์แต่ไม่มี

ไฮโดรเจน เนื่องจากซาร์นอกจากช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์เป็นแก๊สแล้ว ยังช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชันและปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชันด้วย

สรุปได้ว่ามีเทนที่เพิ่มขึ้นนั้นมาจากการแตกตัวของทาร์ ปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชัน และพบว่าซาร์ช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์มากกว่าปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชัน เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกรณีมีซาร์แต่ไม่มีไฮโดรเจนกับกรณีไม่มีซาร์แต่มีไฮโดรเจน พบว่ามีเทนในกรณีมีซาร์แต่ไม่มีไฮโดรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีไม่มีซาร์แต่มีไฮโดรเจน ซาร์จึงสนับสนุนปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์มากกว่าปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชัน

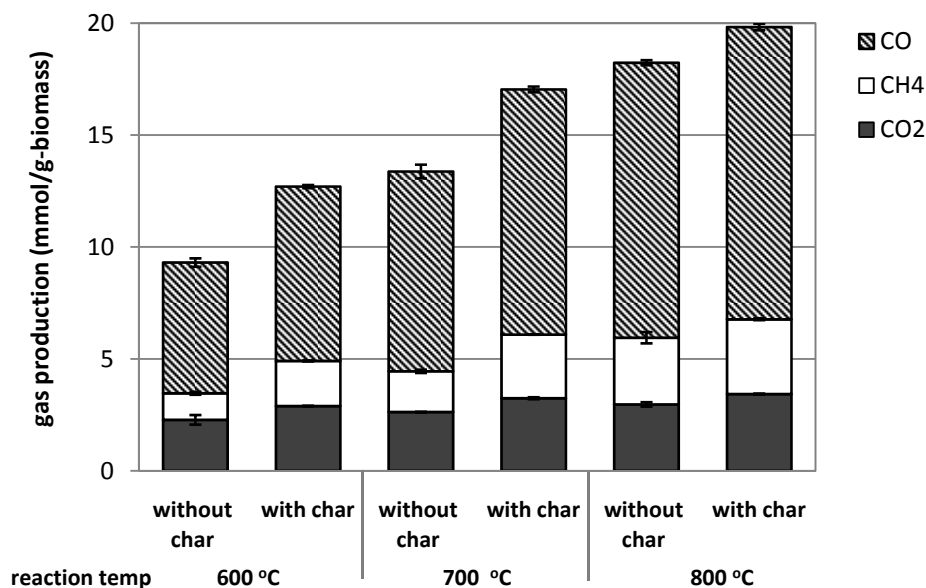
#### 4.6 ผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสและ แกซิฟิเคชัน เนื่องจากอุณหภูมิสามารถกำหนดการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปพบว่าที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มากขึ้น และทาร์ลดลง สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 600 – 800 องศาเซลเซียส จากการศึกษาผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 600 องศาเซลเซียส เป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทั้งกรณีมีซาร์ และไม่มีซาร์ ในกรณีมีซาร์ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 34.5 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล เป็น 53.9 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลงทั้งกรณีมีซาร์และไม่มีซาร์ และพบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความร้อนมีผลต่อการแตกตัวของทาร์มากกว่าผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของซาร์ เนื่องจากการแตกตัวของทาร์เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์นั้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนสามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง (Gilbert et al., 2009)

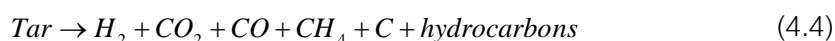


รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 600 – 800 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

ผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อสัดส่วนแก๊สแต่ละชนิด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 600 องศาเซลเซียส เป็น 800 องศาเซลเซียส ในกรณีที่มีชาร์ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 7.8 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล เป็น 13.1 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล ปริมาณมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 2.0 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล เป็น 3.3 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล และคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มจาก 2.9 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล เป็น 3.4 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและทาร์กลายเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ดังสมการที่ 4.4 และ 4.5 และอุณหภูมิตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียสยังสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวลและปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ดังสมการที่ 4.3 และ 4.1 ทำให้มีเทนเพิ่มสูงขึ้น (Lee et al., 2006)



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน 600 – 800 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส



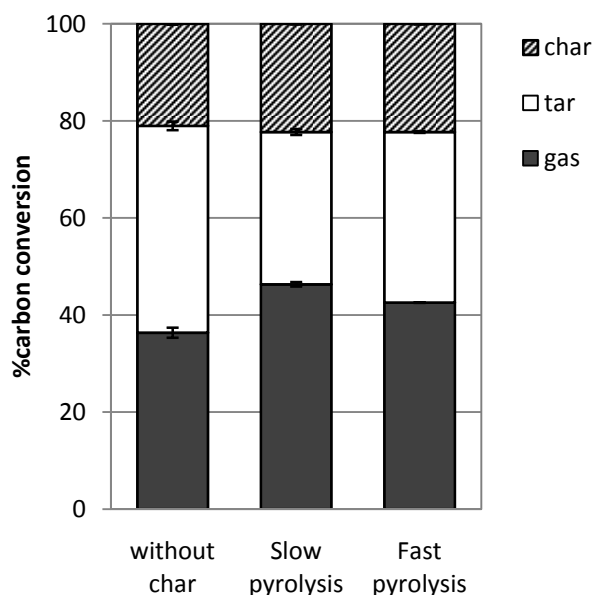
#### 4.7 ผลของตัวแปรในการเตรียมชาร์ (วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว และอุณหภูมิ)

##### 4.7.1 ผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว

วิธีการไพโรไลซิสถือว่าเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์ที่ได้ ซึ่งการไพโรไลซิสแบบช้าให้ชาร์ที่มีโครงสร้างรูพรุนน้อยกว่าการไพโรไลซิสแบบเร็ว เนื่องจากการไพโรไลซิสแบบเร็วนั้น เป็นการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว จะได้ชาร์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Okumura et al.,2009) ในงานวิจัยนี้จึงได้



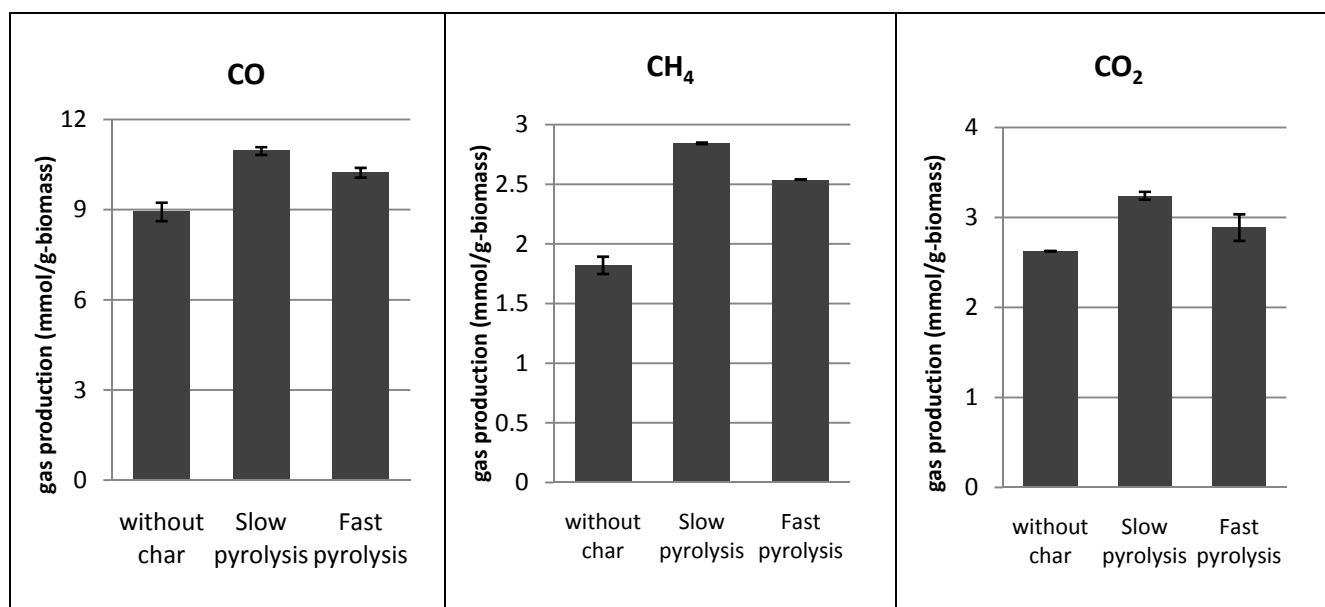
ศึกษาผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ต่อการเร่งปฏิกิริยาของซาร์ในไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ซาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.9 แสดงผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีมีซาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้ากับกรณีไม่มีซาร์ พบว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ในกรณีที่มีซาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 36.4 เป็นร้อยละ 46.3 เทียบกับกรณีที่ไม่มีซาร์ ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลงจากร้อยละ 42.6 เป็นร้อยละ 31.4 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีซาร์จากไพโรไลซิสแบบเร็วกับกรณีที่ไม่มีซาร์ พบว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 42.6 ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลงเป็นร้อยละ 35.1 จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ซาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าให้ร้อยละการเปลี่ยนของ

คาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ มากกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค BET ของชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็วทั้งก่อนและหลังใช้พบว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าก่อนใช้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Chen et al., 2012) แต่เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของชาร์หลังใช้พบว่า ชาร์จากการไพโรไลซิสทั้งสองวิธีมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง ซึ่งชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลงมากกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า เนื่องจากการไพโรไลซิสแบบเร็วนั้นเป็นการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่ชีวมวล ทำให้การปลดปล่อยสารระเหยเกิดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนของชาร์ที่ได้ไม่แข็งแรง เมื่อนำไปใช้จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ง่าย ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนหลังใช้ลดลงมากกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า ซึ่งการลดลงของพื้นที่ผิวส่งผลให้ปริมาณของพื้นที่ที่ว่างไว้ต่อการเกิดปฏิกิริยา (active sites) ลดลง ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าจึงให้ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาดีกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว



รูปที่ 4.10 ผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สใน

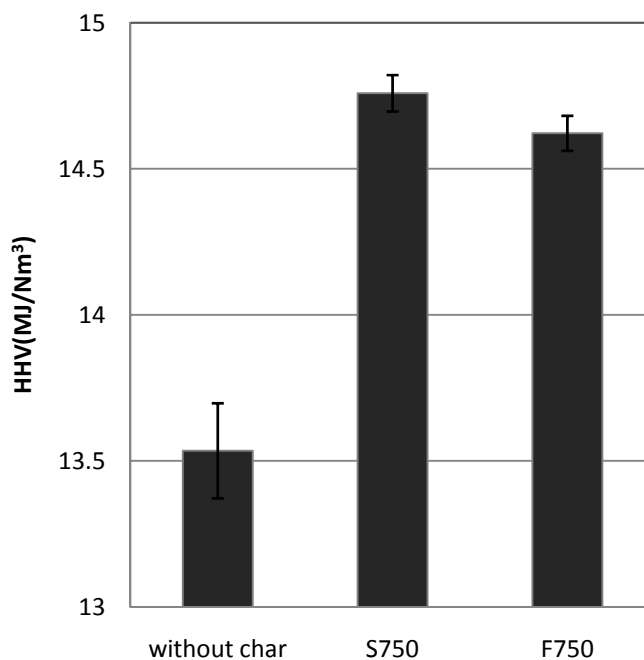
ไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิส

ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

ผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ในไฮโดรแกซิฟิเคชันแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าการไพโรไลซิสแบบช้าให้คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ 10.60, 2.84, 3.24 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล ตามลำดับ ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าการไพโรไลซิสแบบเร็ว เป็นการยืนยันได้ว่าซาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า สนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทาร์ ปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชันได้ดีกว่าซาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว

เมื่อพิจารณาค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) (Zhang et al., 2011) ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากกระถินยักษ์ โดยใช้ซาร์จากการไพโรไลซิสด้วยวิธีต่างกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.11 พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ใช้ซาร์กับกรณีใช้ซาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า และการไพโรไลซิสแบบเร็ว เตรียมที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อมีซาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส (S750) ให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้เพิ่มสูงขึ้นจาก 13.53 เป็น 14.76 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้เนื่องมาจากซาร์ช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของทาร์ ทำให้มีผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้น ช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีองค์ประกอบของมีเทนเพิ่มขึ้นซึ่งได้แสดงในส่วนของผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของซาร์จากชีวมวลในไฮโดรแกซิฟิเคชัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า และการไพโรไลซิสแบบเร็วต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส พบว่าซาร์ที่เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้าให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงกว่าซาร์ที่เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบเร็ว เนื่องจากซาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าให้ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากกระถินยักษ์ได้ดีกว่าซาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค BET เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของซาร์จากการไพโรไลซิสหลังใช้พบว่า ซาร์จากการไพโรไลซิสทั้งสองวิธีมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง ซึ่งซาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วมียพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลงมากกว่าซาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า ซึ่งการลดลงของพื้นที่ผิวจะทำให้มีปริมาณของพื้นที่ที่ว่างไว้ต่อการเกิดปฏิกิริยา (active sites) ลดลง ซาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าจึงให้ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตก

ตัวของทาร์เป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส ปฏิกริยาไฮโดรแกซีฟิเคชัน และปฏิกริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรจิเนชัน ได้ดีกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้น และผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีมีเทนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น

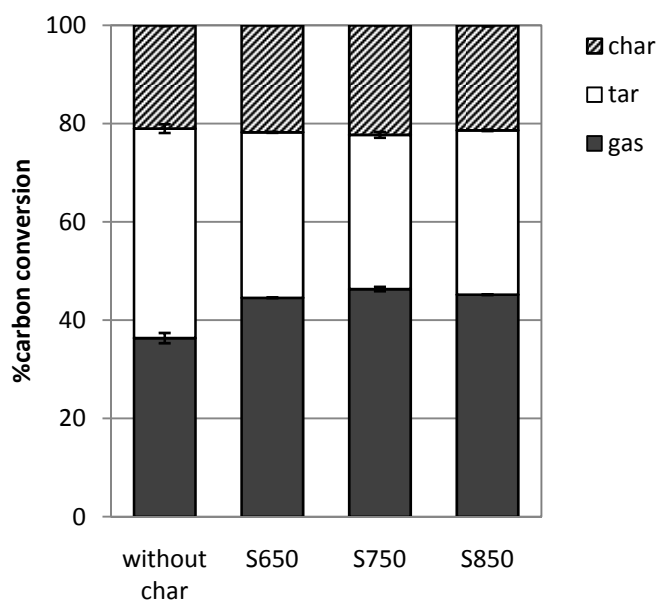


รูปที่ 4.11 ผลของวิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว ต่อค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ในไฮโดรแกซีฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

#### 4.7.2 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส

จากการทดสอบประสิทธิภาพของชาร์ที่เตรียมจากการไพโรไลซิสแบบช้า ที่อุณหภูมิ 650, 750 และ 850 องศาเซลเซียส พิจารณาผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิส จาก 650 เป็น 750 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลง แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิส

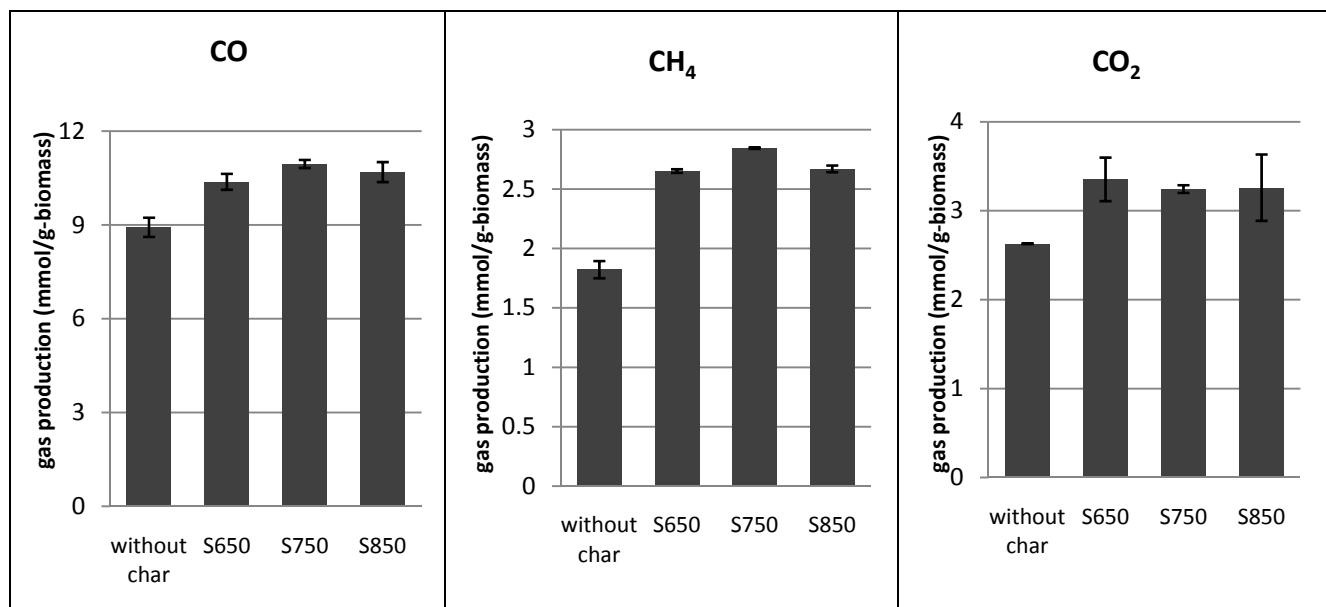
จะส่งผลให้ชาร์มีประสิทธิภาพในการแตกตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสสูงขึ้นทำให้การปล่อยสารระเหยเกิดได้ดีขึ้น ทำให้โครงสร้างรูพรุนของชาร์เพิ่มขึ้น และมีความหนาของผนังรูพรุนลดลง (Gilbert et al., 2009) แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการไพโรไลซิสเป็น 850 องศาเซลเซียสทำให้ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลง และมีปริมาณร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการไพโรไลซิสเป็น 850 องศาเซลเซียส ทำให้โครงสร้างของชาร์มีรูพรุนลดลง เนื่องจากโครงสร้างของชาร์เกิดการสลายตัวทางความร้อน (Guerrero et al.,2005 และ Min et al.,2011)



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์  
ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า

ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส ต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส  
ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ  
ไพโรไลซิสจาก 650 เป็น 750 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทนเพิ่มขึ้น  
เป็นการยืนยันได้ว่าชาร์จากการไพโรไลซิสที่ 750 องศาเซลเซียส สนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาการ

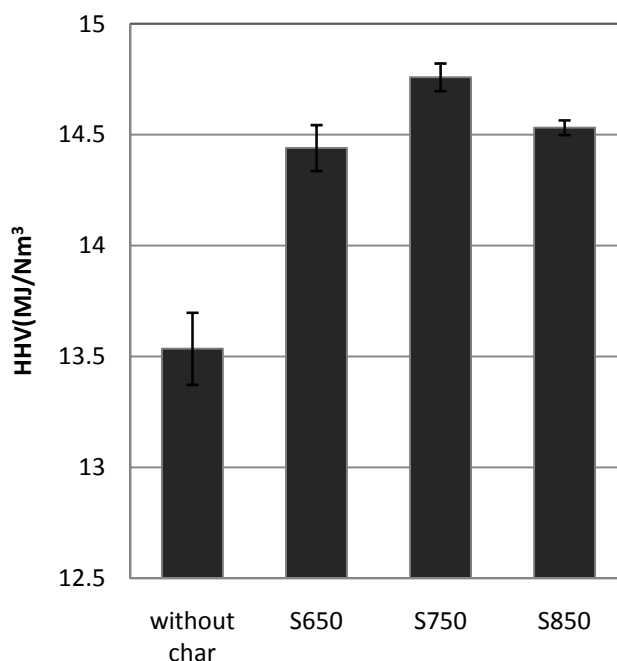
สลายตัวทาร์ ปฏิกริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชัน ได้ดีกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 650 และ 850 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิการไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า

เมื่อพิจารณาค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากกระถินยักษ์ โดยใช้ชาร์จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 650, 750 และ 850 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสจาก 650 เป็น 750 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสจาก 650 เป็น 750 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ชาร์มีประสิทธิภาพในการแตกตัวทาร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากชาร์มีโครงสร้างรูพรุนเพิ่มขึ้น อธิบายได้จากผลวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชาร์ด้วยเทคนิค SEM ดังตารางที่ 4.4 และผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนดังตารางที่ 4.6 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสเป็น 850 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างชาร์ที่มีพื้นที่ผิวต่ำลงจากการสลายตัวทางความร้อน ทำ

ให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จึงมีปริมาณลดลง และมีองค์ประกอบของมีเทนลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง

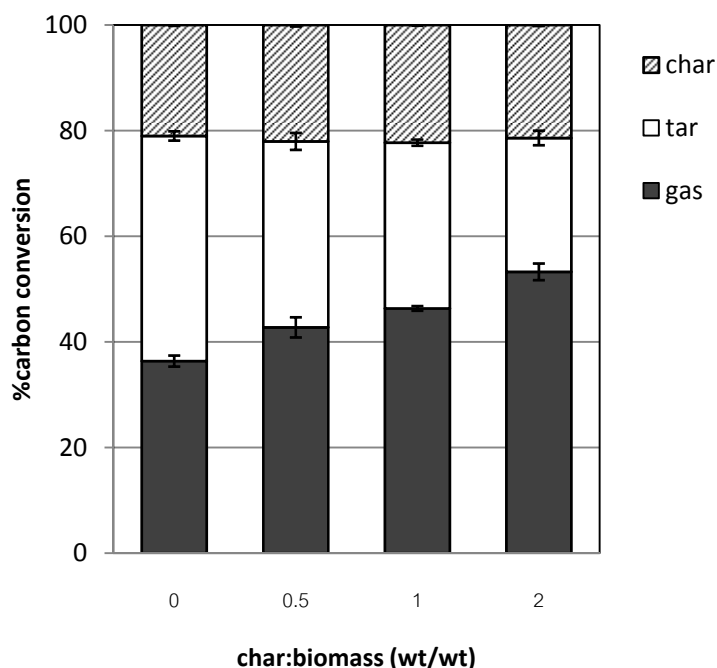


รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อค่าความร้อน (High Heating Value, HHV) ของผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า

#### 4.8 ผลของอัตราส่วนของชาร์ต่อชีวมวล

ผลของอัตราส่วนของชาร์ต่อชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยใช้ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของชาร์ต่อชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 2 ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 42.8 มิลลิโมลต่อกรัม ชีวมวล เป็น 53.3 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล และร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลงจาก 35.2 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล เป็น 25.3 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล เนื่องจากปริมาณชาร์ที่มากขึ้นทำให้มีปริมาณของพื้นที่ที่ว่างไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (active sites) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้

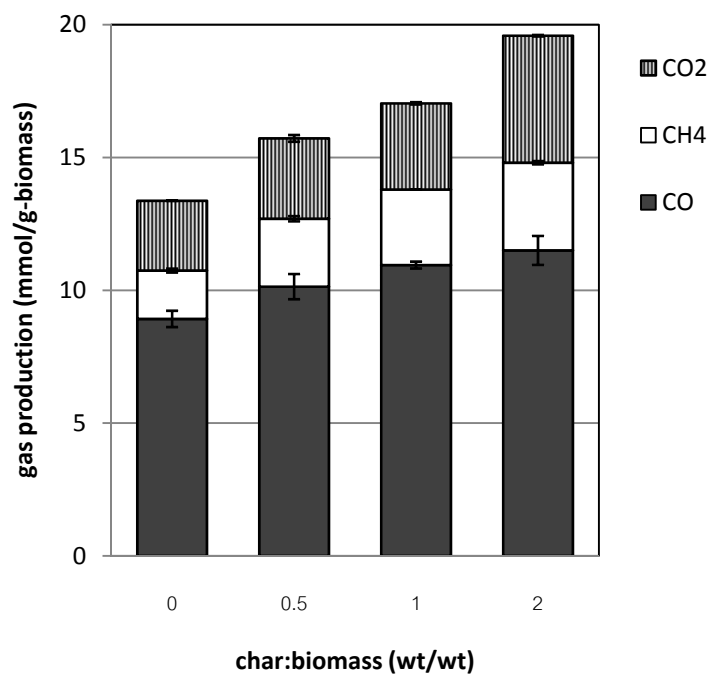
ประสิทธิภาพในการแตกตัวทาร์และไฮโดรคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น (Haibo et al., 2010)



รูปที่ 4.15 ผลของอัตราส่วนของชาร์ต่อชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

ผลของอัตราส่วนของชาร์ต่อชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.16 เมื่ออัตราส่วนของชาร์ต่อชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 2 ทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น (Afif et al., 2011) เป็นการยืนยันได้ว่าเมื่อมีปริมาณชาร์เพิ่มขึ้น สามารถช่วยสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวทาร์ ปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชัน





รูปที่ 4.16 ผลของอัตราส่วนของชาร์ต่อชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส  
ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชาร์เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า  
ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล โดยจะศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากไพโรไลซิสที่ภาวะต่างๆต่อไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล และผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดำเนินการต่างๆ ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจน, อุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน, วิธีเตรียมชาร์โดยการไพโรไลซิสแบบช้าและการไพโรไลซิสแบบเร็ว, อุณหภูมิของการเตรียมชาร์ และอัตราส่วนของชาร์ต่อชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์และปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลของไฮโดรเจน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาวะที่มีการป้อนไฮโดรเจนกับภาวะที่ไม่มีการป้อนไฮโดรเจน พบว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนทั้งสองภาวะไม่แตกต่างกัน ดังนั้นไฮโดรเจนไม่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นผลิตภัณฑ์ แก๊ส ทาร์ และชาร์ แต่จะส่งผลต่อปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยเมื่อมีการป้อนไฮโดรเจน พบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ปริมาณมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์เปลี่ยนเป็นมีเทน

##### 5.1.2 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลในไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวล

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ใช้ชาร์ กับกรณีใช้ชาร์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน พบว่าเมื่อใช้ชาร์ให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 36.4 เป็นร้อยละ 46.3 ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลงจากร้อยละ 42.6 เป็นร้อยละ 31.4 แสดงให้เห็นว่าชาร์สามารถช่วยสนับสนุนหรือเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ (Tar cracking) และพบว่า

กรณีที่มีชาร์ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น จาก 8.9 เป็น 11.0 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล และมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 1.8 เป็น 2.8 มิลลิโมลต่อกรัมชีวมวล แสดงให้เห็นว่าชาร์ยังช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหย และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชันด้วย

### 5.1.3 ผลของอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน

เมื่ออุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชันเพิ่มขึ้นจาก 600 องศาเซลเซียส เป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทั้งกรณีที่มีชาร์ และไม่มีชาร์ ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลงทั้งสองกรณี และพบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความร้อนมีผลต่อการแตกตัวของทาร์มากกว่าผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์ เนื่องจากการแตกตัวของทาร์เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์นั้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน สามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง และพบว่าอุณหภูมิมิผลต่อสัดส่วนแก๊สแต่ละชนิด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นยังสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชันของสารระเหยจากชีวมวลและปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจีเนชัน ทำให้มีเทนเพิ่มสูงขึ้น

### 5.1.4 ผลของตัวแปรในการเตรียมชาร์ (วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็วและอุณหภูมิ)

#### 5.1.4.1 วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว

พบว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ มากกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค BET ทั้งก่อนและหลังใช้ พบว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าก่อนใช้ มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชาร์ไพโรไลซิสแบบเร็ว แต่เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของชาร์หลังใช้พบว่า ชาร์จากการไพโรไลซิสทั้งสองวิธีมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง ซึ่งชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลงมากกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า และพบว่าการไพโรไลซิสแบบช้าให้คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และ

คาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มขึ้นมากกว่าการไพโรไลซิสแบบเร็ว ดังนั้นชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า สนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทาร์ ปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกิริยา คาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชันได้ดีกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว ในส่วนของค่าความร้อน ของผลิตภัณฑ์แก๊สพบว่า ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้า ให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส มากกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว

#### 5.4.1.2 อุณหภูมิไพโรไลซิส

พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิส จะส่งผลให้ชาร์มีประสิทธิภาพในการ แยกตัวทาร์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสจาก 650 เป็น 750 องศาเซลเซียส ร้อยละการ เปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการไพโรไลซิสสูงขึ้นเป็น 850 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของ คาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลง และร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์เพิ่มขึ้น ซึ่ง สอดคล้องกับโครงสร้างของชาร์ที่มีพื้นที่ผิวต่ำลงจากการเสื่อมสภาพทางความร้อน และพบว่าเมื่อ เพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสจาก 650 เป็น 750 องศาเซลเซียส ทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เพิ่มขึ้น เป็นการยืนยันได้ว่าชาร์จากการไพโรไลซิสที่ 750 องศาเซลเซียส สนับสนุนการ เกิดปฏิกิริยาการแยกตัวทาร์ ปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดร จิเนชันได้ดีกว่าชาร์จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 650 และ 850 องศาเซลเซียส และพบว่าชาร์จาก การไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สสูงสุดที่ 14.76 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร

#### 5.1.5 ผลของอัตราส่วนของชาร์ต่อชีวมวล

พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของชาร์ต่อชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 2 ทำให้ร้อยละ การเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ ลดลง นอกจากนี้พบว่า คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อ อัตราส่วนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าชาร์สามารถช่วยสนับสนุนหรือเร่งปฏิกิริยาการ สลายตัวทาร์ ปฏิกิริยาไฮโดรแกซิฟิเคชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรจิเนชัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิในส่วนของไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) ต่อดองค์ประกอบของสารระเหยที่จะเข้าไปสู่ส่วนของไฮโดรแกซิฟิเคชัน (Hydrogasification zone)
2. ศึกษาผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชันโดยศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊ส หรือ ความสูงของเบด
3. ศึกษาอิทธิพลของโลหะบนชาร์ตต่อผลเชิงเร่งปฏิกิริยา

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

โครงการประเทศสีเขียว. กระถินยักษ์[ออนไลน์].2551แหล่งที่มา: <http://www.greencoun.com>  
[2556, มกราคม 8].

นคร ทิพย์วงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพมหานคร :สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2552.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ศักยภาพของพลังงานชีวมวลในประเทศไทย. [ออนไลน์].  
แหล่งที่มา: <http://www.aoe.go.th> [2556, มกราคม 7].

### ภาษาอังกฤษ

Afif, E., Azadi, P. and Farnood, R. Catalytic hydrothermal gasification of activated  
sludge. Environmental 105 (2011): 136-143

Bansal, R.C., Donner, J.B. and Stoecki, F. Active Carbon, New York : Marcel Dekker,  
1988

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

Brownsort, P. Biomass pyrolysis processes : Performance parameters and their  
influence on biochar system benefits. Master's Thesis, Department of  
Chemistry, Faculty of Science, University of Edinburgh, 2009

Carmen, E. Carbon cycle [online]. 2008. Available from  
:[http://global.britannica.com/EBchecked/media/118423/The-generalized-carbon-](http://global.britannica.com/EBchecked/media/118423/The-generalized-carbon-cycle)  
cycle [2013, January 10].

Chen, C., et al. Effect of pyrolysis conditions on the char gasification with mixtures of  
CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O. Combustion Institute 34 (2013): 2453-2460

- Gilbert, P., Ryu, C., Sharifi, V. and Swithenbank, J. Tar reduction in pyrolysis vapours from biomass over a hot char bed. Bioresources Technology 100 (2009): 6045–6051.
- Gomez-Barea, A., Ollero, P. and Leckner, B. Optimization of char and tar conversion in fluidized bed biomass gasifiers. Fuel 103 (2013): 42-52
- Guerrero, M., Ruiz, M.P., Alzueta, M.U., Bilbao, R. and Millera, A. Pyrolysis of eucalyptus at different heating rates: studies of char characterization and oxidative reactivity. J. Anal. Appl. Pyrolysis 74 (2005): 307–314
- Hassler, J.W. Publication with activated carbon, New York : Marcel Dekker, Inc, 1974
- Haibo, L., Tianhu, C., Xianlong, Z., Jinhu, L., Dongyin, C. and Lei, S. Effect of additives on catalytic cracking of biomass gasification tar over a nickel-based catalyst. Chin. J. Catal 31 (2010): 409–414
- Jeon, K., Park, C.S., Hackett, C.E. and Norbeck, J.M. Characteristics of steam hydrogasification of wood using a micro-batch reactor. Fuel 86 (2007): 2817–2823
- Kohan, S.M. and Barkodor, D.M. Mission analysis for federal fuel from biomass program vol IV. Thermalchemical conversion of biomass of fuels and chemistry, chapter VI, Production of oil and char pyrolysis of wood : Elsevier. 1979
- Lee, S.H., Lee, J.G., Kim, J.H. and Choi, Y.C. Hydrogasification characteristics of bituminous coals in an entrained-flow hydrogasifier. Fuel 85 (2006): 803-806.
- Laohalidanond, K. The production of synthetic diesel from biomass. CMU. J. Nat. Sci 6 (2007) :127-139

- Meyer, J. leucaenalencocephala [online]. 2007. Available from :<http://www.herbier-tahiti.pf> [2013, January 14].
- Min, F., Zhang, M., Zhang, Y., Cao, Y. and Pan, W. An experimental investigation into the gasification reactivity and structure of agricultural waste chars. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 92 (2011): 250–257
- Mozaffarian, H. and Zwart, R. Feasibility of SNG production by biomass hydrogasification. Energy Research Centre of the Netherlands, ECN, 2002.
- Okumura, Y., Hanaoka, T. and Sakanishi, K. Effect of pyrolysis conditions on gasification reactivity of woody biomass-derived char. Combustion Institute 32 (2009): 2013–2020
- Onay, O. Influence of pyrolysis temperature and heating rate on the production of bio-oil and char from safflower seed by pyrolysis, using a well-swept fixed-bed reactor. Fuel Processing Technology 88 (2007): 523–531
- Sun, Q., Yu, S., Wang, F. and Wang, J. Decomposition and gasification of pyrolysis volatiles from pine wood through a bed of hot char. Fuel 90 (2011): 1041–1048
- Yang, C., et al. Utilization of CO<sub>2</sub> and biomass char derived from pyrolysis of *Dunaliella salina*: The effects of steam and catalyst on CO and H<sub>2</sub> gas production. Bioresource Technology 110 (2012): 676–681
- Zhang, A., Kaiho, M., Yasuda, H., Zabat, M., Nakano, K. and Yamada, O. Fundamental studies on hydrogasification of Taiheiyō coal. Energy 30 (2005): 2243–2250
- 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

### วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวล

#### 1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

##### 1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

###### วิธีการทดลอง

- 1) อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ (desiccator) ทิ้งไว้ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก
- 2) ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียม
- 3) นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง
- 4) ชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายใน บันทึกผล

###### สูตรการคำนวณ

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

เมื่อ  $M$  = ความชื้น (%)

$W_1$  = น้ำหนักของตัวอย่างรวมน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาก่อนอบ (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักของตัวอย่างรวมน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาลังอบ (กรัม)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

##### 1.2 เถ้า (Ash): ASTM D3174

###### วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชีเบิลพร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักครุชีเบิลพร้อมฝา

- 2) ชั่งตัวอย่าง 1 กรัมใส่ครุชชีเบล
- 3) เผาครุชชีเบลที่มีตัวอย่างบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด
- 4) ใส่ครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 5) นำครุชชีเบลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ

A =            ถ้ำ (%)

$W_3$  =           น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาที่มีถ้ำ (กรัม)

$W_4$  =           น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา (กรัม)

W =            น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

### 1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM D3175

#### วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ในครุชชีเบลแล้วปิดฝา
- 2) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยนำครุชชีเบลอยู่เหนือปากเตาเผา 3 นาที
- 3) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยนำครุชชีเบลอยู่บริเวณปากเตา 3 นาที
- 4) ให้ความร้อนบริเวณกึ่งกลางเตา ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส 6 นาที
- 5) ทิ้งครุชชีเบลไว้ให้เย็น แล้วนำไปชั่งและบันทึกผล

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ  $V =$  สารระเหย (%)

$W_5 =$  น้ำหนักตัวอย่างรวมน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝากับก่อนเผา (กรัม)

$W_6 =$  น้ำหนักตัวอย่างรวมกับน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาลังเผา (กรัม)

$W =$  น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

#### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ  $A =$  ร้อยละของเถ้า

$V =$  ร้อยละของสารระเหย

$M =$  ร้อยละของความชื้น

## ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส

### การวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟียี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC - 2014 Gas chromatograph (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

### รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

#### 1) แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติคือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

#### 2) คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสาร เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วนๆ ดังนั้นโครมาโตแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์

### 3) ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือ ส่วนที่สามารถบ่งบอกในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นๆที่แตกต่างไปจากแก๊สพา ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงเป็นเครื่องที่มีความสามารถสัญญาณกับสารต่างๆในลักษณะเฉพาะ และมีสภาพไวเพียงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง (High sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (Selectivity)
- ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณในช่วงความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง
- มีเสถียรภาพ (Stability) และความเที่ยง (Reproducibility)

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ ทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณ

#### 1. หาอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเข้าท่อชั้นในและชั้นนอก

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อชั้นใน 8.8 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อชั้นใน 10.0 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อชั้นนอก 18.8 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อชั้นนอก 20.2 มิลลิเมตร

ความเร็ว/พื้นที่หน้าตัด =  $\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}}/A_{\text{ท่อชั้นใน}} = \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}}/A_{\text{ท่อชั้นนอก}}$

เพราะฉะนั้น  $\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}}/\text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} = A_{\text{ท่อชั้นใน}}/A_{\text{ท่อชั้นนอก}}$

$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}}/\text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} = \pi r_{\text{ท่อชั้นใน}}^2/\pi r_{\text{ท่อชั้นนอก}}^2$$

$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}}/\text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} = \pi (4.4)^2/\pi [(9.4)^2 - (5)^2]$$

จะได้  $\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} = 0.305\text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}}$

#### 2. ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

กรณีไม้กระถินยักษ์ + ชาร์ เตรียมโดยการไพโรไลซิสแบบใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 750 องศาเซลเซียส

ซึ่งน้ำหนักไม้กระถินยักษ์ 0.500 กรัม

อุณหภูมิในโซนที่ 1 (ไพโรไลซิส) 700 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิในโซนที่ 2 (ไฮโดรแกซิฟิเคชัน) 700 องศาเซลเซียส

คาร์บอนในไม้กระถินยักษ์ 44.124 wt% (as receive)

เพราะฉะนั้นน้ำหนักคาร์บอนในไม้กระถินยักษ์ =  $0.500 \times 44.124/100 = 0.2206$  กรัม

น้ำหนักคาร์บอนที่ได้จากการทดลอง 0.0895 กรัม

คาร์บอนในชาร์ (C-char) 55.170 wt% (as receive)

เพราะฉะนั้นน้ำหนักคาร์บอนในชาร์ =  $0.0895 \times 55.170 / 100 = 0.0494$  กรัม

คาร์บอนในแก๊สที่ได้จากการทดลอง ( $\text{CO} + \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ) = 0.1029 กรัม

ฉะนั้นน้ำหนักคาร์บอนในชาร์ = น้ำหนักคาร์บอนในไม้กระถินยักษ์ - (น้ำหนักในชาร์ + น้ำหนักคาร์บอนในแก๊ส)

$$= 0.2206 - (0.0495 + 0.1029)$$

$$= 0.0682 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนคิดเป็น

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊ส} = (0.1029 / 0.2206) \times 100 = 46.64$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์} = (0.0495 / 0.2206) \times 100 = 22.44$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์} = (0.0682 / 0.2206) \times 100 = 30.92$$

### 3. การหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด (gas production)

3.1 หาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชันโดยใช้ชาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กรณีไม้ป้อนชีวมวล (หาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดจากชาร์)

#### ครั้งที่ 1

ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าที่ 750 องศาเซลเซียส 0.500 กรัม

อุณหภูมิในโซนที่ 1 (ไพโรไลซิส) 700 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิในโซนที่ 2 (ไฮโดรแกซิฟิเคชัน) 700 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 110 มิลลิลิตรต่อนาที

อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 10 มิลลิลิตรต่อนาที

อัตราการไหลของแก๊สรวม 120 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลาที่เก็บแก๊สทุก 15 นาที บรรจุในถุงเก็บแก๊ส เป็นเวลา 60 นาที

ปริมาตรแก๊สในถุงเก็บแก๊ส 1 ถุง เท่ากับ 1800 มิลลิลิตร



ตาราง ค1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard)

ชนิดแก๊ส	area	% balance in N <sub>2</sub>
H <sub>2</sub>	37320.4	1.00
CO	1936.2	1.00
CH <sub>4</sub>	7317.5	1.00
CO <sub>2</sub>	2756.0	1.00

ตาราง ค2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง

1) ถังที่ 1 (15 นาทีแรก)

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
CO	33.0	0.0170	0.3068	0.0125
CH <sub>4</sub>	271.5	0.0371	0.6679	0.0273
CO <sub>2</sub>	563.5	0.2045	3.6803	0.1505

2) ถังที่ 2

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
CO	17.5	0.0090	0.1627	0.0067
CH <sub>4</sub>	171.6	0.0235	0.4221	0.0173
CO <sub>2</sub>	322.6	0.1171	2.1070	0.0862

## 3) ถังที่ 3

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
CO	-	-	-	-
CH <sub>4</sub>	167.0	0.0228	0.4108	0.0168
CO <sub>2</sub>	265.4	0.0963	1.7334	0.0709

## 4) ถังที่ 4

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
CO	-	-	-	-
CH <sub>4</sub>	100.0	0.0137	0.2460	0.0101
CO <sub>2</sub>	217.6	0.0790	1.4212	0.0581

ดังนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ในเวลา 60 นาที

ชนิดแก๊ส	จำนวนโมล (mmol)
CO	0.0192
CH <sub>4</sub>	0.0714
CO <sub>2</sub>	0.3657

3.2 หาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชันโดยใช้ชาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กรณีป้อนชีวมวล

### ครั้งที่ 1

ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าที่ 750 องศาเซลเซียส 0.500 กรัม  
 น้ำหนักไม้กระถิน 0.500 กรัม  
 อุณหภูมิในโซนที่ 1 (ไพโรไลซิส) 700 องศาเซลเซียส  
 อุณหภูมิในโซนที่ 2 (ไฮโดรแกซิฟิเคชัน) 700 องศาเซลเซียส  
 อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 110 มิลลิลิตรต่อนาที  
 อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 10 มิลลิลิตรต่อนาที  
 อัตราการไหลของแก๊สรวม 120 มิลลิลิตรต่อนาที  
 เวลาที่เก็บแก๊สทุก 15 นาที บรรจุในถุงเก็บแก๊ส เป็นเวลา 60 นาที  
 ปริมาตรแก๊สในถุงเก็บแก๊ส 1 ถุง เท่ากับ 1800 มิลลิลิตร

ตาราง ค3 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง

#### 1) ถุงที่ 1 (15 นาทีแรก)

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถุง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
CO	14334.9	7.4754	134.5579	5.5025
CH <sub>4</sub>	14308.7	1.9392	34.9054	1.4274
CO <sub>2</sub>	7080.6	2.4030	43.2535	1.7688

#### 2) ถุงที่ 2

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถุง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
CO	41.4	0.0214	0.3858	0.0158
CH <sub>4</sub>	333.5	0.0452	0.8136	0.0333
CO <sub>2</sub>	400.3	0.1359	2.4453	0.1000

## 3) ถังที่ 3

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
CO	39.4	0.0250	0.3698	0.0151
CH <sub>4</sub>	166.2	0.0225	0.4054	0.0166
CO <sub>2</sub>	234.6	0.0796	1.4331	0.0586

## 4) ถังที่ 4

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
CO	29.8	0.0155	0.2797	0.0114
CH <sub>4</sub>	108.6	0.0147	0.2649	0.0108
CO <sub>2</sub>	293.7	0.0997	1.7941	0.0734

ดังนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ในเวลา 60 นาที

ชนิดแก๊ส	จำนวนโมล (mmol)	แก๊สจากซาร์(mmol)	หักลบแก๊สจากซาร์ (mmol)	จำนวนโมล/น้ำหนักชีว มวล (mmol/g biomass)
CO	5.5449	0.0192	5.5307	11.0614
CH <sub>4</sub>	1.4881	0.0714	1.4167	2.8334
CO <sub>2</sub>	2.0007	0.3657	1.6350	3.2700

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

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

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

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส โดยใช้ชาร์จากการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส	ร้อยละโดยปริมาตร
คาร์บอนมอนอกไซด์	64.36
มีเทน	16.55
คาร์บอนไดออกไซด์	19.08

$$HHV(MJ/Nm^3) = \frac{[12.63(64.36) + 39.82(16.55)]}{100}$$

ค่าความร้อน = 14.71 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร

**ภาคผนวก ง**  
**ข้อมูลการทดลอง**

ตาราง ง1 ข้อมูลการทดลองผลของปริมาณไฮโดรเจนที่ภาวะอุณหภูมิในส่วนของไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์

	แก๊ส (mmol/g biomass)				ทาร์ (mmol/g biomass)				ชาร์ (mmol/g biomass)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
Ar	44.933	45.793	45.363	0.608	33.136	32.376	32.756	0.537	21.931	21.831	21.881	0.071
Ar+H <sub>2</sub>	45.001	43.931	44.466	0.757	33.343	34.738	34.041	0.986	21.656	21.331	21.493	0.229

ตาราง ง2 ข้อมูลการทดลองผลของปริมาณไฮโดรเจนที่ภาวะอุณหภูมิในส่วนของไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิไฮโดรแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส ต่อบริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

	CO (mmol/g biomass)				CH <sub>4</sub> (mmol/g biomass)				CO <sub>2</sub> (mmol/g biomass)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
Ar	10.666	10.846	10.756	0.127	2.559	2.365	2.462	0.137	3.296	3.627	3.462	0.234
Ar+H <sub>2</sub>	10.054	10.041	10.047	0.009	2.854	2.840	2.847	0.010	3.639	3.273	3.639	0.259

ตาราง ง3 ข้อมูลการทดลองผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
Without char	600°C	แก๊ส	25.384	25.232	25.308	0.108
		ทาร์	54.204	54.063	54.134	0.100
		ชาร์	20.412	20.706	20.559	0.208
With char (slow pyrolysis 750 °C)	600°C	แก๊ส	34.668	34.411	34.540	0.181
		ทาร์	43.151	43.583	43.367	0.305
		ชาร์	22.181	22.006	22.094	0.124
Without char	700°C	แก๊ส	35.633	37.105	36.369	1.041
		ทาร์	43.245	41.993	42.619	0.885
		ชาร์	21.122	20.902	21.011	0.156
With char (slow pyrolysis 750 °C)	700°C	แก๊ส	46.659	46.021	46.340	0.450
		ทาร์	30.960	31.798	31.379	0.592
		ชาร์	22.381	22.181	22.281	0.141
Without char	800°C	แก๊ส	49.126	50.035	49.581	0.643
		ทาร์	30.119	29.039	29.579	0.764
		ชาร์	20.754	20.926	20.840	0.121
With char (slow pyrolysis 750 °C)	800°C	แก๊ส	54.079	53.763	53.921	0.223
		ทาร์	24.665	24.881	24.773	0.153
		ชาร์	21.256	21.356	21.306	0.071

ตาราง ง4 ข้อมูลการทดลองผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของชาร์จากชีวมวลต่อปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิใน กระบวนการ ไฮโดรแกซิฟิเคชัน	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
Without char	600°C	CO	5.974	5.708	5.841	0.1884
		CH <sub>4</sub>	1.232	1.141	1.187	0.064
		CO <sub>2</sub>	2.127	2.429	2.278	0.213
With char (slow pyrolysis 750 °C)	600°C	CO	7.840	7.742	7.790	0.069
		CH <sub>4</sub>	2.000	2.030	0.015	0.021
		CO <sub>2</sub>	2.907	2.882	2.894	0.018
Without char	700°C	CO	8.707	9.142	8.924	0.308
		CH <sub>4</sub>	1.770	1.872	1.821	0.072
		CO <sub>2</sub>	2.625	2.629	2.627	0.002
With char (slow pyrolysis 750 °C)	700°C	CO	11.042	10.861	10.952	0.129
		CH <sub>4</sub>	2.840	2.848	2.844	0.006
		CO <sub>2</sub>	3.273	3.212	3.243	0.043
Without char	800°C	CO	12.361	12.203	12.282	0.112
		CH <sub>4</sub>	2.801	3.158	2.979	0.252
		CO <sub>2</sub>	2.902	3.038	2.970	0.096
With char (slow pyrolysis 750 °C)	800°C	CO	13.157	12.953	13.055	0.144
		CH <sub>4</sub>	3.314	3.370	3.342	0.040
		CO <sub>2</sub>	3.413	3.445	3.429	0.022



ตาราง 5 ข้อมูลการทดลองผลของตัวแปรในการเตรียมชาร์ วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว และ อุณหภูมิ ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

ตัวแปรในการเตรียมชาร์	อุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน	ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
Slow pyrolysis 650 °C	600°C	แก๊ส	32.214	31.318	31.766	0.634
		ทาร์	46.079	47.326	46.703	0.882
		ชาร์	21.706	21.356	21.531	0.248
Slow pyrolysis 650 °C	700°C	แก๊ส	44.549	44.568	44.558	0.014
		ทาร์	33.620	33.776	33.700	0.110
		ชาร์	21.831	21.656	21.743	0.124
Slow pyrolysis 650 °C	800°C	แก๊ส	52.030	52.704	52.367	0.477
		ทาร์	26.915	25.940	26.427	0.689
		ชาร์	21.056	21.356	21.206	0.212
Slow pyrolysis 750 °C	600°C	แก๊ส	34.668	34.411	34.540	0.181
		ทาร์	43.151	43.582	43.367	0.305
		ชาร์	22.181	22.006	22.094	0.124
Slow pyrolysis 750 °C	700°C	แก๊ส	46.659	46.659	46.340	0.450
		ทาร์	30.960	31.798	31.379	0.592
		ชาร์	22.381	22.181	22.281	0.141
Slow pyrolysis 750 °C	800°C	แก๊ส	54.079	53.763	53.921	0.223
		ทาร์	24.665	24.881	24.773	0.153
		ชาร์	21.526	21.355	21.306	0.070
Slow pyrolysis 850 °C	600°C	แก๊ส	33.005	32.076	32.541	0.657
		ทาร์	45.463	47.096	46.280	1.154
		ชาร์	21.531	20.828	21.179	0.497
Slow pyrolysis 850 °C	700°C	แก๊ส	45.154	45.248	45.201	0.066
		ทาร์	33.340	33.556	33.448	0.153
		ชาร์	21.506	21.196	21.351	0.219

ตาราง 5 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองผลของตัวแปรในการเตรียมซาร์ วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว และ อุณหภูมิ ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ไนไฮโดรแกซีฟิเคชัน

ตัวแปรในการเตรียมซาร์	อุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรแกซีฟิเคชัน	ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
Slow pyrolysis 850 °C	800°C	แก๊ส	52.314	49.940	51.127	1.678
		ทาร์	26.705	29.428	28.066	1.925
		ซาร์	21.506	21.196	21.351	0.219
Fast pyrolysis 650 °C	600°C	แก๊ส	29.137	28.671	28.904	0.329
		ทาร์	48.357	49.048	48.702	0.488
		ซาร์	22.506	22.281	22.394	0.159
Fast pyrolysis 650 °C	700°C	แก๊ส	39.508	41.971	40.739	1.741
		ทาร์	39.236	36.373	37.805	2.024
		ซาร์	22.506	22.281	22.394	0.283
Fast pyrolysis 650 °C	800°C	แก๊ส	48.454	48.206	48.330	0.175
		ทาร์	29.665	30.038	29.852	0.264
		ซาร์	21.881	21.756	21.818	0.088
Fast pyrolysis 750 °C	600°C	แก๊ส	30.008	29.534	29.770	0.337
		ทาร์	48.736	49.113	48.925	0.266
		ซาร์	21.256	21.356	21.306	0.071
Fast pyrolysis 750 °C	700°C	แก๊ส	42.606	42.551	42.579	0.039
		ทาร์	35.012	35.268	35.140	0.181
		ซาร์	22.381	22.181	22.281	0.141
Fast pyrolysis 750 °C	800°C	แก๊ส	52.252	53.953	53.103	1.203
		ทาร์	26.742	24.691	25.716	1.451
		ซาร์	22.381	22.181	22.281	0.141
Fast pyrolysis 850 °C	600°C	แก๊ส	30.331	31.294	30.812	0.681
		ทาร์	48.413	47.583	47.998	0.587
		ซาร์	21.256	21.122	21.789	0.094

ตาราง ง5 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองผลของตัวแปรในการเตรียมซาร์ วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว และ อุณหภูมิ ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

ตัวแปรในการเตรียมซาร์	อุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน	ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
Fast pyrolysis 850 °C	700°C	แก๊ส	40.355	41.134	40.744	0.551
		ทาร์	38.139	37.670	37.905	0.332
		ซาร์	21.506	21.196	21.351	0.219
Fast pyrolysis 850 °C	800°C	แก๊ส	51.867	50.508	51.188	0.961
		ทาร์	26.602	28.492	27.547	1.336
		ซาร์	21.531	21.000	21.265	0.376

ตาราง ง6 ข้อมูลการทดลองผลของตัวแปรในการเตรียมซาร์ วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว และ อุณหภูมิ ต่อปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

ตัวแปรในการเตรียมซาร์	อุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
Slow pyrolysis 650 °C	600°C	CO	7.278	7.045	7.162	0.164
		CH <sub>4</sub>	1.786	1.767	1.777	0.013
		CO <sub>2</sub>	2.781	2.703	2.742	0.055
Slow pyrolysis 650 °C	700°C	CO	10.561	10.201	10.381	0.254
		CH <sub>4</sub>	2.641	2.662	2.651	0.015
		CO <sub>2</sub>	3.179	3.524	3.352	0.244
Slow pyrolysis 650 °C	800°C	CO	12.745	12.867	12.806	0.086
		CH <sub>4</sub>	3.011	3.217	3.114	0.146
		CO <sub>2</sub>	2.902	3.038	2.970	0.096
Slow pyrolysis 750 °C	600°C	CO	7.840	7.742	7.791	0.069
		CH <sub>4</sub>	2.000	2.030	2.015	0.021
		CO <sub>2</sub>	2.907	2.881	2.894	0.018

ตาราง ง6 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองผลของตัวแปรในการเตรียมชาร์ วิธีกาโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว และ อุณหภูมิ ต่อปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

ตัวแปรในการเตรียมชาร์	อุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
Slow pyrolysis 750 °C	700°C	CO	11.041	10.861	10.952	0.127
		CH <sub>4</sub>	2.810	2.849	2.844	0.006
		CO <sub>2</sub>	3.273	3.212	3.243	0.043
Slow pyrolysis 750 °C	800°C	CO	13.157	12.953	13.055	0.144
		CH <sub>4</sub>	3.314	3.370	3.342	0.040
		CO <sub>2</sub>	3.414	3.445	3.429	0.022
Slow pyrolysis 850 °C	600°C	CO	7.450	7.117	7.283	0.236
		CH <sub>4</sub>	1.822	1.781	1.801	0.029
		CO <sub>2</sub>	2.86	2.896	2.880	0.021
Slow pyrolysis 850 °C	700°C	CO	10.918	10.465	10.691	0.320
		CH <sub>4</sub>	2.690	2.650	2.670	0.028
		CO <sub>2</sub>	2.995	3.522	3.259	0.372
Slow pyrolysis 850 °C	800°C	CO	12.939	11.891	12.415	0.741
		CH <sub>4</sub>	3.050	3.153	3.102	0.073
		CO <sub>2</sub>	3.247	3.319	3.283	0.051
Fast pyrolysis 650 °C	600°C	CO	6.873	7.005	6.939	0.093
		CH <sub>4</sub>	1.674	1.355	1.515	0.226
		CO <sub>2</sub>	2.167	2.182	2.174	0.011
Fast pyrolysis 650 °C	700°C	CO	10.036	10.529	10.253	0.348
		CH <sub>4</sub>	2.236	2.320	2.278	0.059
		CO <sub>2</sub>	2.544	2.584	2.562	0.031
Fast pyrolysis 650 °C	800°C	CO	12.574	12.516	12.511	0.0413
		CH <sub>4</sub>	2.827	2.851	2.839	0.017
		CO <sub>2</sub>	2.416	2.359	2.387	0.040

ตาราง ง6 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองผลของตัวแปรในการเตรียมซาร์ วิธีการไพโรไลซิสแบบช้า/แบบเร็ว และ อุณหภูมิ ต่อปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

ตัวแปรในการเตรียมซาร์	อุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรแกซิฟิเคชัน	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
Fast pyrolysis 750 °C	600°C	CO	6.887	6.837	6.877	0.014
		CH <sub>4</sub>	1.686	1.747	1.714	0.040
		CO <sub>2</sub>	2.464	2.250	2.356	0.149
Fast pyrolysis 750 °C	700°C	CO	10.343	10.113	10.228	0.162
		CH <sub>4</sub>	2.539	2.539	2.539	0.000
		CO <sub>2</sub>	2.934	2.992	2.960	0.040
Fast pyrolysis 750 °C	800°C	CO	12.989	13.426	13.207	0.309
		CH <sub>4</sub>	3.190	3.226	3.208	0.026
		CO <sub>2</sub>	3.035	3.186	3.110	0.107
Fast pyrolysis 850 °C	600°C	CO	6.989	7.198	7.094	0.148
		CH <sub>4</sub>	1.615	1.601	1.608	0.010
		CO <sub>2</sub>	2.548	2.708	2.628	0.113
Fast pyrolysis 850 °C	700°C	CO	9.878	10.453	10.165	0.406
		CH <sub>4</sub>	2.426	2.311	2.385	0.058
		CO <sub>2</sub>	2.976	2.950	2.963	0.018
Fast pyrolysis 850 °C	800°C	CO	12.866	12.159	12.513	0.500
		CH <sub>4</sub>	3.054	3.143	3.113	0.042
		CO <sub>2</sub>	3.121	3.270	3.196	0.105

ตาราง ง7 ข้อมูลการทดลองผลของอัตราส่วนของชาร์ต่อชีวมวล ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

อัตราส่วน ชาร์ : ชีวมวล	อุณหภูมิใน กระบวนการ ไฮโดรแกซิฟิเคชัน	ร้อยละการ เปลี่ยนของ คาร์บอน	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
0	700°C	แก๊ส	35.633	37.105	36.369	1.041
		ทาร์	43.245	41.993	42.619	0.885
		ชาร์	21.122	20.902	21.012	0.156
0.5	700°C	แก๊ส	44.100	41.404	42.753	1.909
		ทาร์	34.04	36.340	35.203	1.608
		ชาร์	21.83	22.26	22.043	0.301
1	700°C	แก๊ส	46.659	46.021	43.340	0.451
		ทาร์	30.960	31.798	31.379	0.592
		ชาร์	22.381	22.181	22.281	0.141
2	700°C	แก๊ส	52.150	54.353	53.269	1.576
		ทาร์	26.310	24.361	25.338	1.381
		ชาร์	21.530	21.256	21.393	0.194

ตาราง ง8 ข้อมูลการทดลองผลของอัตราส่วนของชีวมวลต่อชาร์ ต่อปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

อัตราส่วน ชาร์ : ชีวมวล	อุณหภูมิใน กระบวนการ ไฮโดรแกซิฟิเคชัน	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
0	700°C	CO	8.707	9.142	8.924	0.308
		CH <sub>4</sub>	1.770	1.872	1.821	0.072
		CO <sub>2</sub>	2.625	2.629	2.627	0.003
0.5	700°C	CO	10.476	9.804	10.140	0.475
		CH <sub>4</sub>	2.629	2.487	2.557	0.100
		CO <sub>2</sub>	3.112	2.934	3.026	0.126

ตาราง ง8 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองผลของอัตราส่วนของชีวมวลต่อชาร์ ต่อปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

อัตราส่วน ชีวมวล : ชาร์	อุณหภูมิใน กระบวนการ ไฮโดรแกซิฟิเคชัน	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol/g biomass)	ครั้งที่ 2 (mmol/g biomass)	เฉลี่ย	SD
1	700 <sup>o</sup> C	CO	11.042	10.861	10.952	0.129
		CH <sub>4</sub>	2.840	2.849	2.844	0.006
		CO <sub>2</sub>	3.273	3.212	3.243	0.043
2	700 <sup>o</sup> C	CO	11.119	11.890	11.504	0.545
		CH <sub>4</sub>	3.258	3.342	3.300	0.060
		CO <sub>2</sub>	4.800	4.764	4.782	0.025

ตาราง ง9 ข้อมูลการทดลองผลของค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สในไฮโดรแกซิฟิเคชัน

ตัวแปรในการ เตรียมชาร์	อุณหภูมิใน กระบวนการ ไฮโดรแกซิฟิเคชัน	HHV (MJ/nm <sup>3</sup> ) ครั้งที่ 1	HHV (MJ/nm <sup>3</sup> ) ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
Without char	600 <sup>o</sup> C	13.342	12.667	13.005	0.477
	700 <sup>o</sup> C	13.420	13.650	13.535	0.163
	800 <sup>o</sup> C	14.352	14.696	14.524	0.243
S650	600 <sup>o</sup> C	13.764	13.838	13.801	0.052
	700 <sup>o</sup> C	14.555	14.354	14.440	0.163
	800 <sup>o</sup> C	14.209	14.497	14.354	0.204
S750	600 <sup>o</sup> C	14.016	14.115	14.066	0.070
	700 <sup>o</sup> C	14.715	14.803	14.759	0.062
	800 <sup>o</sup> C	14.493	14.553	14.523	0.042
S850	600 <sup>o</sup> C	13.732	13.635	13.684	0.067
	700 <sup>o</sup> C	14.508	14.555	14.531	0.033
	800 <sup>o</sup> C	14.333	14.500	14.417	0.118

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกชนิภา มณีวรรณ เกิดวันที่ 7 พฤศจิกายน 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี  
วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
ปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค  
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553 สำเร็จ  
การศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2555 และได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการ  
นานาชาติ The 22nd Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry  
International Conference 2012 (TIChE) ในวันที่ 25-26 ตุลาคม 2555 ณ โรงแรมเดอะกรีนเนอริ  
รีสอร์ท เขาใหญ่ จ.นครราชสีมา