

ผลของอุณหภูมิจากไฟโรไลซิสของชีวมวลต่อการลดทอนในแก๊สซีพีเคชันด้วยไอน้ำโดยใช้ชาร์จาจากของผสม  
ถ่านหิน/ชีวมวล



นายสุวัฒน์ เมืองทะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

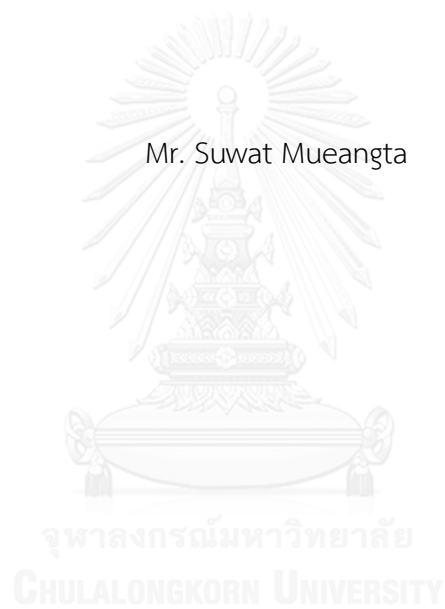
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF PYROLYSIS TEMPERATURE OF BIOMASS ON TAR REDUCTION IN STEAM  
GASIFICATION WITH CHAR FROM COAL/BIOMASS BLEND

Mr. Suwat Mueangta



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 2014  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิสของชีวมวลต่อการลดทาร์ในแก๊ส ซิฟิเคชันด้วยไอน้ำโดยใช้ชาร์จากของผสมถ่านหิน/ชีวมวล
โดย	นายสุวัฒน์ เมืองทะ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.....กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

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

สุวัฒน์ เมืองทะ : ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสของชีวมวลต่อการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำโดยใช้ชาร์จากของผสมถ่านหิน/ชีวมวล (EFFECT OF PYROLYSIS TEMPERATURE OF BIOMASS ON TAR REDUCTION IN STEAM GASIFICATION WITH CHAR FROM COAL/BIOMASS BLEND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ประพันธ์ คุชลธรรา, 133 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยของชีวมวลต่อการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำโดยใช้ชาร์จากของผสมถ่านหิน/ชีวมวล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน ช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา คือ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ชีวมวลที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาคือชาร์ เติร์มที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนแกซิฟิเคชันครั้งที่ 800 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากแกซิฟิเคชันของชีวมวลจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC/TCD) ส่วนทาร์ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) จากผลการทดลอง พบว่า ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ทั้งหมดที่เตรียมได้ สามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์จากชีวมวลในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำได้ โดยทาร์จากชีวมวลเกิดการแตกตัวบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์กลายเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิลดปล่อยสารระเหยที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อองค์ประกอบของทาร์จากชีวมวล ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ต่างกัน โดยพบว่าที่อุณหภูมิลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์มากกว่าที่อุณหภูมิลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส เป็นผลมาจากองค์ประกอบของแนพทาลิน ซึ่งเป็นสารประกอบแอโรแมติกที่มีเสถียรภาพสูง และพบว่ามีปริมาณมากในทาร์ที่อุณหภูมิลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส ทำให้การแตกตัวบนพื้นผิวเกิดขึ้นได้ยาก นอกจากนี้พบว่า ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ อาทิเช่น พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และแร่ธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ มีผลต่อความสามารถในการแตกตัวของทาร์ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลทั้ง 2 ชนิด พบว่า องค์ประกอบของทาร์ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่อย่างไรก็ตาม จากการทดลองนี้พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ที่เตรียมได้สามารถแตกตัวทาร์ประเภทแอโรแมติกวงเดียวที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบได้ดีกว่าทาร์ประเภทอื่น ดังนั้น ปริมาณและองค์ประกอบของทาร์จากชีวมวลที่แตกต่างกัน เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวของทาร์

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5572163323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: STEAM GASIFICATION / TAR REDUCTION / CHAR / PYROLYSIS BIOMASS

SUWAT MUEANGTA: EFFECT OF PYROLYSIS TEMPERATURE OF BIOMASS ON  
TAR REDUCTION IN STEAM GASIFICATION WITH CHAR FROM COAL/BIOMASS  
BLEND. ADVISOR: ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 133 pp.

Effect of devolatilization temperature of biomass on tar reduction in steam gasification with char from coal/biomass blend was studied in this research. The steam gasification was conducted in a two-stage fixed bed reactor. The influence of devolatilization temperature in range of 600 to 800 °C was investigated on tar gasification with steam at 800 °C. Rice straw and leucaena wood were used in this work. Char as a catalyst was produced by pyrolysis at 600 °C. The gas products and tar were analyzed by using gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry, respectively. The results indicated that at devolatilization temperature of 800 °C, all prepared chars had a catalytic effect on tar cracking in steam gasification. Tar can be decomposed on the surface of char resulting in the higher carbon conversion into gas production. In addition, the difference in devolatilization temperature affected on tar compositions from biomass as well as tar conversion. Devolatilization at 700 °C give higher tar conversion than devolatilization at 800 °C. It was attributable to the naphthalene which was observed as a major composition in tar from 800 °C. The naphthalene is a high stable aromatic compound and could be difficult to decompose on the char surface. Also, the physical and chemical properties of char (e.g. surface area, pore volume, mineral) influenced on the catalytic role in the tar cracking. Moreover, the compositions of tar were not significantly different comparing between rice straw and leucaena wood. Furthermore, this work revealed that the all prepared char can effectively decompose the oxygenated-single aromatic tar rather than any other compounds in tar. Therefore, it can be concluded that the composition in tar from pyrolyzed biomass has a significant effect on the catalyst performance in tar reduction.

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

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

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา ที่ได้กรุณาอบความรู้ แนวคิด ให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ข้อคิดเห็นต่างๆ เพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้มอบคำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

งานวิจัยเรื่อง “ผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิสของชีวมวลต่อการลดทาร์ในแก๊สซิเพคชันด้วยไอน้ำโดยใช้ซาร์จากของผสมถ่านหิน/ชีวมวล” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช ประธานกรรมการสอบ ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.สุชาติดา บุตรนาค กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ รวมไปถึงให้ความรู้และคำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยดูแล ช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดี และให้ การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือให้คำแนะนำ และสนับสนุนด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบความดีทั้งหมดของงานวิจัยนี้ให้แก่ทุกท่านที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และที่ยังไม่ได้เอ่ยนามมา ณ โอกาสนี้ด้วย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชีวมวล (Biomass).....	4
2.2 การนำชีวมวลมาเป็นแหล่งพลังงาน.....	12
2.3 เทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงาน.....	16
2.4 ทาร์ (Tar).....	27
2.5 วิธีการกำจัดทาร์ที่ได้จากแกซิฟิเคชัน.....	28
2.6 การผลิตชาร์ (char).....	31
2.7 ถ่านหิน (Coal).....	33
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	39

3.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์.....	39
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	40
3.3 วิธีการทดลอง.....	44
3.4 วิเคราะห์สมบัติต่างๆ.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	51
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินและชีวมวล .....	52
4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่เตรียมได้ .....	53
4.3 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการลดทาร์ ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล โดยใช้ฟางข้าวเป็น ชีวมวลที่ป้อนสู่ระบบ .....	55
4.4 ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อประสิทธิภาพการลดทาร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ โดยใช้ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่ป้อนสู่ระบบ .....	61
4.5 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการลดทาร์ ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล โดยใช้ไม้กระถิน ยักษ์เป็นชีวมวลที่ป้อนสู่ระบบ .....	72
4.6 ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อประสิทธิภาพการลดทาร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ โดยใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นชีวมวลที่ป้อนสู่ระบบ .....	79
4.7 ผลของชีวมวลต่อการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ.....	91
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	93
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	95
รายการอ้างอิง .....	96
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก .....	101
ภาคผนวก ข .....	104
ภาคผนวก ค .....	109



ภาคผนวก ง.....	113
ภาคผนวก จ .....	117
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	133



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 องค์ประกอบต่างๆ ในชีวมวล.....	7
2.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตผลทางการเกษตร.....	11
2.3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของผลิตผลทางการเกษตร.....	11
2.4 ผลพยากรณ์การผลิตพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ปี 2555/56 และ 2556/57.....	14
2.5 การแบ่งประเภทของทาร์.....	27
2.6 ร้อยละประสิทธิภาพการดักฝุ่นละอองและทาร์.....	29
2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของถ่านหินแต่ละชนิด.....	35
3.1 สภาวะที่ใช้การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography).....	43
3.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry).....	44
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ.....	52
4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ.....	52
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยเทคนิค.....	53
4.4 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่เตรียมได้จากกระบวนการ การไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....	54
4.5 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์หลังจากการทดลอง ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	60
4.6 องค์ประกอบของทาร์จากฟางข้าวที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี- แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS).....	63
4.7 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินหลังจากการทดลอง ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน.....	65
4.8 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวหลังจากการทดลอง ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน.....	68
4.9 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าวหลัง จากการทดลองในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อย สารระเหยต่างกัน.....	71

ตาราง	หน้า
4.10 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์หลังจากการทดลองในแกซิพีเคชั่น ด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	76
4.11 องค์ประกอบของทาร์จากไม้กระถินยักษ์ที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี- แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS).....	80
4.12 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินหลังจากการทดลองใน แกซิพีเคชั่นด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน.....	83
4.13 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์หลังจากการทดลองใน แกซิพีเคชั่นด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน.....	86
4.14 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ หลังจากการทดลองในแกซิพีเคชั่นด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ ปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน.....	89
ง1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard) .....	113
ง2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง.....	114
จ1 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบ ของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์.....	117
จ2 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของ ผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซิพีเคชั่นด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์.....	119
จ3 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของ ผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิสของฟางข้าว.....	121
จ4 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของ ผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซิพีเคชั่นด้วยไอน้ำของฟางข้าว.....	123
5จ ข้อมูลจากการทดลองผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ต่อปริมาณองค์ประกอบของ ผลิตภัณฑ์แก๊สและร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน โดยไม่มีชีวมวลป้อนเข้าสู่ระบบไพโรไลซิส.....	125
6จ ข้อมูลจากการทดลองผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ต่อปริมาณองค์ประกอบของ ผลิตภัณฑ์แก๊สและร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน โดยไม่มีชีวมวลป้อนเข้าสู่ระบบแกซิพีเคชั่นด้วยไอน้ำ.....	125
จ7 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยน ของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์.....	126



ตาราง	หน้า
จ8 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยน ของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในแกซิฟเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์.....	127
จ9 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยน ของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสของฟางข้าว.....	128
จ10 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยน ของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในแกซิฟเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าว.....	129



## สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 โครงสร้างของเซลล์ลูโลส.....	7
2.2 โครงสร้างของเฮมิเซลล์ลูโลส.....	8
2.3 โครงสร้างของลิกนิน.....	8
2.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงของแข็ง.....	17
2.5 กระบวนการแตกตัวทางความร้อนของชีวมวล.....	18
2.6 การสูญเสียมวลขององค์ประกอบชีวมวลแต่ละชนิด.....	21
2.7 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและการนำมาใช้ประโยชน์.....	22
2.8 แก๊ซซิฟิเคชันจากชีวมวล.....	23
2.9 ขั้นตอนการในการเกิดปฏิกิริยาแก๊ซซิฟิเคชัน.....	24
2.10 แสดงองค์ประกอบของทาร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ.....	28
2.11 แสดงแผนผังการกำจัดทาร์เชิงกลหรือหลังเกิดปฏิกิริยา.....	29
2.12 แสดงแผนผังการกำจัดทาร์ด้วยการแตกตัว.....	30
2.13 ลักษณะของถ่านหินแต่ละชนิด.....	34
3.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองขั้นตอน (Two-stage fixed bed reactor).....	39
3.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองขั้นตอน.....	40
3.3 แบบจำลองอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งหนึ่งขั้นตอน.....	42
3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography).....	42
3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry).....	43
3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์และการทดสอบต่างๆ.....	49
4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่เตรียมได้จากการวิเคราะห์ด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM).....	55
4.2 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในแก๊ซซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าว ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	56

รูป	หน้า
4.3 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้หลังจากแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำของฟางข้าว ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	57
4.4 ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์.....	58
4.5 การเปรียบเทียบของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน ในแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	59
4.6 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำของฟางข้าว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน.....	62
4.7 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินก่อนการทดลอง (ก) และ หลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM).....	66
4.8 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำของฟางข้าว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว.....	67
4.9 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวก่อนการทดลอง (ก) และ หลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM).....	69
4.10 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกันในแกซีพีเคชั่น ของฟางข้าวด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว.....	70
4.11 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าวก่อนการ ทดลอง (ก) และหลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) .....	72
4.12 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	73
4.13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้หลังจากแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำของ ไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	74
4.14 การเปรียบเทียบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน ในแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	75
4.15 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและ แกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	77

รูป	หน้า
4.16 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซีพีเคชัน ด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน .....	79
4.17 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินก่อนการทดลอง (ก) และ หลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM).....	84
4.18 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซีพีเคชัน ด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์.....	84
4.19 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ก่อนการทดลอง (ก) และหลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM).....	87
4.20 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซีพีเคชัน ด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์....	88
4.21 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ ก่อนการทดลอง (ก) และหลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด(SEM).....	90
4.22 ผลของอุณหภูมิในการปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์จากชีวมวล 2 ชนิด (  คือ ไม้กระถินยักษ์ และ  คือ ฟางข้าว).....	91
ข 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS).....	108
จ1 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของทาร์จากการไพโรไลซิสของฟางข้าว ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียส.....	131
จ2 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของทาร์จากการไพโรไลซิสของฟางข้าว ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส.....	131
จ3 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของทาร์จากการไพโรไลซิสของฟางข้าว ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส.....	132
จ4 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของทาร์จากการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียส.....	132
จ5 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของทาร์จากการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส.....	133

จ6 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารจากการไฟโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์

ที่อนุกรมมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส.....133





## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันความต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้นทุกปี พลังงานส่วนใหญ่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติ เป็นแหล่งพลังงานหลักโดยในกระบวนการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิล มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณมากเป็นสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อน เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการหาพลังงานทางเลือกอื่นมาทดแทนพลังงานดังกล่าว โดยพลังงานทางเลือกมีอยู่หลายชนิด เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานจากชีวมวล พลังงานเหล่านี้ถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และในปัจจุบันได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะพลังงานจากชีวมวล ซึ่งนอกจากจะลดปัญหาการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศได้แล้ว ชีวมวลยังเป็นแหล่งพลังงานที่หาได้ง่ายในประเทศไทย ซึ่งถือว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม

การผลิตแก๊สเชื้อเพลิง หรือแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวล เป็นหนึ่งในวิธีที่สามารถเปลี่ยนชีวมวลไปเป็นพลังงาน โดยผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชัน (Gasification) กระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ ถ่านหิน หรือ ชีวมวล ให้อยู่ในรูปของแก๊สเชื้อเพลิง โดยอาศัยการสันดาปเพียงบางส่วนกับสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน หรือ ไอน้ำ โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะมีองค์ประกอบหลัก คือ ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน ( $CH_4$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และแก๊สในรูปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี หรือนำไปผลิตพลังงานโดยตรง และเชื้อเพลิงเหลวอื่นๆ เป็นต้น [1]

ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวล คือ ทาร์ (Tar) ที่เกิดขึ้นและปะปนมากับผลิตภัณฑ์แก๊สในปริมาณมาก ทาร์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนและอุดตันในท่อขนส่งรวมถึงเครื่องปฏิกรณ์ต่างๆ ในระบบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการลดลง [2] กระบวนการที่ใช้ในการลดทาร์มีหลากหลายวิธี และวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพต่อการลดทาร์ คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อลดปริมาณของทาร์ที่ถูกปลดปล่อยออกมา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ลดทาร์มีหลากหลายประเภท ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาสินแร่ (Mineral catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาแร่โลหะ (Metal catalyst) ซึ่งส่วนใหญ่มักพบปัญหาการเสื่อมสภาพของตัวเร่ง

ปฏิกิริยาได้ง่ายและว่องไวต่อสิ่งเจือปน ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอน (Carbon catalyst) ถูกจัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอีกประเภทหนึ่งที่น่าสนใจในกระบวนการลดทาร์จากชีวมวล ซึ่งชาร์ (Char) ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอน และสามารถเตรียมได้จากถ่านหินหรือชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส [3]

จากข้างต้นพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกสินแร่และแร่โลหะที่ใช้ลดทาร์มีข้อจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำชาร์มาใช้เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการลดทาร์จากแกซิฟิเคชันของชีวมวลที่อุณหภูมิสูง โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสหรืออุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยของชีวมวลต่อการลดทาร์ในกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองขั้นตอน (Two-stage fixed bed reactor) โดยอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยที่ศึกษาอยู่ในช่วง 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส และชีวมวลที่ใช้ทำการศึกษา คือ ฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ที่เตรียมจากไพโรไลซิสร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวลต่อการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อประสิทธิภาพการลดทาร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยมุ่งศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ที่เกิดจากไพโรไลซิสร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวลต่อการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล และศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อประสิทธิภาพการลดทาร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองขั้นตอน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสของชีวมวลต่อประสิทธิภาพการลดทาร์ จากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 เตรียมเครื่องปฏิกรณ์สำหรับแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ

1.5.3 บดย่อยและคัดขนาดถ่านหินและชีวมวล ประกอบด้วย

- ถ่านหินซับทูนินัส
- ไม้กระถินยักษ์
- ฟางข้าว

1.5.4 วิเคราะห์สมบัติของถ่านหินและชีวมวล

- การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3172 D3173 D3174 และ D3175 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว
- การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนโดยเครื่อง CHN Analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น CHN-2000

1.5.5 ศึกษาการเตรียมชาร์จากถ่านหินผสมชีวมวลด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

1.5.6 ศึกษาผลของชาร์ผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวลต่างชนิดต่อการสลายทาร์ที่มาจากชีวมวล

1.5.7 ศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสหรืออุณหภูมิลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization temperature) ต่อการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล ทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองขั้นตอน (Two-stage fixed bed reactor) ช่วงอุณหภูมิลดปล่อยสารระเหยที่ทำการศึกษา ได้แก่ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส

1.5.8 วิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) และองค์ประกอบของทาร์ วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS)

1.5.9 วิเคราะห์สมบัติของชาร์ผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

1.5.10 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ แหล่งกักเก็บสารอินทรีย์ตามธรรมชาติที่ได้จากสิ่งมีชีวิตรวมถึงพืชที่รวมกันอยู่ในระบบนิเวศหรือเกิดจากกระบวนการทางชีวภาพ ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์และเกิดขึ้นหมุนเวียนตามธรรมชาติ เช่น พืช ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้จากการสังเคราะห์แสง โดยแสงสามารถแปรสภาพคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศและน้ำในดิน เกิดเป็นคาร์โบไฮเดรตและถูกเก็บกักไว้ในพืช พืชเหล่านี้สามารถเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญให้กับสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้เศษวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตรกรรม ยังสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย กากมันสำปะหลัง แกลบ และซังข้าวโพด เป็นต้น ส่วนพืชที่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานได้โดยตรง อาทิเช่น กระจับถั่วยักษ์ กระจับถั่วณรงค์ กระจับถั่วผสม กระจับเตาและยูคาลิปตัส เป็นต้น ทั้งนี้พืชยังคงเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของมนุษย์และส่งผลต่อพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ

##### 2.1.1. ความสำคัญของชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มายาวนานจนถึงปัจจุบัน เพราะเป็นแหล่งกำเนิดที่มีการหมุนเวียนไม่มีหมดสิ้น ปัจจุบันชีวมวลได้รับการยอมรับว่าเป็นแหล่งพลังงานทางเลือก โดยชีวมวลที่นำมาใช้เป็นพลังงานมีอยู่ราวร้อยละ 10-14 ของพลังงานทางเลือกของโลก ชีวมวลสามารถแปรสภาพกลายเป็นพลังงานได้ 3 รูปแบบหลักๆ [4] คือ

- พลังงานไฟฟ้า/พลังงานความร้อน
- เชื้อเพลิงสำหรับการคมนาคม
- วัตถุดิบตั้งต้นในอุตสาหกรรมเคมี

โดยทั่วไป ประโยชน์ของชีวมวลที่นำมาใช้เป็นพลังงานเกิดการกระบวนการเผาไหม้โดยตรงซึ่งมักส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านมลพิษ อาทิเช่น ฝุ่น แก๊สพิษกรด เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ การเผาไหม้จากชีวมวลโดยตรงให้ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อยกว่าการเผาไหม้จากถ่านหิน ส่งผลให้ปริมาณของมลพิษที่เกิดขึ้นในบรรยากาศจากการเผาไหม้ของชีวมวลมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับมลพิษที่มาจากแหล่งพลังงานชนิดอื่น นอกจากนี้ ชีวมวลถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจาก

- ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่หมุนเวียนและยั่งยืน รวมถึงเป็นแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- มีแหล่งวัตถุดิบที่หลากหลาย ส่งผลให้มีความหลากหลายทางด้านลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะกับเทคโนโลยีต่างๆ ได้
- การนำชีวมวลมาใช้ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ยืดอายุการใช้งานของน้ำมันดิบให้นานขึ้น
- เชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวลมีปริมาณซัลเฟอร์น้อยมากและช่วยลดการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฝนกรด
- หลังจากการเผาไหม้ ปริมาณซีเถ้าจากชีวมวลมีปริมาณน้อยกว่าถ่านหิน และซีเถ้าเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งในดินเพื่อการเกษตรกรรม
- ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถหาได้ภายในประเทศ และราคาของชีวมวลไม่ได้นับกับราคาตลาดโลก ทำให้ไม่ต้องมีการนำเข้าของแหล่งพลังงาน
- การผลิตพลังงานจากชีวมวลช่วยลดปัญหาการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก

ชีวมวลนั้นมีสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ ความชื้น และสมบัติอื่นๆ ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นพลังงานต้องใช้วิธีที่แตกต่างกันไป การพัฒนาเทคโนโลยีที่นำมาใช้ควรเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยลดต้นทุน เพื่อเป็นการลดใช้พลังงาน รวมไปถึงการช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจทางด้านการเกษตร

แหล่งพลังงานชีวมวลส่วนใหญ่เกิดจากการเกษตรกรรมภายในประเทศและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับไม้ การแปรสภาพชีวมวลไปเป็นพลังงานสามารถทำได้หลากหลายวิธี การเผาไหม้ชีวมวลโดยตรงถือว่าเป็นกระบวนการหลักที่ได้ไอน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ สามารถนำไปใช้ในการขับเคลื่อนกังหันน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ส่วนการเผาชีวมวลในเตาเผาแก๊สไฟเออร์ พลังงานที่ได้อยู่ในรูปแบบของแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ และให้ประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนสูง นอกจากนี้ชีวมวลสามารถแปรสภาพให้อยู่ในรูปของน้ำมันผ่านการไพโรไลซิส ซึ่งน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสนี้ง่ายต่อการเก็บและการขนส่ง โดยสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เหมือนกับน้ำมันปิโตรเลียม

### 2.1.2 ประเภทของชีวมวล

ชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย อยู่ในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรตหรือเซลลูโลส ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมาย ทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิตและรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในรูปแบบอื่นๆ โดยชีวมวลส่วนใหญ่มักเกิดจากกิจกรรมทางการเกษตรและอุตสาหกรรมป่าไม้รวมถึงการปศุสัตว์ ดังนั้นชีวมวลที่นำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ชีวมวลที่จากไม้ ชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้ และของเสียจากสัตว์ ซึ่งได้มาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

- ผลผลิตจากป่า ไร่ นา สวน ต้นไม้ และวัชพืชต่างๆ ทั้งบนบกและในน้ำ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้โตเร็ว ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า พืชล้มลุก พืชน้ำ เป็นต้น
- ผลผลิตจากพืชเศรษฐกิจ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด ทลายปาล์ม
- เศษวัสดุและของเสียจากกระบวนการและการประกอบการของภาคอุตสาหกรรม เช่น ขี้เลื่อย กากอาหาร รวมไปถึงของเสียจากโรงงานแปรรูป ของเสียประเภทพลาสติก และกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม
- ของเสียจากแหล่งชุมชน เช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน
- ผลิตภัณฑ์และของเสียจากสัตว์ เช่น ไวมัน มูลสัตว์ เป็นต้น

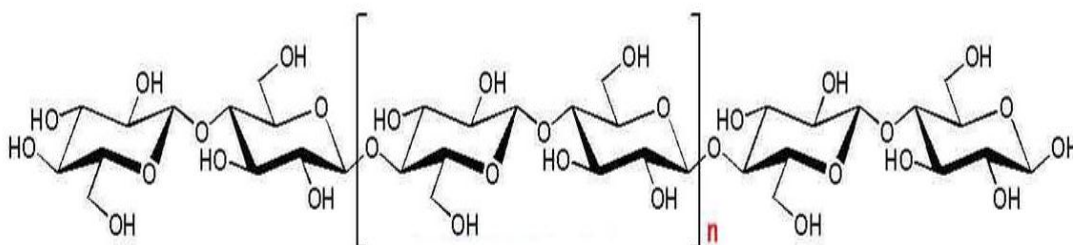
### 2.1.3 สมบัติและองค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ 88-99.9 องค์ประกอบโดยเฉลี่ยของไม้ประกอบด้วย เซลลูโลสร้อยละ 40-45 (ทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน) ปริมาณลิกนินของไม้เนื้ออ่อนมีอยู่ประมาณร้อยละ 25-35 ส่วนไม้เนื้อแข็งมีลิกนินอยู่ร้อยละ 17-25 ส่วนปริมาณเฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้ออ่อนมีอยู่ประมาณร้อยละ 20 และไม้เนื้อแข็งมีอยู่ร้อยละ 15-35 โดยตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบต่างๆ ของชีวมวลที่ต่างกัน

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบต่างๆ ในชีวมวล [5]

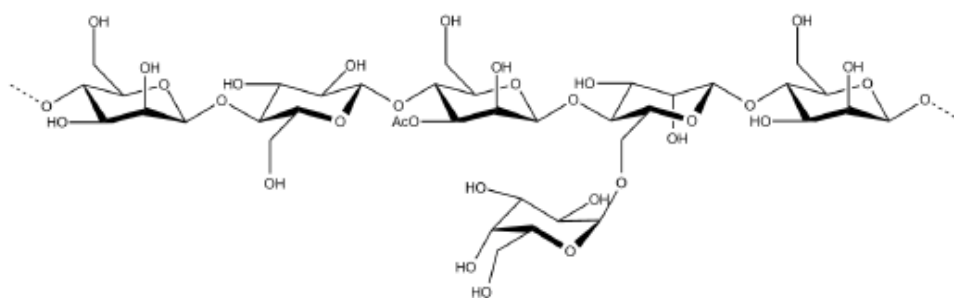
ชนิด	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	ขี้เถ้า
ไม้เนื้ออ่อน(เฉลี่ย)	45.8	24.4	28.0	1.7
ไม้เนื้อแข็ง(เฉลี่ย)	45.2	31.3	21.7	2.7
เปลือกไม้	24.8	29.8	43.8	1.6
ชานอ้อย	41.3	22.6	18.3	2.9
กะลามะพร้าว	36.3	25.1	28.7	0.7
ต้นข้าวโพด	42.7	23.6	17.5	6.8
แกลบ	31.1	24.3	14.3	23.5
ฟางข้าว	37.0	22.7	2.6	19.8-16.1

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสหรือพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีดีกัลโคสถูกเชื่อมกันด้วยพันธะเบต้ากลูโคซิดิก ซึ่งมีความยาวแตกต่างกันไป และจับกับลูกโซ่ข้างเคียงด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นลักษณะที่เรียกว่า ไฟบริล และแต่ละไฟบริลจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เซลลูโลสฝังตัวอยู่ในของเหลวที่มีรูปร่างไม่แน่นอนเรียกว่า เมทริกซ์พอลิแซ็กคาไรด์ เซลลูโลสเป็นน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ที่แตกต่างกับแป้ง คือ มีการเรียงตัวที่ต่างกัน มีสูตรโมเลกุลเป็น  $(C_6H_{12}O_6)_n$  มีโครงสร้างดังแสดงรูปที่ 2.1



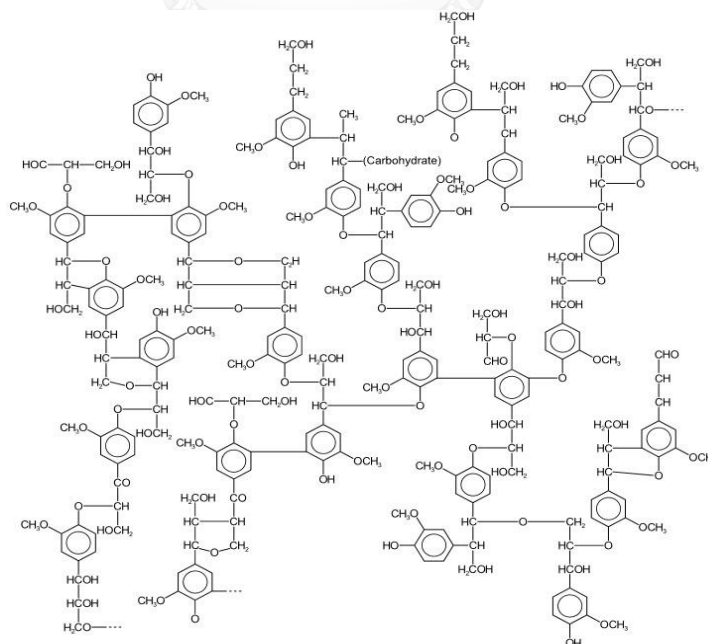
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส [6]

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซคคาไรด์เกิดขึ้นร่วมกับเซลลูโลส แต่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสจะพบอยู่ประมาณร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนักแห้ง โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.2 ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีจะต่างจากเซลลูโลสคือ สายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเฮเทอโรจีนัส (Heterogenous) ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์หลายชนิดปนกัน เช่น เฮกโซแซน (Hexosan) พอลิยูโรนไนด์ (Polyuronides) เพนโตแซน (Pentosan) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [7]

ลิกนิน ประกอบด้วยสารเคมีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงพวกกลุ่มฟีนอลิกและเป็นองค์ประกอบที่มีความซับซ้อนมากที่สุดของไม้ ทำให้ผนังเซลล์ของพืชมีความแข็งแรงมาก ความทนทานต่อสารเคมีและการกระทบกระแทกต่างๆ ลิกนินเปรียบเสมือนกาวยึดระหว่างเซลล์ของพืช มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของลิกนิน [8]



### ประโยชน์ของชีวมวล

1. ชีวมวลมีอยู่ทุกประเทศโดยแต่ละประเทศจะมีชีวมวลที่หลากหลายแตกต่างกันไป ชีวมวลเหล่านั้นถือได้ว่าเป็นวัตถุดิบที่นำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานใช้ในประเทศนั้นๆ ดังนั้น ชีวมวลจึงเป็นแหล่งพลังงานตามธรรมชาติที่สำคัญที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีราคาถูก
2. การนำชีวมวลมาใช้มีประโยชน์ต่อทางด้านสังคมและเศรษฐกิจ รวมทั้งเป็นการสร้างโอกาส โดยเป็นการสร้างอาชีพในชนบท
3. การนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานเป็นพลังงานทางเลือกเพื่อเป็นลดปัญหามลภาวะของสิ่งแวดล้อม อย่างเช่น ปัญหาการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นปัญหาจากการใช้แหล่งพลังงานฟอสซิล นอกจากนี้ เชื่อเพลิงชีวมวลพบว่ามีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ ทำให้ช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้อีกด้วย

### การเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงฟอสซิลกับชีวมวล

- ชีวมวลมีค่าความร้อนน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล
- ชีวมวลมีความชื้นสูงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปในกระบวนการเผาไหม้
- ชีวมวลมีความหนาแน่นรวมต่ำ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีขนาดใหญ่เพื่อกักเก็บและการเผา
- ชีวมวลมีลักษณะทางกายภาพไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีอิสระในการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นปัญหาในการออกแบบเครื่องมือในการขนส่ง การวัด การกักเก็บ และการป้อนเข้าเครื่องมือที่ใช้

#### 2.1.4 ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (Heating value) คือพลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีจุดเริ่มที่อุณหภูมิอ้างอิง แล้วผลิตผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้มีอุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับอุณหภูมินี้ ค่าความร้อนที่ใช้มีทั้งค่าความร้อนสูงและต่ำ โดยขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ ค่าความร้อนต่ำ คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังจากการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำไอหลังผ่านการเผาไหม้ ส่วนค่าความร้อนสูง คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังจากการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำเป็นของเหลวหลังจากการเผาไหม้ โดยค่าความร้อนสูงมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำ ดังนี้

$$\text{HHV (MJ/kg)} = \text{LHV (MJ/kg)} + 0.02395 (9\text{H} + \text{MC}_t)$$

การหาค่าความร้อนมักจะทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอริมิเตอร์ ค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าประมาณกลางๆ คือ 10-20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสมบัติของเชื้อเพลิงในรูปของสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรือในรูปของสัดส่วนของคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น (MC<sub>T</sub>) และเศษเถ้า หรือได้จากการใช้สมการคำนวณอย่างง่าย เช่น สูตรของดูลอง (dulong formula) โดยใช้ค่าสัดส่วนโดยมวลของแต่ละธาตุที่เกี่ยวข้อง

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.585 \text{ C} + 141.924 \text{ H} + 12.908 \text{ S} - 15.327 \text{ O} - 3.538 \text{ O}^2$$

สูตรของเดเมียบาส (demirbas)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.5 \text{ C} + 142.3 \text{ H} - 15.4 \text{ O} - 24.6 \text{ N}$$

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 31.2 \text{ FC} + 15.34 \text{ VM}$$

### 2.1.5 ปริมาณความชื้น (Moisture content)

ปริมาณความชื้น คือ สัดส่วนของน้ำหนักของความชื้นต่อน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงแห้งหรือน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงรวมทั้งหมด หากคูณด้วย 100 ค่าที่ได้จะเป็นร้อยละความชื้นในชีวมวล ปริมาณความชื้นของชีวมวลขึ้นอยู่กับพันธุ์ไม้และกระบวนการเตรียม

### 2.1.6 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ

การแสดงคุณลักษณะเชื้อเพลิงแข็งมักจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า ตามสภาพของเชื้อเพลิง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบพื้นฐานเปียก (Wet basis) หรือแบบพื้นฐานที่รับมา (As-received basis) และแบบพื้นฐานแห้ง (Dry basis) ตัวอย่างจากการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ แสดงดังตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตผลทางการเกษตร (พื้นฐานแห้ง) [9]

ชนิด	สารระเหย (%)	คาร์บอนคงตัว (%)	ซีไถ้ (%)	ค่าความร้อน (MJ/kg)
ฟางข้าว	69.33	17.25	13.41	16.28
ซังข้าวโพด	80.10	18.54	1.36	18.77
ต้นข้าวโพด	75.17	19.25	5.58	17.65
แกลบ	65.47	16.67	17.86	16.14
ชานอ้อย	73.78	14.95	11.27	17.33
ต้นหญ้า	81.36	15.03	3.61	18.64
เศษอาหาร	-	-	-	7.59

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของผลิตผลทางการเกษตร (พื้นฐานแห้ง) [9]

ชนิด	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
ฟางข้าว	41.78	4.63	36.57	0.70
ซังข้าวโพด	46.58	5.84	45.46	0.47
ต้นข้าวโพด	43.65	5.56	43.31	0.61
แกลบ	40.96	4.30	35.86	0.40
ชานอ้อย	44.80	5.35	39.55	0.38
ต้นหญ้า	47.45	5.75	42.37	0.74
เศษอาหาร	17.93	2.55	12.85	1.13

## 2.2 การนำชีวมวลมาเป็นแหล่งพลังงาน

พลังงานจากชีวมวลมีศักยภาพสูงมาก ประมาณกันกว่าร้อยละ 40 ของประชากรโลก อาศัยชีวมวลในการหุงต้มและให้ความอบอุ่น และหากพิจารณาเฉพาะปริมาณการใช้ในประเทศกำลังพัฒนาทั่วโลกนั้น การใช้พลังงานชีวมวลจะมีสัดส่วนที่ประมาณร้อยละ 35-40 ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยมีจีนและอินเดียเป็นประเทศผู้ใช้หลัก ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีโครงการพลังงานชีวมวลเกิดขึ้นจำนวนมาก เนื่องจากการให้ความสำคัญมากขึ้นและการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ

สำหรับพลังงานชีวมวลสมัยใหม่ ไม่ว่าจะเป็นการใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม การผลิตกระแสไฟฟ้าหรือการผลิตเชื้อเพลิงสำหรับภาคการขนส่ง พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราสูง มีการประมาณการว่าสิ้นศตวรรษที่ 20 มีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานชีวมวลทั่วโลกราวๆ 40,000 MW และความร้อน 200,000 MW มีการผลิตเชื้อเพลิงเหลวประมาณ 18,000 ล้านลิตรต่อปี พลังงานชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญมากในอนาคต จากการศึกษาศักยภาพชีวมวล บ่งชี้ว่าการเพาะปลูกพลังงานในพื้นที่การเกษตรปัจจุบันสามารถให้พลังได้ถึง 800 EJ ( $800 \times 10^{12}$  MJ) โดยไม่มีผลกระทบต่อผลผลิตทางอาหารของโลก เศษวัสดุเหลือใช้ ขยะของเสียต่างๆ สามารถให้พลังงานได้อีกประมาณ 40-170 EJ โดยรวมแล้วศักยภาพชีวมวลของโลกสูงถึง 1,000 EJ ต่อปี ซึ่งสูงกว่าปริมาณการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของโลกในปัจจุบันที่ 400 EJ ประเทศแถบละตินอเมริกา แอฟริกา ยุโรป ตะวันออก และเอเชีย มีศักยภาพสูงในการเป็นพื้นที่ผลิตชีวมวล ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการเกษตรจะยิ่งส่งผลให้มีผลผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

สำหรับข้อมูลในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยจำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นหลัก [10] โดยที่ผ่านมามีแนวโน้มมากกว่าร้อยละ 60 ของความต้องการพลังงานเชิงพาณิชย์เริ่มต้นมาจากการนำเข้า ซึ่งมีสัดส่วนการนำเข้าของน้ำมันสูงถึงร้อยละ 80 ของปริมาณการใช้ น้ำมันทั้งหมดภายในประเทศและยังมีแนวโน้มสูงขึ้น เพราะไม่สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตปิโตรเลียมในประเทศได้ทันกับความต้องการใช้งาน ดังนั้น การพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างจริงจังจะช่วยลดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงและพลังงานชนิดอื่น อีกทั้งยังช่วยกระจายความเสี่ยงในการจัดหาเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้าของประเทศ ซึ่งเดิมต้องพึ่งพาแก๊สธรรมชาติมากกว่าร้อยละ 70 นอกจากนี้ พลังงานทดแทนจากชีวมวล ถือเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงเป้าหมายที่คาดว่าจะสามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าทดแทนแก๊สธรรมชาติได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากการสำรวจศักยภาพของชีวมวล โดยกระทรวงพลังงาน ระบุว่า ในปี พ.ศ. 2550 พลังงานชีวมวลที่ใช้ผลิตไฟฟ้าภายในประเทศมีประมาณ 3,000 MW โดยไฟฟ้าที่ได้จากแกลบคิดเป็น 700 MW ฟางข้าว 650 MW ชานอ้อย 900 MW ยอดและใบอ้อย 570 MW และอื่นๆ โดยแกลบ ฟางข้าว ส่วนเหลือจากอ้อย เช่น ชานอ้อยหรือยอดและใบอ้อย และส่วนเหลือของปาล์มน้ำมัน เช่น กะลา ทะลาย หรือเส้นใยปาล์ม จัดเป็นกลุ่มชีวมวลที่มีสัดส่วนสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 85 ของศักยภาพชีวมวลทั้งหมดของประเทศ

การประเมินศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะประเมินจากผลคูณของปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้นๆ กับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นปริมาณชีวมวล โดยทั่วไปแล้ว การนำชีวมวลไปใช้มี 2 ประเภท คือ การนำไปใช้เพื่อให้ได้พลังงานความร้อน เช่น การนำฟืนไปใช้ในเตาอั้งโล่ของชาวบ้าน และการนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น โรงน้ำตาลใช้กากอ้อยที่ได้จากการหีบอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าหรือโรงสีข้าวใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

## 2.2.1 ศักยภาพของพลังงานชีวมวลในประเทศไทย

ประเทศไทยนับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตทางการเกษตรคือ วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว กากอ้อย กาก ใย และทะลายปาล์ม เป็นต้น ปริมาณชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ผลพยากรณ์การผลิตพืชเศรษฐกิจที่สำคัญปี 2555/56 ถึง 2556/57(หน่วย: ไร่/ตัน)

ตารางที่ 2.4 ผลพยากรณ์การผลิตพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ปี 2555/56 และ 2556/57 (หน่วย:ไร่ /ตัน)

[11]

ชนิด	2555/56		2556/57	
	พื้นที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต	พื้นที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต
ถั่วเหลือง	315,783	84,664	259,178	70,456
ข้าว	64,950,593	27,233,903	62,079,904	27,090,184
ข้าวโพด	7,529,151	4,947,530	7,541,447	5,062,828
สับปะรด	619,565	2,400,187	532,947	2,067,908
มันสำปะหลัง	8,656,942	30,227,542	8,431,223	30,022,052
กาแฟ	297,025	37,475	263,779	38,463

### 2.2.2. กระถินยักษ์

กระถินยักษ์ (*Leucaena leucocephala*) เป็นไม้ตระกูลถั่วที่มีความสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้โดยปมของไรโซเปียม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5-2.5 มิลลิเมตร โดยในรากขนาดเล็กหรือรากฝอย จะมีเชื้อราไมโครไรซาอยู่ร่วมกับระบบราก ช่วยให้ต้นกระถินยักษ์ได้ฟอสฟอรัสและธาตุอาหารอื่น ๆ ที่จำเป็นได้มากขึ้น โดยทั่วไปไม้กระถินยักษ์มีลักษณะ เป็นไม้ขนาดกลาง มีลำต้นเรียบ เปลือกบางสีเทาปนน้ำตาลแดง ลักษณะเนื้อไม้ มีกระพี้สีจางกว่าส่วนที่เป็นแก่น เนื้อไม้มีสีเหลืองอ่อนจนถึงสีน้ำตาลอ่อน เส้นตรง เนื้อไม้ค่อนข้างแข็ง และโดยทั่วไปความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 15 [12]

กระถินยักษ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อเนกประสงค์ ทั้งใช้เป็นอาหารของคน สัตว์เลี้ยง ทำเชื้อเพลิง ทำฟืนถ่าน ใช้ในการก่อสร้าง ช่วยปรับปรุงดิน สรุปลงได้ดังนี้

1) อาหาร ใช้เป็นอาหารของวัว ควาย แพะ แกะ เป็ด ไก่ พบว่า ที่ไนโตรเจน 36-47 กรัม/กิโลกรัม น้ำหนักแห้งของใบ และมีโปรตีนดิบ 230-300 กรัม/กิโลกรัม น้ำหนักแห้งของใบ ควรใช้ยอดอ่อนและฝักอ่อนรับประทาน เมล็ดใช้ปรุงอาหารเหมือนกับถั่วเขียว ใช้ทำเป็นแป้ง

2) ไม้แปรรูป ใช้ทำไม้แปรรูป ปากี่ เส้า มีความแข็งปานกลาง ไม้กระถินยักษ์อายุ 3 ปี มีค่าความหนาแน่น 0.66 กรัม/ซ.ม.<sup>3</sup> มีความแข็งพอที่จะมีกำลังต้านแรงดึงแรงกดและแรงตัดโค้งได้ เนื้อไม้มีรายละเอียดง่ายต่อการตัดและเลื่อย

3) ทำเยื่อกระดาษ ไม้กระถินยักษ์มีลิกนินต่ำ แต่มีไฟเบอร์สั้นกว่าไม้สน กระดาษที่ทำจากไม้กระถินยักษ์มีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดและการพับด้า แต่มีความแข็งแรงโดยเฉลี่ย มีกำลังต่อต้านแรงดึงมีความทึบสูง เหมาะสำหรับใช้ประโยชน์ในการพิมพ์และเป็นกระดาษเขียน นอกจากนี้ยังสามารถผลิตเป็นแพคเกจหรือกระดาษแก้วได้

4) ใช้ทำฟืน ไม้กระถินยักษ์ให้ค่าความร้อน 16,438.4 บีทียู/ก.ก. ใช้ฟืนกระถินยักษ์ 2.75 ก.ก. จะมีค่าเท่ากับใช้แก๊สเหลวเป็นเชื้อเพลิง 1 ก.ก. ซึ่งเท่ากับค่าความร้อน 45,265 บีทียู/ก.ก.

5) ใช้ทำถ่าน ถ่านจากกระถินยักษ์ให้ค่าน้อย มีความร้อนสูง 7,250 แคลอรี/ก.ก. (28,665 บีทียู/ก.ก.) ในขณะที่น้ำมันให้ค่าความร้อน 10,000 แคลอรี/ก.ก. (39,469.5 บีทียู/ก.ก.) ค่าความร้อนจากกระถินยักษ์จะมีความร้อนสูงร้อยละ 70 ของน้ำมัน

6) ใช้ทำแอลกอฮอล์ ราคาไม้จะต่ำกว่าราคาน้ำมันเบนซิน เมื่อใช้ไม้ผลิตแอลกอฮอล์แล้วจะได้ลิกนินเป็นผลพลอยได้ประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักแห้งของไม้ ซึ่งทำให้มีกำไรเพิ่มขึ้น

7) ช่วยปรับปรุงดิน เนื่องจากเป็นพืชตระกูลถั่ว ทำให้เพิ่มไนโตรเจนในดิน ทำปุ๋ยพืชสด นอกจากนี้ ร่มเงายังช่วยอนุบาลพืชสวนบางชนิด เช่น กาแฟ มังคุด พริกไทย โกโก้ วานิลลา เป็นต้น

8) ใช้ทำแนวกันไฟและกันลม

9) ใช้ทำแนวรั้ว ใบและกิ่งสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ด้วย

### 2.2.3 ฟางข้าว

ฟางข้าว (Rice straw) คือ วัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรหรือของเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมการเกษตร ฟางข้าวเป็นส่วนของลำต้นที่ได้จากต้นข้าวหลังจากการเก็บเกี่ยว โดยประโยชน์ของฟางข้าวมีมากมาย เช่น อาหารสัตว์ ทำปุ๋ยหมัก ทำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร ฉนวนกันความร้อนหรือเชื้อเพลิงทางชีวภาพอื่นๆ เป็นต้น [13]

## 2.3 เทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงาน

วัตถุประสงค์หลักของการแปลงชีวมวล คือ เพื่อลดความชื้น เพื่อเพิ่มค่าความร้อนและเพิ่มความสะอาดในการเก็บรักษา และปรับปรุงคุณลักษณะของชีวมวลให้สะดวกต่อการใช้และการจัดการ โดยรูปแบบของพลังงานที่ได้จากชีวมวลนั้นมีหลากหลายขึ้นอยู่กับกระบวนการที่แตกต่างกันออกไป ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกเทคโนโลยีมาใช้คือชนิดและคุณภาพของชีวมวล โดยวิธีที่การแปรสภาพชีวมวลให้เป็นพลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางด้วยชีวเคมี และกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อน [14]

1. กระบวนการเปลี่ยนแปลงด้วยชีวเคมี (Biochemical conversion) เป็นกระบวนการใช้เชื้อจุลินทรีย์เป็นตัวดำเนินการเปลี่ยนแปลงชีวมวล ได้แก่

- การหมักย่อยย้อบอากาศ (Anaerobic digestion) เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ
- การหมัก (Fermentation) เพื่อผลิตเอทานอล

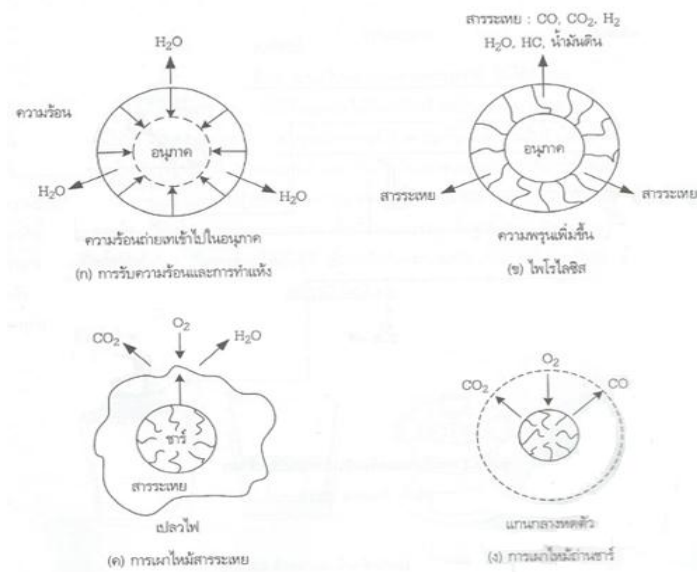
2. กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อน (Thermochemical conversion) สามารถแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการหลักๆ คือ กระบวนการเผาไหม้ กระบวนการไพโรไลซิส และ กระบวนการแกซิฟิเคชัน ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการขึ้นอยู่กับสถานะและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการนำไปใช้

### 2.3.1 กระบวนการเผาไหม้ (Combustion)

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง สิ่งที่เกิดขึ้นระหว่างที่ให้ความร้อนแก่ชีวมวล คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยความร้อนเกิดขึ้นมาจากคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจนในชีวมวลทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเผาไหม้

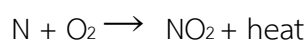
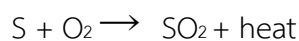
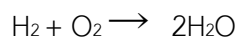
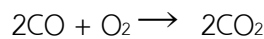
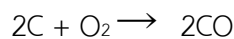
เมื่อเชื้อเพลิงของแข็งเกิดการเผาไหม้ จะสูญเสียมวลใน 3 ช่วง ได้แก่ (1) การอบแห้ง จากนั้นอนุภาคจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิไพโรไลซิส (2) การปลดปล่อยสารระเหย เกิดการไพโรไลซิสของอนุภาคเชื้อเพลิงของแข็ง ได้สารระเหยอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้และชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ (3) การเผาไหม้ชาร์ เกิดขึ้นหลังจากไพโรไลซิสสิ้นสุด โดยที่สารระเหยเกิดการเผาไหม้พร้อมๆ กันกับการเผาไหม้ของชาร์ โดยกลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงของแข็งแสดงดังรูปที่ 2.4 การสูญเสียมวลในแต่ละช่วงขึ้นอยู่กับความชื้น สารระเหยอินทรีย์ และเถ้าของเชื้อเพลิงของแข็ง





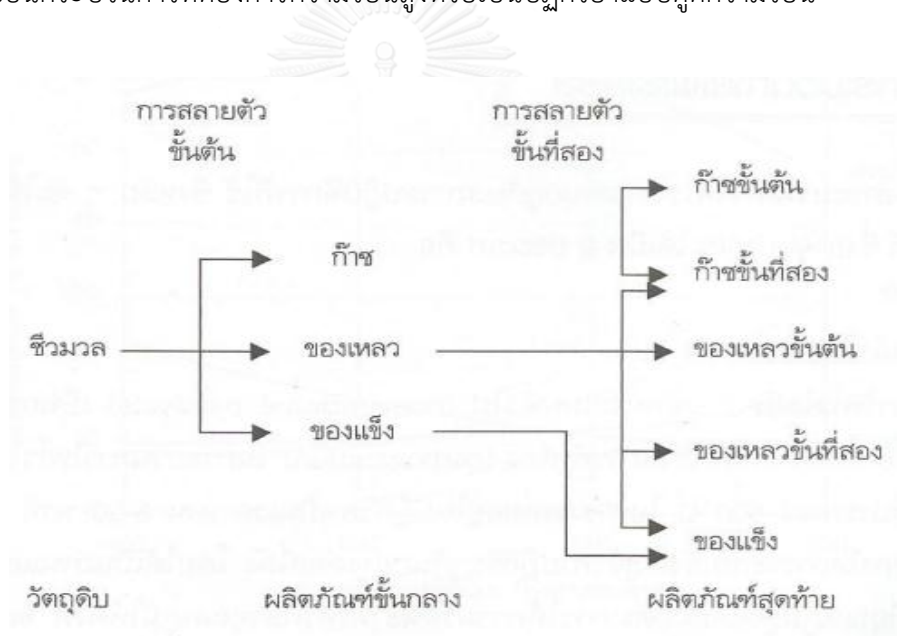
รูปที่ 2.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงของแข็ง [15]

ชีวมวลจะถูกเผาไหม้ในบรรยากาศ กระบวนการเผาไหม้เป็นหนึ่งในกระบวนการที่ได้รับความนิยมนอย่างมาก โดยพลังงานที่ได้ คือ พลังงานทางความร้อน พลังงานกล หรือพลังงานไฟฟ้า เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีที่ถูกกักเก็บไว้ในชีวมวล โดยการเผาไหม้มักใช้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ คือ แก๊สร้อนและชีวมวลที่เหมาะสม กระบวนการเผาไหม้ควรมีปริมาณความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 50 นอกจากนี้ก่อนนำชีวมวลเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ควรจะมีการอบไล่ความชื้นออกก่อน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้มีดังต่อไปนี้



### 2.3.2 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิส คือกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible chemical process) ทำให้เชื้อเพลิงแตกตัวด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศแบบไร้ออกซิเจนหรืออากาศ โดยให้ความร้อนสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส ในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส เชื้อเพลิงจะเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นชั้นๆ แล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของแก๊ส ของเหลว และของแข็ง แสดงดังรูปที่ 2.5 คุณภาพของน้ำมันชีวภาพขึ้นอยู่กับกระบวนการที่เลือกใช้หรือการเลือกสภาวะที่เหมาะสม การสลายตัวของลิกโนเซลลูโลสของชีวมวลจะถูกสลายในอัตราการสลายตัวที่แตกต่างกันไป จากข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) แสดงให้เห็นว่าชีวมวลเกิดจากสลายตัวได้ และในระหว่างการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.5 โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ต้องการความร้อนสูงหรือเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน



รูปที่ 2.5 กระบวนการแตกตัวทางความร้อนของชีวมวล [15]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลประกอบไปด้วย แก๊ส ของเหลวและของแข็ง โดยของแข็งที่ได้เรียกว่า ชาร์ ซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุถ่านเป็นหลักและมีเถ้าอินทรีย์ผสมอยู่ด้วย ส่วนของเหลวที่ควบแน่นได้ที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า ของเหลวไพโรลิกเนียส หรือกรดไพโรลิกเนียส หรือน้ำมันไพโรไลซิส ลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำคล้ายน้ำมันดิบ บางครั้งเรียกว่า น้ำมันดิบชีวภาพ กระบวนการไพโรไลซิสสามารถควบคุมให้เกิดผลิตภัณฑ์สถานะใดสถานะหนึ่งได้ โดยการควบคุมปัจจัยที่สำคัญต่างๆ ของกระบวนการ เช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น

กระบวนการทางเคมีกายภาพที่เกิดขึ้นระหว่างไพโรไลซิสเป็นดังนี้

- 1 การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนยังเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มอุณหภูมิข้างในเชื้อเพลิงให้สูงขึ้น
- 2 การเริ่มเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสข้างต้น มีการปล่อยไอสารระเหย และเกิดเป็นถ่าน
- 3 การไหลของไอสารระเหยร้อนผ่านเนื้อเชื้อเพลิงที่ยังเย็นอยู่ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างกัน
- 4 การควบแน่นของไอสารระเหยโมเลกุลใหญ่บางส่วนในเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ ตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองที่สามารถเปลี่ยนสารระเหยข้างต้นเป็นน้ำมัน
- 5 การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองแบบเร่งปฏิกิริยาด้วยตนเองไปพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสข้างต้น มีการแข่งขันกันแย่งสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา
- 6 การแตกตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อปฏิกิริยารวมเกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิง ปฏิกิริยาเปลี่ยนโมเลกุลของแข็งเป็นแก๊สด้วยไอน้ำ ปฏิกิริยาการรวมตัวของสารอนุมูล ปฏิกิริยาการไถ่น้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น

#### 2.3.2.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

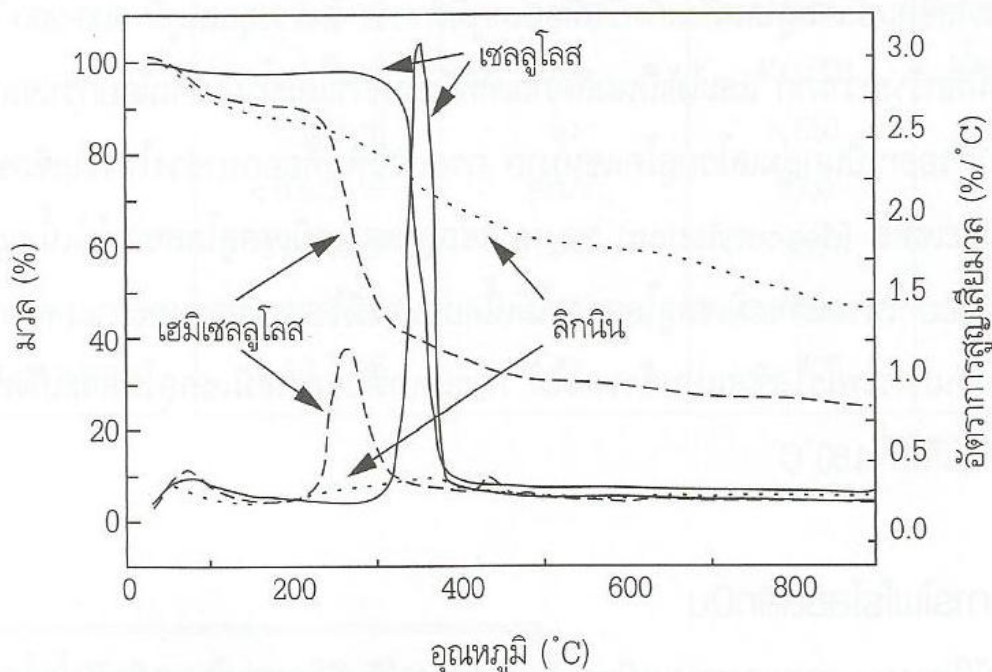
ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ปฏิบัติการ โดยทั่วไปจะใช้เวลาหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นเกณฑ์ ซึ่งอาจแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ

- ไพโรไลซิสแบบช้า ผลผลิตหลักที่ได้ส่วนใหญ่ คือ ชาร์ โดยทั่วไปชีวมวลจะถูกให้ความร้อนประมาณ 500 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนที่ 10-20 องศาเซลเซียสต่อนาที ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยอยู่ที่ 5-30 นาที ดังนั้น องค์ประกอบที่อยู่ในเฟสสารระเหยสามารถทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบส่วนอื่นๆได้ ทำให้ผลผลิตหลักของแข็งและของเหลวเพิ่มมากขึ้น และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ชีวมวลที่ผ่านการไพโรไลซิสแบบช้าส่วนใหญ่มักให้ผลผลิตหลักที่เป็นชาร์มากกว่าผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยชาร์นั้นเป็นส่วนที่ได้จากองค์ประกอบของลิกนินเป็นหลัก

- ไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ กระบวนการที่มีอัตราการให้ความร้อนสูง ชีวมวลถูกสลายกลายเป็นไอสารระเหย ของเหลว และชาร์ เมื่อทำให้เย็นลงจะเกิดการควบแน่นของไอสารระเหย ลักษณะของไอสารระเหยที่ได้หลังจากการควบแน่นจะอยู่ในรูปของของเหลวหนืดสีน้ำตาลดำ ซึ่งของเหลวหนืดนี้มีค่าความร้อนประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไป การไพโรไลซิสแบบเร็วนี้ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวสูงถึงร้อยละ 60-75 โดยน้ำหนัก ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีอยู่ร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนัก ส่วนแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นมีอยู่ร้อยละ 10-20 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชีวมวลที่นำมาใช้ ดังนั้นการไพโรไลซิสด้วยอัตราการให้ความร้อนสูงจะให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นหลัก เมื่อเปรียบเทียบกับ การไพโรไลซิสด้วยอัตราการให้ความร้อนต่ำ พบว่า ชาร์ เป็นผลิตภัณฑ์หลักมากกว่าของเหลว แต่อย่างไรก็ตามการไพโรไลซิสแบบเร็วยังมีข้อจำกัดอยู่ คือ จำเป็นต้องใช้ชีวมวลที่มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร เนื่องจากภายในระบบนี้มีอัตราการให้ความร้อนและอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง และการลดอุณหภูมิของสารระเหยระหว่างไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากขึ้น

### 2.3.2.2. การไพโรไลซิสชีวมวล

พฤติกรรมของชีวมวลระหว่างที่เกิดการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับพฤติกรรมขององค์ประกอบหลักของชีวมวล รูปที่ 2.6 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยความร้อนขององค์ประกอบชีวมวลจากการวิเคราะห์ด้วยเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสของชีวมวลมาจากการรวมกันแบบเชิงเส้นของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแต่ละองค์ประกอบ โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นแหล่งหลักของการเกิดสารระเหยและทาร์ ในขณะที่ลิกนินเป็นแหล่งหลักของการเกิดชาร์ ชีวมวลจะสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาต่างๆ พร้อมกัน โดยปฏิกิริยาปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์เหล่านี้ จะเกิดปฏิกิริยาอื่นต่อไปอีก ชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากการแตกตัวในปฏิกิริยาปฏิกิริยาและจากปฏิกิริยาขั้นสอง



รูปที่ 2.6 การสูญเสียมวลขององค์ประกอบชีวมวลแต่ละชนิด [15]

### 2.3.2.3. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

- ของแข็งหรือชาร์ คือ คาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนหรือสิ่งที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากการไพโรไลซิส ซึ่งอยู่ในรูปของของแข็ง โดยของแข็งที่ได้นี้มีกบแร่ธรรมชาติเหลืออยู่ ชาร์ส่งผลต่อลักษณะของพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs) ในระหว่างการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำและสมบัติของชาร์ที่ได้หลังจากไพโรไลซิส มีผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของชาร์ ดังนั้น ปริมาณและลักษณะของรูพรุนจะเป็นสิ่งที่กำหนดความสามารถของแก๊สที่จะเข้าถึงพื้นผิวที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active surface site) นอกจากนี้แร่ธรรมชาติที่อยู่ในชาร์จะมีผลต่อสมบัติของชาร์ สภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสก็ส่งผลกระทบต่อสมบัติของชาร์เช่นเดียวกัน

- ของเหลวหรือน้ำมันดิบชีวภาพ ของเหลวที่ได้นี้ไม่ได้มาจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเข้าสู่ภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกในระหว่างการไพโรไลซิส แต่เกิดจากการลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิที่เข้าร่วมกับระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาสั้น ดังนั้น องค์ประกอบทางเคมีของเหลวหรือน้ำมันดิบชีวภาพสามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ เมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิก โดยมักเกิดขึ้นในระหว่างการกักเก็บ

- แก๊ส เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการไพโรไลซิสชีวมวล องค์ประกอบของแก๊สที่พบ คือ ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลักๆ นอกจากนี้ ยังพบแก๊สกลุ่มที่มี  $C_2$  ปะปนมาด้วย โดยคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์มักพบมากในช่วงอุณหภูมิต่ำ และไฮโดรเจนมักพบมากเมื่อให้อุณหภูมิที่สูง

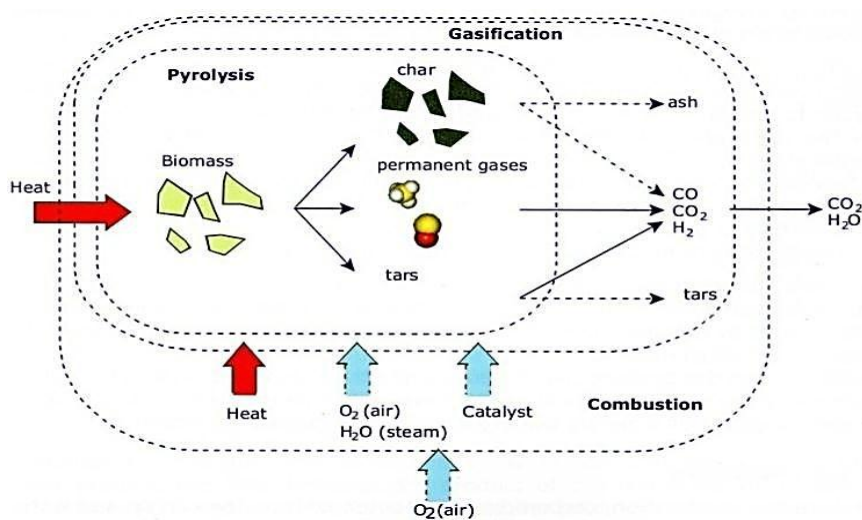
### 2.3.3 กระบวนการแก๊สซิเคชัน (Gasification)

การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการแก๊สซิเคชัน เป็นวิธีที่น่าสนใจมากวิธีหนึ่ง โดยกระบวนการแก๊สซิเคชันเป็นการแปรสภาพเชื้อเพลิงของแข็งด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) ที่อุณหภูมิสูงด้วยอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวมาเป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Producer gas) ที่มีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำถึงปานกลาง แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและการนำมาใช้ประโยชน์ [15]

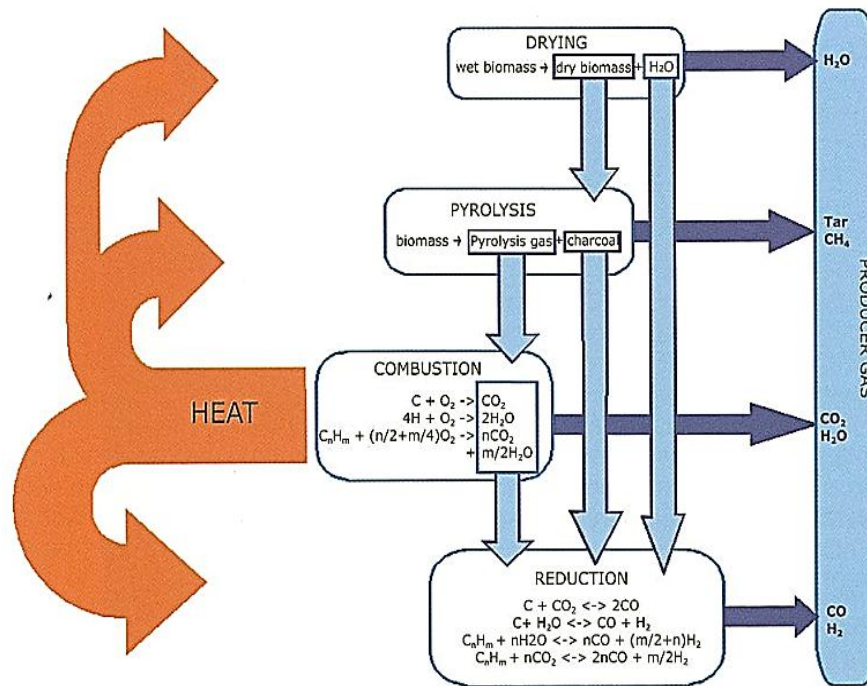
แก๊สซิเคชันของชีวมวล คือ การเปลี่ยนวัตถุดิบชีวมวลของแข็งให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงหรือแก๊สวัตถุดิบตั้งต้นทางเคมี (Syngas) ส่วนใหญ่องค์ประกอบของแก๊สที่พบ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) โดยอาศัยกระบวนการทางเคมี ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในสภาวะที่จำกัดปริมาณอากาศ หรือออกซิเจน หรือไอน้ำ ทำให้ชีวมวลเกิดการแตกตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในรูปของของแข็งและแก๊ส แก๊สซิเคชันเป็นขั้นตอนที่เกิดหลังจากไพโรไลซิสและมีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการมากมาย โดยรูปที่ 2.8 แสดงรูปแบบของแก๊สซิเคชันจากชีวมวล



รูปที่ 2.8 แก๊สซิเคชันจากชีวมวล [16]

กลไกของแก๊สซิเคชันของชีวมวลแสดงดังรูปที่ 2.9 สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน แต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

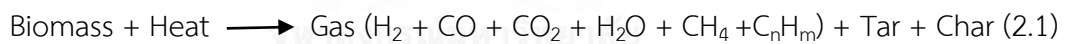
1. การอบให้แห้ง ความชื้นในชีวมวลถูกขับออกและกลายเป็นไอน้ำ สารตั้งต้นเหล่านี้จะไม่ถูกสลายในกระบวนการนี้ เพราะอุณหภูมิที่ใช้ไม่สูงมากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้
2. ไพโรไลซิสหรือการปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) เมื่อชีวมวลที่ผ่านการอบให้แห้งแล้วจะถูกสลายกลายเป็นสารระเหยที่มีมวลโมเลกุลต่ำจนถึงสารระเหยที่มีมวลโมเลกุลสูง รวมไปถึงทาร์และชาร์ดังแสดงสมการ 2.1 ปฏิกิริยานี้จะเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ดังนั้น บริเวณนี้จึงจำเป็นต้องให้ความร้อนสูง
3. การเผาไหม้หรือออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการไพโรไลซิสบางส่วนจะถูกออกซิเดชันกับออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศและอีกส่วนจะกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังแสดงสมการ 2.2-2.4
4. แก๊สซิเคชันหรือรีดักชัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีปริมาณออกซิเจนอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากออกซิเจนถูกใช้ไปในกระบวนการออกซิเดชันก่อนหน้านี้ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้หลังจากผ่านแก๊สซิเคชันส่วนมากเป็นแก๊ส โดยแก๊สหลักๆ ที่พบ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ซึ่งขั้นตอนในการเกิดแก๊สเหล่านี้จะแสดงให้เห็นดังสมการที่ 2.5-2.13



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน [16]

ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในระหว่างกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวล

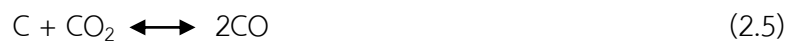
ไพโรไลซิส :



การเผาไหม้หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน :



ปฏิกิริยาบาวดาร์ด (Boudouard) :



ปฏิกิริยาน้ำและแก๊ส (Water-gas) :

แบบที่ 1 :



แบบที่ 2 :





ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift) :



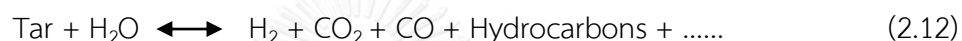
ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation) :



ปฏิกิริยามีเทนรีฟอร์มมิง (Methane reforming) :



ปฏิกิริยาทาร์รีฟอร์มมิง (Tar reforming) :



ปฏิกิริยาไฮโดรคาร์บอนรีฟอร์มมิง (Hydrocarbon reforming) :



แก๊ซซิเคชันของชีวมวลเป็นกระบวนการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ดังนั้น ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะมีความซับซ้อนและสามารถเกิดผลิตภัณฑ์หรือแก๊สหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของชีวมวล และเทคนิคในการจำกัดปัจจัยต่างๆ อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวไม่ได้มีเพียงแต่แก๊สเชื้อเพลิงเท่านั้น ยังมีของแข็งและสิ่งเจือปนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หมด ได้แก่ ถ่านชาร์ (Char) เถ้า (Ash) ทาร์ (Tar) และไอน้ำ เป็นต้น

### 2.3.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแก๊ซซิเคชัน

แก๊ซซิเคชันชีวมวลสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ไพโรไลซิสของชีวมวล ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่างๆ ออกมา หลังจากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 ต่อไป นั่นคือ ขั้นตอนของแก๊ซซิเคชัน โดยขั้นตอนนี้เป็นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องของแก๊ส ของเหลวและของแข็งหรือชาร์ ที่ผ่านการไพโรไลซิสแล้ว ส่งผลให้ของเหลวและของแข็งทำปฏิกิริยากลายเป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊ซซิเคชันมี 3 ประเภท คือ

### 1. ผลกระทบที่เป็นของแข็ง

ของแข็งที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการแกซีฟิเคชันเรียกว่า ชาร์ มีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ชาร์ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลกระทบทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

### 2. ผลกระทบที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งคือ ทาร์ องค์ประกอบของทาร์ส่วนมากมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยวงแหวนแนพทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทิลีนโมเลกุล โครงสร้างของทาร์ส่วนใหญ่พบว่า มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ C<sub>5</sub> - C<sub>6</sub> ขึ้นไป และโดยส่วนใหญ่สมบัติของทาร์จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของกระบวนการ

### 3. ผลกระทบที่เป็นแก๊ส

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

การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง

- แก๊สผสมระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนต่ำ เช่น มีเทน สามารถเป็นแก๊สเชื้อเพลิงให้กับเตาเผาเพื่อใช้ผลิตความร้อนหรือใช้กับเครื่องยนต์เพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า
- แก๊สผสมคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน (Syngas) มักเกิดขึ้นมากเมื่อใช้อุณหภูมิแกซีฟิเคชันสูง นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงจะส่งเสริมให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นของสารประกอบอื่นๆมากมาย

## 2.4 ทาร์ (Tar)

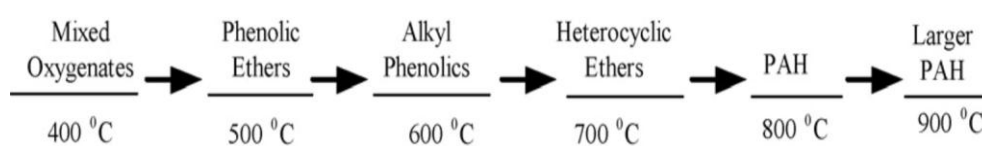
ทาร์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะของเหลว สีดำ เหนียวและหนืด เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูง พบในแก๊สฟิเคชันของชีวมวล ทาร์สามารถควบแน่นในบริเวณเตาเผาที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของแก๊สเชื้อเพลิงต่ำลง และทำให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในระหว่างกระบวนการเพิ่มขึ้น ดังนั้น ทาร์จึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดภายในระบบ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อต่างๆ ตามมา ตัวอย่างเช่น เมื่อทาร์ถูกควบแน่นจะส่งผลให้ท่อขนส่งแก๊สเชื้อเพลิงเกิดการอุดตันและอาจเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น เป็นต้น

ทาร์ เป็นของผสมจากไฮโดรคาร์บอนที่มีความซับซ้อน สามารถควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ องค์ประกอบของทาร์ประกอบด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ สารประกอบพวกแอโรแมติก และสารประกอบพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon compounds, PAH) ซึ่งมีสัดส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงของแข็งที่ใช้ และจากวิจัยที่ผ่านมามีความพยายามที่จะให้คำนิยามของทาร์ จนถึงปีค.ศ. 1998 ผู้เชี่ยวชาญจำนวนมากได้ให้คำจำกัดความของทาร์ว่า ทาร์ คือ องค์ประกอบของสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีน้ำหนักโมลสูงกว่าเบนซีน โดยทาร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังแสดงตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การแบ่งประเภทของทาร์ [17]

	Light tar		Heavy tar
	Light aromatic	Light PAH	Heavy PAH
Property	Usually light hydrocarbons with single ring; do not pose a problem regarding condensability and solubility	2 and 3 rings compounds; condense at low temperature even at very low concentration	Larger than 3-ring, these components condense at high-temperatures at low concentrations
Representative compounds	Toluene, Ethylbenzene, Xylenes, Syrene	Indene, Biphenyl, Naphthalene, Methylnaphthalene,	Fluoranthene, Chrysene, Perylene, Coronene

ลักษณะของทาร์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สสามารถเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง ซึ่งทำให้ทาร์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบถูกสลายเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมวลโมเลกุลต่ำ แอโรแมติก และโอเลฟินและต่อมาเกิดการรวมตัวกลายเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมวลโมเลกุลสูงและสารประกอบพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) มากขึ้น ดังนั้นองค์ประกอบของทาร์จะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา ดังแสดงตามรูปที่ 2.10



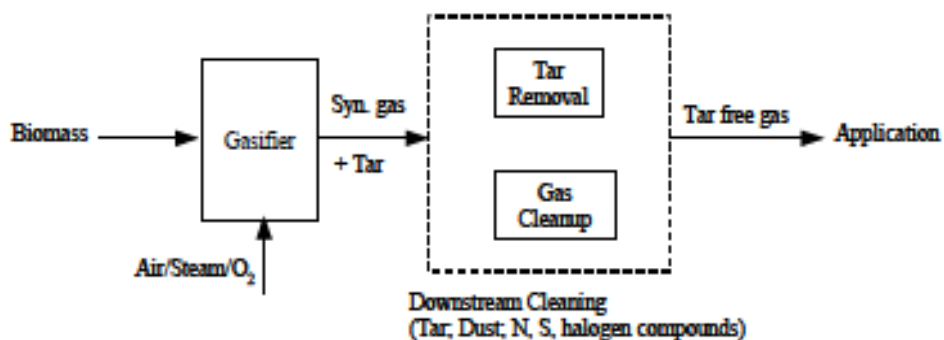
รูปที่ 2.10 แสดงองค์ประกอบของทาร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ [18]

## 2.5 วิธีการกำจัดทาร์ที่ได้จากแก๊สพีเคชัน

การกำจัดทาร์ที่ปะปนมากับผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแก๊สพีเคชันนั้น สามารถกำจัดได้หลายวิธี ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การกำจัดทาร์เชิงกลหรือหลังการเกิดปฏิกิริยา (Tar removal) และการกำจัดทาร์ด้วยการแตกตัว (Tar cracking) ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

### 2.5.1 การกำจัดทาร์เชิงกลหรือหลังการเกิดปฏิกิริยา (Tar removal)

เป็นการทำความสะอาดแก๊สร้อนหลังจากผ่านเตาเผา ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เป็นการดักจับทาร์แบบเชิงกล เช่น การใช้ไซโคลน ชุดกรองแบบต่างๆ การแยกอนุภาค การใช้เครื่องดักไฟฟ้าสถิตย์ หรือการดักจับเขม่า โดยใช้ร่วมในการดักจับฝุ่นละออง เพื่อดักจับอนุภาคที่ปะปนจากผลิตภัณฑ์แก๊ส เป็นวิธีปรับปรุงทางเคมีและทางกายภาพ โดยประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นละอองและทาร์ถูกแสดงดังตารางที่ 2.6 อย่างไรก็ตาม วิธีนี้เป็นเพียงการแยกทาร์ออกจากแก๊สเชื้อเพลิงเท่านั้น ไม่ได้ทำลายโครงสร้างภายในแต่อย่างใด และข้อเสียหลักๆ ข้อเทคนิคนี้ คือ การลงทุนค่อนข้างสูง และอาจมีปัญหากับการกำจัดของเสียตามมา



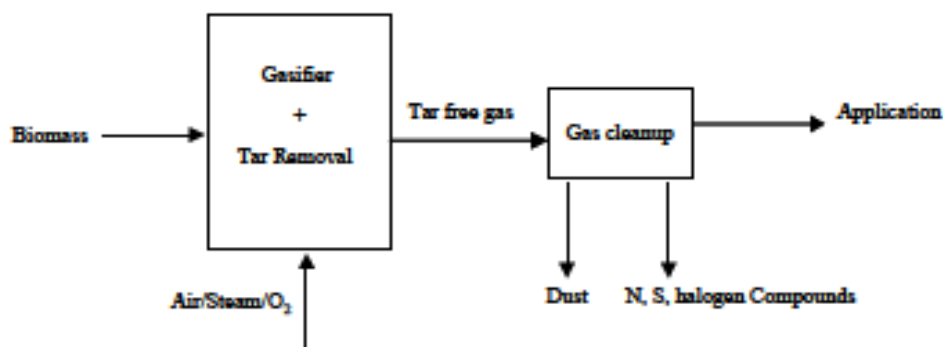
รูปที่ 2.11 แสดงแผนผังการกำจัดทาร์เชิงกลหรือหลังเกิดปฏิกิริยา [19]

ตารางที่ 2.6 ร้อยละประสิทธิภาพการดักฝุ่นละอองและทาร์ [19]

	ดักฝุ่นละออง	ดักทาร์
เครื่องกรองชั้นทราย	70-99	50-97
ถังพ่นน้ำ	60-98	10-25
เครื่องดักไฟฟ้าสถิตแบบเปียก	>99	0-60
เครื่องแยกอนุภาคแบบหมุน	85-90	30-70
เครื่องกรองผ้า	70-95	0-50
ตัวดูดซับทาร์	-	50
เครื่องดักจับเขม่าแบบคอคอด	-	50-90

### 2.5.2 การกำจัดทาร์ด้วยการแตกตัว (Tar cracking)

จากรูปที่ 2.12 แสดงแผนผังการกำจัดทาร์ด้วยการแตกตัวหรือระหว่างการเกิดปฏิกิริยา เทคนิคนี้ทาร์จะถูกเปลี่ยนแปลงไปให้อยู่ในรูปของแก๊สภายในเตาเผา โดยประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบและสถานะที่ใช้ในเตาเผา ส่วนความเข้มข้นของทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิของเตาเผา นอกจากนี้ ลักษณะของทาร์ส่วนใหญ่มักขึ้นกับเชื้อเพลิงที่มาใช้ และวิธีการกำจัดทาร์ด้วยการแตกตัวหรือการกำจัดทาร์ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ



รูปที่ 2.12 แสดงแผนผังการกำจัดทาร์ด้วยการแตกตัว [19]

#### 2.5.2.1 การแตกตัวทาร์ด้วยความร้อน (Thermal Cracking)

เทคนิคนี้เป็นการให้ความร้อนกับทาร์ที่ได้จากแก๊ซพีเคชันด้วยอุณหภูมิสูง ส่งผลให้โมเลกุลของทาร์เกิดการแตกตัวกลายเป็นแก๊ซที่มีมวลโมเลกุลต่ำลง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งเสริมให้ทาร์เกิดการแตกตัวด้วยความร้อนได้ดีขึ้น เช่น การเพิ่มเวลาของปฏิกิริยาจะช่วยให้ทาร์เกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น หรือส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน โดยการเติมอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปผสม ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการแตกตัวทาร์ด้วยความร้อนจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น หากอุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส

#### 2.5.2.2 การแตกตัวทาร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยแตกตัวทาร์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมานานจนถึงปัจจุบัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ส่งผลให้ทาร์แตกตัวกลายเป็นแก๊ซเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น หรือช่วยปรับปรุงองค์ประกอบของแก๊ซเชื้อเพลิงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการสลายทาร์ที่ดีควรมีลักษณะดังต่อไปนี้ [20]

1. มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ สามารถป้องกันการเกาะตัวและการอุดตันจากเขม่า
2. สามารถสร้างขึ้นมาใหม่และนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก
3. มีประสิทธิภาพในการกำจัดทาร์
4. สามารถรีฟอร์มมิ่งมีเทนได้ หากต้องการแก๊สวัตถุดิบตั้งต้นทางเคมี (Syngas)
5. ควรมีความแข็งแรง คงทน
6. ราคาไม่แพง

โดยตัวเร่งปฏิกิริยาการกำจัดทาร์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสินแร่ (Mineral catalyst)
- ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโลหะ (Metal catalyst)
- ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบคาร์บอน (Carbon catalyst)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสินแร่และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโลหะ ส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพการกำจัดทาร์สูง แต่ปัญหาหลักของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดนี้ คือ การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ว่องไวต่อสิ่งเจือปน ทำให้เกิดการอุดตันบนพื้นผิวของรูพรุน นอกจากนี้ยังมีราคาแพงและส่วนใหญ่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบคาร์บอนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาแบบคาร์บอนมีอยู่หลากหลายแบบ เช่น ถ่านกัมมันต์ ชาร์ เป็นต้น ปัจจุบัน ชาร์กำลังได้รับความนิยมที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังกระบวนการไพโรไลซิสจากชีวมวลหรือถ่านหิน ทำให้การผลิตชาร์จึงมีราคาถูก

## 2.6 การผลิตชาร์ (char)

ชาร์ เป็นผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสของถ่านหินหรือชีวมวลที่อุณหภูมิสูง มีองค์ประกอบของคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนใหญ่ มีสารระเหยประมาณร้อยละ 20-30 และซีเฝ้าประมาณร้อยละ 0.5-5 ขึ้นอยู่เชื้อเพลิงของแข็งที่ใช้ ค่าความร้อนประมาณ 28-33 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ชาร์ที่ได้จากถ่านหินหรือชีวมวลมีลักษณะเป็นผงคาร์บอนสีดำ น้ำหนักเบา ไร้ควัน ความบริสุทธิ์ของคาร์บอนมากกว่าแกรไฟต์ นอกจากนี้ชาร์ยังมีรูพรุนบนพื้นผิวสูง ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงเหมาะต่อการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาลดทาร์ได้ นอกจากนี้ ชาร์สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนนพาทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไฮยาโนเจน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน (ถ่านไร้ควัน) เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

### 2.6.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตชาร์

วัสดุที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตชาร์

- เป็นของเหลือทิ้ง ราคาถูกและหาได้ง่าย
- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง
- มีปริมาณสารระเหยและสารอินทรีย์ต่ำ
- มีคุณสมบัติคงที่ เช่น ไม่สลายตัวเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานาน

วัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบโดยตรงมักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ (หมายถึงสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ) เป็นส่วนใหญ่ สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

- พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย 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 พบว่า วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและสารระเหยสูง เช่น ไม้ ลิกนิน มักได้ชาร์ที่มีปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) สูงและความหนาแน่นต่ำ ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว จะได้ชาร์ที่มีปริมาตรของรูพรุนเล็ก (Micropore volume) สูง อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของชาร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น วิธีการผลิต ภาวะที่ใช้ เป็นต้น

### 2.6.2 การผลิตชาร์

ชาร์สามารถผลิตได้หลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมหลักๆ มีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีใช้เตาที่มีแหล่งความร้อนภายใน โดยความร้อนที่ใช้มาจากกระบวนการเผาไหม้บางส่วนของชีวมวลที่จะกลายเป็นชาร์ และอีกวิธีหนึ่งคือ การใช้ความร้อนจากภายนอก โดยความร้อนที่ใช้มาจากภายนอกส่งเข้าไปภายในภาชนะปิดที่บรรจุชีวมวลไว้ ทั้งนี้ขั้นตอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการทั้งสอง ประกอบด้วย การทำแห้ง การไพโรไลซิส และการทำให้เย็น



1. ช่วงการทำแห้ง ก่อนที่ชีวมวลจะถูกเผาไหม้กลายเป็นชาร์ ต้องไล่ความชื้นในเนื้อไม้ ออกเสียก่อน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การขับไล่ไอน้ำออกจากช่องของเนื้อไม้ มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส ยิ่งชีวมวลมีความชื้นมาเท่าไรเวลาและพลังงานที่ใช้ก็จะมากขึ้น เมื่อไอน้ำออกจากชีวมวลหมดแล้ว ต่อมากระบวนการจะเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึง 150 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมินี้โมเลกุลของน้ำที่ยึดติดหรือดูดซับบนพื้นผิวของโครงสร้างเซลล์เนื้อไม้จะถูกขับออกมาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส กระบวนการทำแห้งในเตาถ่านนี้ จะเห็นน้ำที่ถูกปลดปล่อยออกมา จะอยู่ในรูปของ ไอน้ำสีขาว ซึ่งสามารถสังเกตได้ในช่วงแรกของการทำชาร์

2. ช่วงไพโรไลซิส เมื่อมีการให้ความร้อนสูงขึ้นเรื่อยๆ อุณหภูมิของเนื้อไม้ชีวมวลจะสูงขึ้น และทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวทางความร้อน การสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยสารเคมีออกมา ซึ่งผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่หลุดออกมาจะอยู่ในรูปของแก๊ส หรือไอ หรือเรียกว่า สารระเหย สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการนี้ ทำให้สีของควันจากเตาเผาเปลี่ยนเป็น สีเข้มขึ้น และมีกลิ่นของทาร์ออกมาด้วย ความร้อนที่ต้องการสำหรับปฏิกิริยาจะลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับช่วงการทำแห้ง ดังนั้น ความจำเป็นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงบางส่วนก็ลดลง การป้อนอากาศจะถูกจำกัดในช่วงนี้

3. ช่วงการทำให้เย็น เมื่อปฏิกิริยาไพโรไลซิสใกล้จะสิ้นสุด อุณหภูมิในเนื้อไม้ชีวมวลจะเริ่มลดลง โดยปริมาณควันที่ปลดปล่อยออกมาจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในช่วงนี้เตาเผาต้องปิดสนิทไม่รั่วซึม ถ้ามีอากาศเข้าไปในระบบโดยที่ชาร์ยังมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดติดไฟของชาร์จะทำให้ชาร์เกิดการเผาไหม้ต่อเนื่อง อาจทำให้ปริมาณของชาร์ที่ได้ลดลง เมื่อเก็บชาร์ออกจากเตาเผาแล้ว จะตั้งทิ้งไว้ภายใต้สภาวะบรรยากาศเพื่อให้ชาร์ปรับสภาพ และในช่วงนี้สารระเหยบางส่วนจะยังปลดปล่อยออกมาและดูดความชื้นหรือออกซิเจนกลับเข้าไปในชาร์

## 2.7 ถ่านหิน (Coal)

ถ่านหิน [21] เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอดีตจนถึงปัจจุบัน อุตสาหกรรมถ่านหินซึ่งรวมทั้ง การสำรวจ การผลิตและการใช้นั้นได้มีการพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในประเทศที่เป็นผู้นำทางด้านเศรษฐกิจอุตสาหกรรม เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่นและกลุ่มประเทศในยุโรป

สำหรับภายในประเทศไทยนั้นถึงแม้จะมีปริมาณสำรองถ่านหินอยู่มากกว่า 2,000 ล้านตัน แต่ส่วนใหญ่เป็นถ่านหินที่มีชั้นคุณภาพต่ำ ตั้งแต่ลิกไนต์ (Lignite) จนถึง ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) อีกทั้งภาพลักษณ์ที่ไม่ดีด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอดีต ทำให้การใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมีปริมาณไม่มาก หากเปรียบเทียบกับประเทศอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ในอนาคตคาดว่าจะมีการใช้ถ่านหินเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกและมีปริมาณสำรองมากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น แต่ทั้งนี้การนำถ่านหินมาใช้ผลิตพลังงานจะต้องใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด เพื่อกำจัดการพิษที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการผลิตและการใช้ถ่านหิน

### 2.7.1 ธรรมชาติของถ่านหิน

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงธรรมชาติมีสถานะเป็นของแข็งไม่มีรูปผลึกที่แน่นอน โดยทั่วไปมีสีเข้ม ตั้งแต่สีน้ำตาลจนถึงสีดำสนิท มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ คาร์บอน ซึ่งมีอยู่ประมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน สารระเหย ความชื้น และแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งเกิดจากซากพืช ซากสัตว์ ตลอดจนดินโคลนที่สลายตัวและทับถมอยู่ภายใต้ภาวะความดันและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้พื้นพิภพ รวมถึงการเคลื่อนของชั้นเปลือกโลกหลายล้านปี ทำให้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนก็เริ่มลดน้อยลง กลายเป็นถ่านหินชั้นต่างๆ ซึ่งสามารถติดไฟได้ จึงมีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

### 2.7.2 การจำแนกประเภทของถ่านหิน

ระบบของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกาได้จำแนกถ่านหินเป็น 4 ลำดับชั้น โดยเรียงจากประเภทที่มีคาร์บอนมากที่สุดไปน้อยที่สุดคือ แอนทราไซต์ บิทูมินัส ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ ซึ่งลักษณะของถ่านหินและการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของถ่านหินแต่ละชนิดถูกแสดงดังรูปที่ 2.13 และตารางที่ 2.6 ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 ลักษณะของถ่านหินแต่ละชนิด [22]

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของถ่านหินแต่ละชนิด [22]

ถ่านหิน	ปริมาณความร้อน	ปริมาณความชื้น	ปริมาณซี้เถ้า	ปริมาณกำมะถัน
1. แอนทราไซต์	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
2. บิทูมินัส	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
3. ซับบิทูมินัส	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
4. ลิกไนต์	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ-สูง

คุณสมบัติทั่วไปของถ่านหินที่อยู่ในลำดับสูง คือ มีปริมาณคาร์บอนมากให้ความร้อนสูง มีไฮโดรเจนและออกซิเจนอยู่น้อย ในขณะที่ถ่านหินที่อยู่ในลำดับต่ำจะมีปริมาณคาร์บอนน้อย แต่มีไฮโดรเจนและออกซิเจนมาก ซึ่งแต่ละลำดับชั้นถูกแบ่งย่อยลงไปอีกตามคุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนที่ต่างกันไป ลักษณะต่างๆไปของถ่านหินในแต่ละลำดับชั้นดังกล่าว สรุปได้ดังนี้

#### 1. ถ่านหินแอนทราไซต์

ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่ถูกจัดอยู่ในลำดับสูงสุด ถือว่าเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุดในลักษณะดำเป็นเงามัน มีความวาวสูง มีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 90 ขึ้นไป มีปริมาณความชื้นต่ำมากและมีค่าความร้อนสูง มีคว้นน้อยแต่จุดไฟติดยาก ส่วนใหญ่มักใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนภายในบ้าน และในอุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น

#### 2. ถ่านหินบิทูมินัส

ถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินเนื้อแน่น มีลักษณะแข็ง และมักจะประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำสนิทที่มีลักษณะเป็นมันวาว มีปริมาณคาร์บอนประมาณร้อยละ 80-90 โดยน้ำหนัก และมีความชื้นร้อยละ 2-7 โดยน้ำหนัก ถ่านหินประเภทนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 กลุ่มตามความสามารถในการระเหย คือ ประเภทที่มีความสามารถในการระเหยสูง กลาง และต่ำ ถ่านหินชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้เพื่อถลุงโลหะ หรืออาจใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนและความสามารถในการระเหย

### 3. ถ่านหินซับบิทูมินัส

ถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ เนื้อถ่านหินจะมีความอ่อนตัวคล้ายขี้ผึ้ง ไม่แข็งมาก มีปริมาณคาร์บอนประมาณร้อยละ 71-77 โดยน้ำหนัก และมีความชื้นประมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก ถ่านหินประเภทนี้มีส่วนมากใช้เพื่อผลิตไฟฟ้า หรือใช้ในอุตสาหกรรม

### 4. ถ่านหินลิกไนต์

ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินที่ยังพอมีซากพืชเหลือปรากฏให้เห็นอยู่เล็กน้อย มีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ มีปริมาณคาร์บอนค่อนข้างน้อย และมีปริมาณความชื้นสูงถึงร้อยละ 30-70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่ถูกใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าและถือว่าเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gillert และคณะ [23] ศึกษาพฤติกรรมของไอระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลบนขาร์ต่อการลดทอนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยชีวมวลที่ใช้จะถูกสลายในอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 500 องศาเซลเซียส กลายเป็นไอระเหยผ่านไปยังบริเวณที่เกิดการแตกตัวของทาร์ (Tar cracking zone) ซึ่งภายในท่อปฏิกรณ์มีตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากชีวมวลบรรจุอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที พบว่า ค่าเฉลี่ยร้อยละผลได้ของซาร์จากไพโรไลซิสชีวมวลมีค่าคงที่ตลอดการทดลองคือร้อยละ 21 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแตกตัวสูงขึ้น พบว่า ทาร์สามารถแตกตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของทาร์ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส ในกรณีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ให้ร้อยละผลได้ของทาร์ที่น้อยกว่ากรณีที่ไม่มีซาร์ ดังนั้นจากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า การใช้ซาร์ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของทาร์ และเมื่ออุณหภูมิในการแตกตัวสูงขึ้นส่งผลให้ทาร์แตกตัวกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น

Sun และคณะ [24] ศึกษาการสลายตัวและการแปรสภาพเป็นแก๊สของสารระเหยจากการไพโรไลซิสชีวมวลที่ผ่านเบดชาร์ร้อน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน ในเบดชั้นแรก ชีวมวลถูกไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ส่วนเบดชั้นที่สอง มีตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์บรรจุอยู่พร้อมให้ความร้อนในการแตกตัวอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 700 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ด้วยอัตราการไหล 150 มิลลิตรต่อนาที พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง และปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่มีชาร์และไม่มีชาร์ พบว่า ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อยลงและปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมีมากกว่ากรณีที่ไม่มีชาร์ เนื่องจากของเหลวบางส่วนสามารถแปรสภาพกลายเป็นแก๊สได้ เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ และปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้นเมื่อให้อุณหภูมิมากกว่า 650 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันของชาร์ และเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ที่ใช้ พบว่า ลิกไนต์ชาร์ให้ผลเชิงเร่งได้ดีกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ที่มาจากถ่านหินชนิดอื่น และยังให้ผลใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ที่มาจากชีวมวล

Kihedu และคณะ [25] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงในแกซิฟิเคชันร่วมด้วยไอน้ำ (Steam co-gasification) ของชีวมวลกับถ่านหิน ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300 ถึง 1000 องศาเซลเซียส อัตราความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยชีวมวลที่ใช้มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 70 และปริมาณลิกนินร้อยละ 30 พบว่า ที่อุณหภูมิ 350 ถึง 450 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่สารระเหยจากชีวมวลถูกปลดปล่อยออกมาประมาณร้อยละ 87 เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส สามารถเกิดปฏิกิริยาชาร์แกซิฟิเคชัน (Char gasification) โดยธาตุโลหะแอลคาไลน์และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ทที่คงเหลืออยู่ในชาร์จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อผสมชีวมวลและถ่านหินด้วยอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนจากการทดลองมีค่ามากกว่าร้อยละเปลี่ยนแปลงจากการคำนวณ

Masnadi และคณะ [26] ศึกษาผลของการเกิดปฏิกิริยาร่วมระหว่างไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันของชีวมวลและถ่านหิน พบว่า ชีวมวลมีปริมาณสารระเหยและโลหะแอลคาไลน์มากกว่าถ่านหิน ซึ่งโลหะแอลคาไลน์ (โพแทสเซียมและแคลเซียม) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิสและปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันได้ อุณหภูมิไพโรไลซิสมีผลต่อปริมาณโลหะแอลคาไลน์และพื้นที่ผิวของชาร์ที่ได้ ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสทั้งถ่านหินและชีวมวล ส่งผลให้รูพรุนบนพื้นผิวชาร์มีปริมาณมาก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงถึง 750 ถึง 900 องศาเซลเซียส โลหะแอลคาไลน์ถูกระเหยออกไปและพื้นที่ผิวของชาร์มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการรวมตัวกัน (Sintering) หรืออาจเกิดการพังทลายของรูพรุนได้ เมื่อนำชาร์จากชีวมวลและถ่านหินไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) พบว่า ลักษณะพื้นผิวของชาร์ชีวมวลมีความสม่ำเสมอของรูพรุนน้อยกว่าชาร์ถ่านหิน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ

ผสมชีวมวลและถ่านหินด้วยอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่า ชาร์ที่ได้มีโครงสร้างบนพื้นผิวไม่ได้มีความแตกต่างจากเดิม

Yuan และคณะ [27] ศึกษาผลของการเกิดปฏิกิริยาร่วมระหว่างไพโรไลซิสของฟางข้าวและถ่านหินซัพทูนินัส ในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้น ร้อยละผลได้ของชาร์ลดลง ในขณะที่ร้อยละผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้น และร้อยละผลได้ของทาร์ลดลง เนื่องจากชีวมวลทำหน้าที่เป็นตัวให้ธาตุไฮโดรเจน ซึ่งสามารถปลดปล่อยไฮโดรเจนและไฮดรอกซิลแรดิคัลจำนวนมากออกมา ทำหน้าที่ช่วยแตกตัวของพวงวงแอโรแมติกที่มาจากถ่านหินซัพทูนินัส นอกจากนี้ไฮดรอกซิลแรดิคัลสามารถรวมตัวกับคาร์บอนอะตอมกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ หรืออาจจะทำปฏิกิริยากับพวงอะลิฟาติกกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นเหตุให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนและปริมาณของทาร์ลดลง เมื่อศึกษาอัตราการเร่งปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ พบว่า โครงสร้างหรือสัณฐานวิทยาของชาร์มีผลต่ออัตราการเร่งปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันด้วย

Krerkkaiwan และคณะ [28] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหินต่อการสลายทาร์จากฟางข้าว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติงสองขั้นตอน ทำการศึกษาที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยแตกต่างกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหินที่เตรียมได้มีสองชนิด ซึ่งเกิดจากการเตรียมในกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 600 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่า สารระเหยจากฟางข้าวจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง จากนั้นสารระเหยจะสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหินภายใต้ภาวะที่ไร้ออกซิเจนหรือภาวะที่มีไอน้ำ จากการทดลอง พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหินทั้งสองชนิด สามารถส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการสลายทาร์ด้วยความร้อนได้ และตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหินที่เตรียมจากกระบวนการไพโรไลซิสอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส สามารถส่งผลเชิงเร่งต่อการสลายทาร์ด้วยความร้อนดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหินที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ทำการศึกษาในภาวะที่มีไอน้ำ พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหินที่เตรียมจากอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส สามารถส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการสลายทาร์ได้ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหินที่เตรียมจากอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ไม่สามารถส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการสลายทาร์ เนื่องจากอิทธิพลของการเกิดโค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์

### บทที่ 3

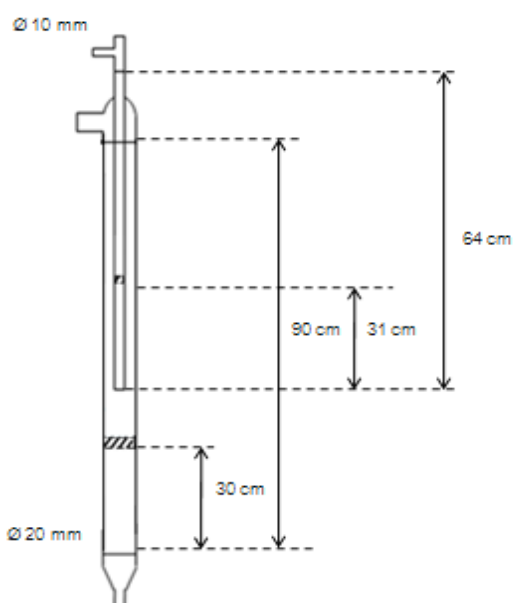
#### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

##### 3.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ในงานวิจัยนี้ ใช้เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยของชีวมวลต่อการลดทอนในกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาใช้จะแยกส่วนปลดปล่อยสารระเหยและส่วนแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำออกจากกัน เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองชั้นตอนจึงถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

##### 3.1.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองชั้นตอน

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองชั้นตอนสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นท่อแก้วควอทซ์ชั้นใน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10 มิลลิเมตร ความยาว 64 เซนติเมตร โดยความยาวที่ 31 เซนติเมตรของท่อจากปลายแก้วควอทซ์ จะมีส่วนที่ยื่นเข้าไปภายในท่อเพื่อรองรับชีวมวลที่เข้าสู่ระบบ ซึ่งสถานะในส่วนนี้เรียกว่า “ไฟโรไลซิส” เป็นบริเวณที่ชีวมวลถูกปลดปล่อยสารระเหย ส่วนที่สองเป็นท่อแก้วควอทซ์ชั้นนอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20 มิลลิเมตร ความยาว 90 เซนติเมตร โดยความยาวที่ 30 เซนติเมตรของท่อจากปลายแก้วควอทซ์ ทำส่วนที่ยื่นเข้าไปภายในท่อเช่นเดียวกับท่อแก้วควอทซ์ชั้นในเพื่อรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา และสถานะในส่วนนี้เรียกว่า “แกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ” ดังแสดงในรูปที่ 3.1



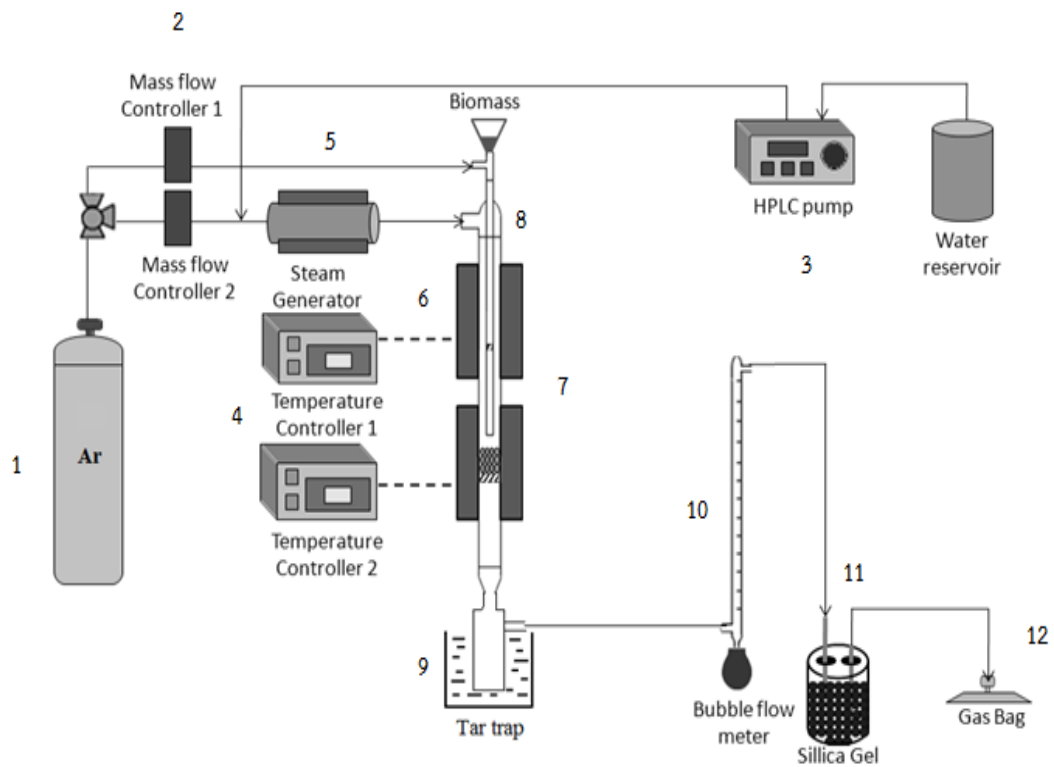
รูปที่ 3. 1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองชั้นตอน (Two-stage fixed bed reactor)

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์

1. เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ
2. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด
3. ตะแกรงร่อนขนาด 150 และ 250 ไมครอน

#### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองขั้นตอน (Two-stage fixed bed reactor) แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองขั้นตอน

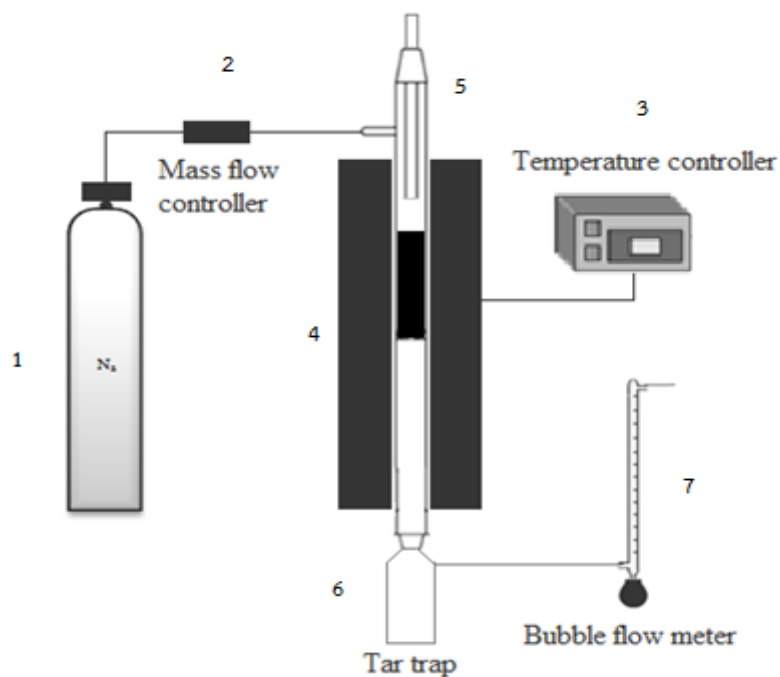


ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ มีดังต่อไปนี้

1. ถังอาร์กอน 99.99%
  2. อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller)
  3. ปั๊มน้ำ (HPLC pump)
  4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
  5. เครื่องผลิตไอน้ำ (Steam generator)
  6. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K
  7. เตาเผาแบบท่อ (Tube furnace)
  8. ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอนดังรูปที่ 3.1 (Two-stage fixed bed reactor)
  9. อุปกรณ์ดักจับทาร์ (Tar trap)
  10. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubble flow) ของแก๊สขาออก
  11. ซิลิกาเจล (Silica gel)
  12. ถุงเก็บแก๊สตัวอย่าง (Sampling bag) ขนาด 2 ลิตร
- 3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินและชีวมวล

ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินและชีวมวลสามารถเตรียมได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งหนึ่งชั้นตอน (Single-stage fixed bed reactor) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้จะมีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

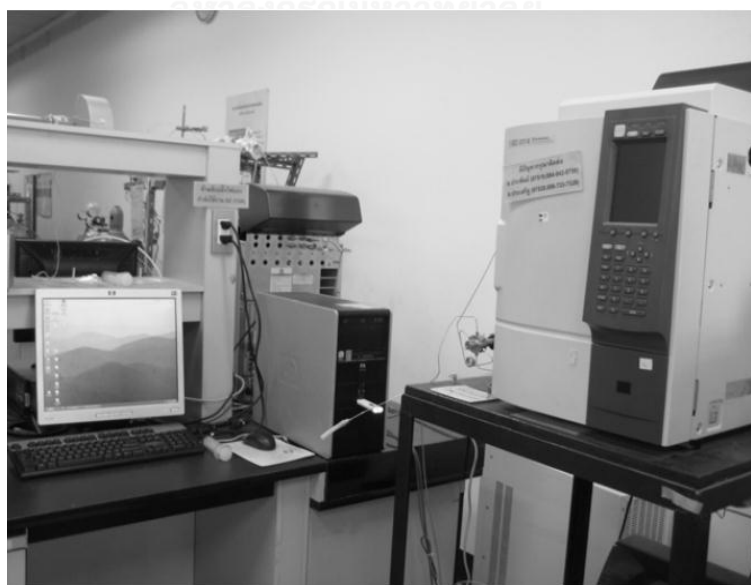
1. ถังไนโตรเจน
2. อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller)
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
4. เตาเผาแบบท่อ (Tube furnace)
5. ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งหนึ่งชั้นตอน (Single-stage fixed bed reactor)
6. อุปกรณ์ดักจับทาร์ (Tar trap)
7. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubble flow) ของแก๊สขาออก



รูปที่ 3.3 แบบจำลองอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งหนึ่งขั้นตอน

### 3.2.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงในรูปที่ 3.4 ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสและแก๊สที่เค้นด้วยไอน้ำ สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สแสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3. 4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

1.	แก๊สพา (Carrier gas)	อาร์กอน (Ar)
2.	ชนิดคอลัมน์	Unibeads C
3.	อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)	120 องศาเซลเซียส
4.	อุณหภูมิคอลัมน์	50 ถึง 180 องศาเซลเซียส
5.	ระบบตรวจวัด (Detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD)

3.2.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) แสดงในรูปที่ 3.5 ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010 ใช้สำหรับในการวิเคราะห์องค์ประกอบของสาร ที่เก็บได้จากกระบวนการไพโรไลซิส และกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารนั้น แสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry)

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry)

1.	แก๊สพา (Carrier gas)	ฮีเลียม (He)
2.	ชนิดคอลัมน์	DB-5
3.	อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)	200 องศาเซลเซียส
4.	อุณหภูมิคอลัมน์ (Oven column temperature)	40 ถึง 200 องศาเซลเซียส
5.	อุณหภูมิท่อส่งผ่าน (Transfer line temperature)	200 องศาเซลเซียส
6.	อุณหภูมิในการผลิตไอออน (Ion source temperature)	200 องศาเซลเซียส

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมถ่านหินและชีวมวล

นำชีวมวลไปบดด้วยเครื่องบดทั้งชนิดหยาบและละเอียดตามลำดับ จากนั้นนำชีวมวลที่บดแล้วไปคัดกรองขนาดด้วยตะแกรงร่อนให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 150-250 ไมครอน ส่วนถ่านหินที่ได้มามีลักษณะเป็นผงละเอียดที่ยังไม่ได้ผ่านการคัดขนาด ดังนั้น ถ่านหินก่อนนำมาใช้ในการทดลองต้องผ่านการคัดกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้อยู่ในช่วง 150-250 ไมครอน เช่นเดียวกับชีวมวล

#### 3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านหินและชีวมวล

##### 3.3.2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

วิเคราะห์แบบประมาณตามวิธีมาตรฐานของ ASTM D3172-3175 ได้แก่ ปริมาณเถ้า ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว

##### 3.3.2.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และ ไนโตรเจน (N) ด้วยเครื่อง CHN analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น CHN-2000

### 3.3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์

#### 3.3.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน

1. ชั่งนำหนักถ่านหินปริมาณ 7 กรัม
2. เตรียมเครื่องปฏิกรณ์ โดยใส่ Quartz wool เข้าไปในภายในท่อ เพื่อเป็นตัวรองรับถ่านหินที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
3. เทถ่านหินที่ชั่งไว้ลงในเครื่องปฏิกรณ์ และติดตั้งเข้ากับไนโตรเจน
4. เปิดถังไนโตรเจน ควบคุมอัตราการไหลที่ 110 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นตรวจสอบอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบฟองแก๊ส และปล่อยให้แก๊สไหลอยู่ภายในระบบเป็นเวลา 45 นาที เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในออก
5. เปิดเตาเผาให้ความร้อน จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที เริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิถึง 600 องศาเซลเซียส
6. ปิดเตาเผา รอให้อุณหภูมิลดต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส จากนั้นนำซาร์ออกจากเตาเผา
7. นำซาร์ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์

#### 3.3.3.2 ตั้งเร่งปฏิกิริยาซาร์จากชีวมวล

การเตรียมซาร์จากชีวมวลมีขั้นตอนเช่นเดียวกับถ่านหิน โดยชั่งชีวมวลปริมาณ 7 กรัม โดยชีวมวลที่ใช้มี 2 ชนิด คือ ฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์

#### 3.3.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวล

ทำการเตรียมซาร์ผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวลมีขั้นตอนเช่นเดียวกับถ่านหิน โดยชั่งถ่านหินและชีวมวลปริมาณอย่างละ 3.5 กรัม (อัตราส่วน 50:50) โดยบดผสมเพื่อให้ถ่านหินและชีวมวลเข้ากัน

### 3.3.4 ขั้นตอนในกระบวนการไฟโรไลซิสชีวมวลโดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ชั่งชีวมวล 120 มิลลิกรัม ลงในสายยางซิลิโคนเพื่อทำการป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ในบริเวณท่อแก้วควอทซ์ชั้นใน โดยมี Quart wool อยู่ตรงบริเวณที่มีส่วนยื่นเข้ามาภายในท่อ ซึ่งเป็นส่วนรองรับชีวมวล
2. ชั่งอะลูมินาบอล 8 กรัม ลงในท่อแก้วควอทซ์ชั้นนอก โดยมี Quart wool อยู่ตรงบริเวณที่มีส่วนยื่นเข้ามาภายในท่อเป็นส่วนรองรับ โดยมีความสูงของเบดประมาณ 2 เซนติเมตร
3. ประกอบท่อแก้วควอทซ์ชั้นในและชั้นนอกเข้าด้วยกันดังแสดงให้เห็นตามรูปที่ 3.1 แล้วนำไปใส่ในเตาให้ความร้อน
4. เปิดอาร์กอนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหลเข้าท่อแก้วควอทซ์แก้วชั้นใน 30 มิลลิลิตรต่อ นาที และเข้าท่อแก้วควอทซ์ชั้นใน 80 มิลลิลิตรต่อ นาที ดังนั้น อัตราการไหลรวมทั้งหมดอยู่ที่ 110 มิลลิลิตรต่อ นาที ปล่อยให้แก๊สไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 45 นาที
5. ตรวจสอบอัตราการไหลของแก๊สขาออกด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบฟองแก๊ส
6. เปิดเตาให้ความร้อนพร้อมกันทั้งสองเตา โดยเตาที่ 1 อยู่ด้านบน (ส่วนปลดปล่อยสารระเหย) โดยทดลองในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส และเตาที่ 2 อยู่ด้านล่าง (ส่วนแกซีฟิเคชัน) ควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิที่เตาด้านบน
7. เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ทำการป้อนชีวมวลที่อยู่ในสายยางซิลิโคนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ แบบแบดนิ่งสองขั้นตอน พร้อมเก็บแก๊สที่ได้ทุก 10 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 2 ลิตร เป็นเวลา 60 นาที นำแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
8. ปิดเตาให้ความร้อนทั้งสองเตา จากนั้นรอให้อุณหภูมิลดต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส จึงนำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากเตาให้ความร้อน
9. เก็บทาร์ที่ถูกดักจับด้วยตัวทำละลายไอโซโพรพานอล (2-isopropanal) ที่อุณหภูมิต่ำ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และเม็ดแก้ว (Glass bead) ปริมาณ 60 กรัม นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) เพื่อหาองค์ประกอบของทาร์

3.3.5 ขั้นตอนในกระบวนการแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไม่มีการป้อนชีวมวลเข้าสู่ระบบ

1. ชั่งอะลูมินาบอล 8 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ 0.5 กรัม ลงในท่อแก้วควอทซ์ชั้นนอก โดยมี Quart wool อยู่ตรงบริเวณที่มีส่วนยื่นเข้ามาภายในท่อเป็นส่วนรองรับ โดยความสูงของเบด ประมาณ 5 เซนติเมตร

2. ประกอบท่อแก้วควอทซ์ชั้นในและชั้นนอกเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 3.1 แล้วนำไปใส่ในเตาให้ความร้อน โดยที่ท่อแก้วชั้นในมี Quart wool อยู่ตรงบริเวณที่มีส่วนยื่นเข้ามาภายในท่อ เป็นส่วนรองรับชีวมวล

3. เปิดอาร์กอนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหลเข้าท่อแก้วควอทซ์แก้วชั้นใน 30 มิลลิลิตรต่อ นาที และเข้าท่อแก้วควอทซ์ชั้นใน 80 มิลลิลิตรต่อ นาที อัตราการไหลรวมทั้งหมดอยู่ที่ 110 มิลลิลิตรต่อ นาที ปล่อยให้แก๊สไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 45 นาที

4. ตรวจสอบอัตราการไหลของแก๊สขาออกด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบฟองแก๊ส

5. เปิดเตาให้ความร้อนพร้อมกันทั้งสองเตา โดยเตาที่ 1 อยู่ด้านบน (ส่วนปลดปล่อยสารระเหย) โดยทดลองในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส และเตาที่ 2 อยู่ด้านล่าง (ส่วนแกซีพีเคชัน) ควบคุมอุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส เก็บแก๊สที่ได้ทุก 10 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 2 ลิตร เป็นเวลา 60 นาที นำแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

6. เมื่อครบ 60 นาทีแล้ว เปิดปั๊มน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำ ไหลเข้าสู่ท่อแก้วควอทซ์ชั้นนอก โดยให้ความร้อนที่ 300 องศาเซลเซียสกับเครื่องผลิตไอน้ำ

7. เก็บแก๊สที่ได้ทุก 10 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 2 ลิตร เป็นเวลา 60 นาที นำแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

8. ปิดเตาให้ความร้อนทั้งสองเตา รออุณหภูมิลดต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส จึงนำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากเตาให้ความร้อน

9. เก็บชาร์ที่เหลือออกมาชั่งน้ำหนักและนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพต่างๆ (BET, SEM)

### 3.3.6 ขั้นตอนในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพร้อมกับป้อนชีวมวลเข้าสู่ระบบ

1. ชั่งชีวมวล 120 มิลลิกรัม ลงในสายยางซิลิโคนเพื่อทำการป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ในบริเวณท่อแก้วควอทซ์ชั้นใน โดยมี Quart wool อยู่ตรงบริเวณที่มีส่วนยื่นเข้ามาภายในท่อ ซึ่งเป็นส่วนรองรับชีวมวล
2. ชั่งอะลูมินาบอล 8 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ 0.5 กรัม ลงในท่อแก้วควอทซ์ชั้นนอก โดยมี Quart wool อยู่ตรงบริเวณที่มีส่วนยื่นเข้ามาภายในท่อเป็นส่วนรองรับซาร์ โดยความสูงของเบตประมาณ 5 เซนติเมตร
3. ประกอบท่อแก้วควอทซ์ชั้นในและชั้นนอกเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 3.1 แล้วนำไปใส่ในเตาให้ความร้อน
4. เปิดอาร์กอนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหลเข้าท่อแก้วควอทซ์แก้วชั้นใน 30 มิลลิลิตรต่อ นาที และเข้าท่อแก้วควอทซ์ชั้นใน 80 มิลลิลิตรต่อ นาที อัตราการไหลรวมทั้งหมดอยู่ที่ 110 มิลลิลิตรต่อ นาที ปล่อยให้แก๊สไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 45 นาที
5. ตรวจสอบอัตราการไหลของแก๊สขาออกด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบฟองแก๊ส
6. เปิดเตาให้ความร้อนพร้อมกันทั้งสองเตา โดยเตาที่ 1 อยู่ด้านบน (ส่วนปลดปล่อยสารระเหย) โดยทดลองในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส และเตาที่ 2 อยู่ด้านล่าง (ส่วนแกซีพีเคชัน) ควบคุมอุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส เก็บแก๊สที่ได้ทุก 10 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 2 ลิตร เป็นเวลา 60 นาที นำแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
7. เมื่อครบ 60 นาที เปิดปั๊มน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำ โดยให้ความร้อน 300 องศาเซลเซียสกับเครื่องผลิตไอน้ำไหลเข้าสู่ท่อแก้วควอทซ์ชั้นนอก
8. ทำการป้อนชีวมวลที่อยู่ในสายยางซิลิโคนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (ท่อแก้วควอทซ์ชั้นใน) พร้อมเก็บแก๊สที่ได้ทุก 10 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 2 ลิตร เป็นเวลา 60 นาที นำแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
9. ปิดเตาให้ความร้อนทั้งสองเตา จากนั้นรออุณหภูมิลดต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส จึงนำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากเตาให้ความร้อน
10. เก็บซาร์ที่เหลือออกมาชั่งน้ำหนักและนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพต่างๆ (BET, SEM)

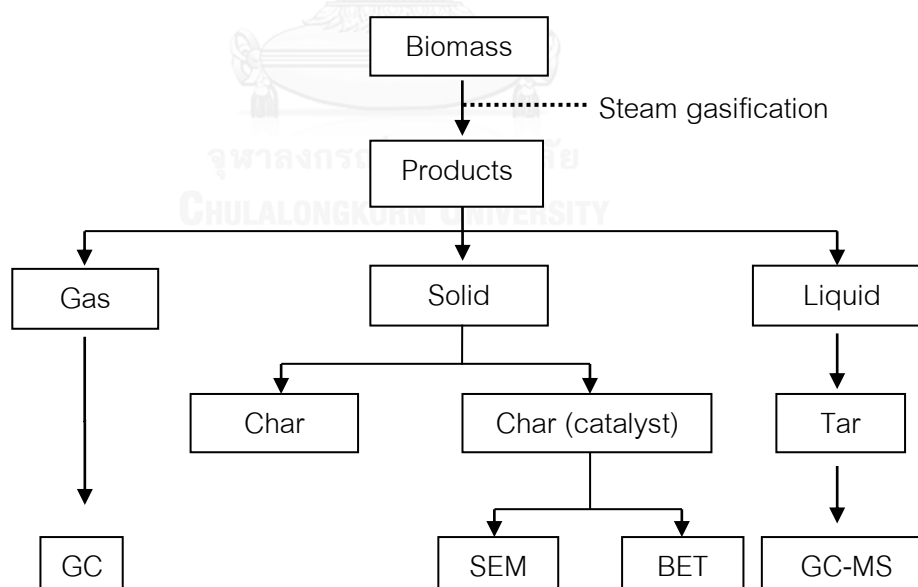


3.3.7 ขั้นตอนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพร้อมกับป้อนชีวมวลเข้าสู่ระบบ  
ทำการทดลองเหมือนกับ 3.3.6 แต่ไม่มีการป้อนไอน้ำเข้าสู่ระบบ

### 3.4 วิเคราะห์สมบัติต่างๆ

- วิเคราะห์ลักษณะโดยทั่วไปของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ เช่น ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (SEM) องค์ประกอบของแร่ธาตุ (XRF) และพื้นผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ (BET) เพื่อยืนยันข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
- วิเคราะห์องค์ประกอบของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยที่ต่างกันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS)
- วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

แผนงานการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์และการทดสอบต่างๆ

การศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของซาร์ต่อการลดทาร์ในระบบการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำจาก  
ชีวมวล มีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้

1. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์
2. อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย (600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส)
3. ชนิดของชีวมวล



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ ศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยของชีวมวลต่อการลดทอนในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน โดยใช้ชาร์จากถ่านหินและชีวมวลที่เตรียมได้จากไพโรไลซิสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองใช้ถ่านหินซับบิทูมินัสและชีวมวลอีกสองชนิด คือ ฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการดำเนินการต่างๆ ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย และชนิดของชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวลจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ แก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ใช้วิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) ใช้วิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของของเหลวหรือทาร์ และเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ใช้วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบที่ยังคงเหลืออยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา พร้อมทั้งศึกษาลักษณะของชาร์ก่อนและหลังทำปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) โดยผลการทดลองแบ่งออกเป็น 7 ส่วน ดังนี้

- ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินและชีวมวล ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)
- ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ที่เตรียมได้ รวมถึงลักษณะต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์
- ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการลดทอนในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล โดยใช้ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
- ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อประสิทธิภาพการลดทอนของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ โดยใช้ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
- ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการลดทอนในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล โดยใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
- ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อประสิทธิภาพการลดทอนของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ โดยใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
- ผลของชีวมวลต่อการลดทอนในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินและชีวมวล

จากการวิเคราะห์สมบัติของถ่านหินและชีวมวลทั้งสองชนิด โดยการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ มีองค์ประกอบของสารระเหยสูงถึงร้อยละ 61.95 และ 62.21 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าถ่านหินประมาณ 1 เท่า แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณของค่าคาร์บอนคงตัวของถ่านหินให้ค่าสูงกว่าชีวมวลทั้งสองชนิด และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ให้ค่าสูงถึง 0.77 และ 0.68 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าถ่านหินประมาณ 3 เท่า

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis, as received)

ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%)	ถ่านหิน	ฟางข้าว (RS)	ไม้กระถินยักษ์(LN)
ความชื้น	12.41	6.43	8.89
เถ้า	8.39	11.22	2.59
สารระเหย	36.84	61.95	62.21
คาร์บอนคงตัว*	42.36	20.40	26.31

คาร์บอนคงตัว\* = 100 - (ความชื้น+เถ้า+สารระเหย)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, dry ash-free basis)

ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%)	ถ่านหิน	ฟางข้าว	ไม้กระถินยักษ์
คาร์บอน	72.13	45.30	48.39
ไฮโดรเจน	6.67	6.93	7.11
ไนโตรเจน	1.40	0.92	0.29
ซัลเฟอร์*	0.22	0.14	0.14
ออกซิเจน**	19.58	46.71	44.07
H/C molar ratio	1.11	1.84	1.76
O/C molar ratio	0.20	0.77	0.68

ซัลเฟอร์\* วิเคราะห์โดยเทคนิค bomb washing (ASTM 3177)

ออกซิเจน\*\* = 100 - ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

จากตารางที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแร่ธาตุที่อยู่ในถ่านหินและชีวมวล ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) พบว่า ซิลิกอนเป็นแร่ธาตุหลักที่พบในถ่านหินและฟางข้าว ส่วนไม้กระถินยักษ์ พบว่า แคลเซียมเป็นแร่ธาตุหลัก

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยเทคนิค XRF (dry basis)

ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	ถ่านหิน	ฟางข้าว	ไม้กระถินยักษ์
โซเดียม	0.03	0.06	0.02
โพแทสเซียม	0.11	1.77	0.75
แมกนีเซียม	0.15	0.13	0.17
แคลเซียม	0.69	0.79	1.01
ซิลิกอน	3.18	11.29	0.47

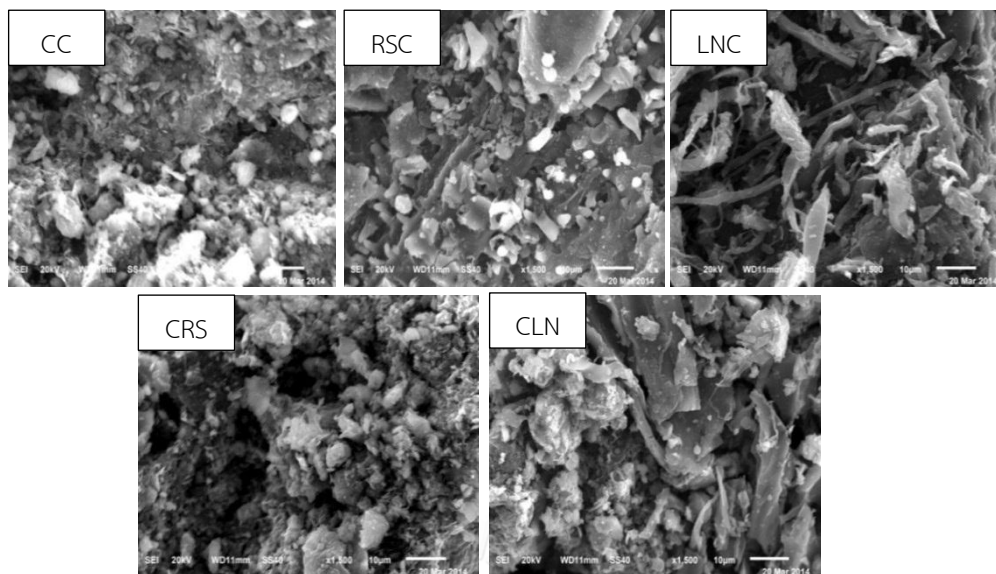
#### 4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่เตรียมได้

ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่ใช้ศึกษามีทั้งหมด 5 ชนิด ประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC) ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN)

ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้ง 5 ชนิด เตรียมได้จากไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ประกอบด้วย การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) วิเคราะห์หาแร่ธาตุประกอบ และวิเคราะห์หาขนาดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากชีวมวลให้ค่าสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน และเมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area) และปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume) พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) มีค่าสูงที่สุด และรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินกับชีวมวลทั้งสองชนิด มีพื้นผิวขรุขระและมีรูพรุนบนพื้นที่ผิวมาก จากสมบัตินี้จะส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการลดทาร์ในแก๊สซิพีเคชันของชีวมวลได้

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่เตรียมได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	CC	CRS	RSC	CLN	LNC
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt%, daf)					
คาร์บอน	84.58	70.16	54.56	81.68	77.02
ไฮโดรเจน	2.87	2.33	1.63	2.57	1.81
ไนโตรเจน	1.35	1.29	1.12	1.27	0.99
ออกซิเจน	11.20	26.22	42.69	14.47	20.17
H/C molar ratio	0.41	0.40	0.36	0.38	0.28
O/C molar ratio	0.10	0.28	0.59	0.13	0.20
การวิเคราะห์แร่ธาตุประกอบ (wt%, dry basis)					
ซิลิกอน	1.580	5.240	6.200	2.190	0.440
โพแทสเซียม	0.075	1.040	2.150	0.596	1.810
แคลเซียม	0.530	0.479	0.529	0.667	1.270
แมกนีเซียม	0.098	0.145	0.158	0.134	0.145
พื้นที่ผิวเฉลี่ย ( $m^2 g^{-1}$ )	180.3	283.8	180.2	208.6	276.3
ปริมาตรของรูพรุน ( $m^3 g^{-1}$ )	0.139	0.175	0.129	0.146	0.087
ขนาดของรูพรุน ( $A^\circ$ )	27.58	27.99	34.05	27.74	29.14



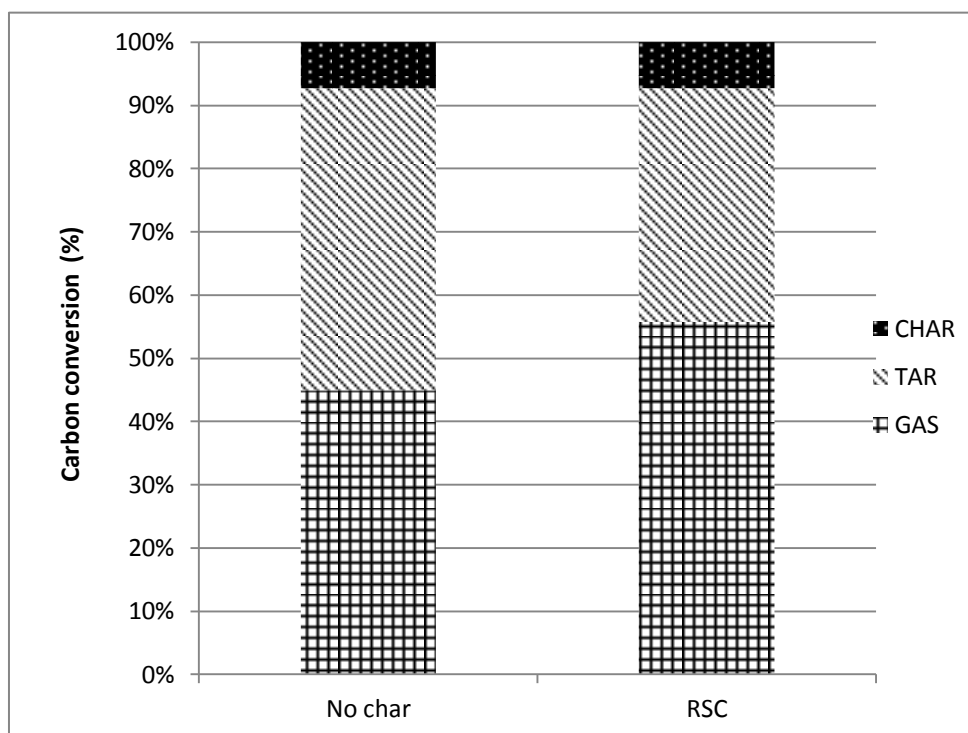
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่เตรียมได้  
วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

#### 4.3 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการลดทาร์ ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล โดยใช้ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่ป้อนสู่ระบบ

ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าว ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน วิเคราะห์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิการแตกตัวทาร์เท่ากับ 800 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทดลอง 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่ใช้ทำการทดลองประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้งหมดเตรียมจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

##### 4.3.1 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

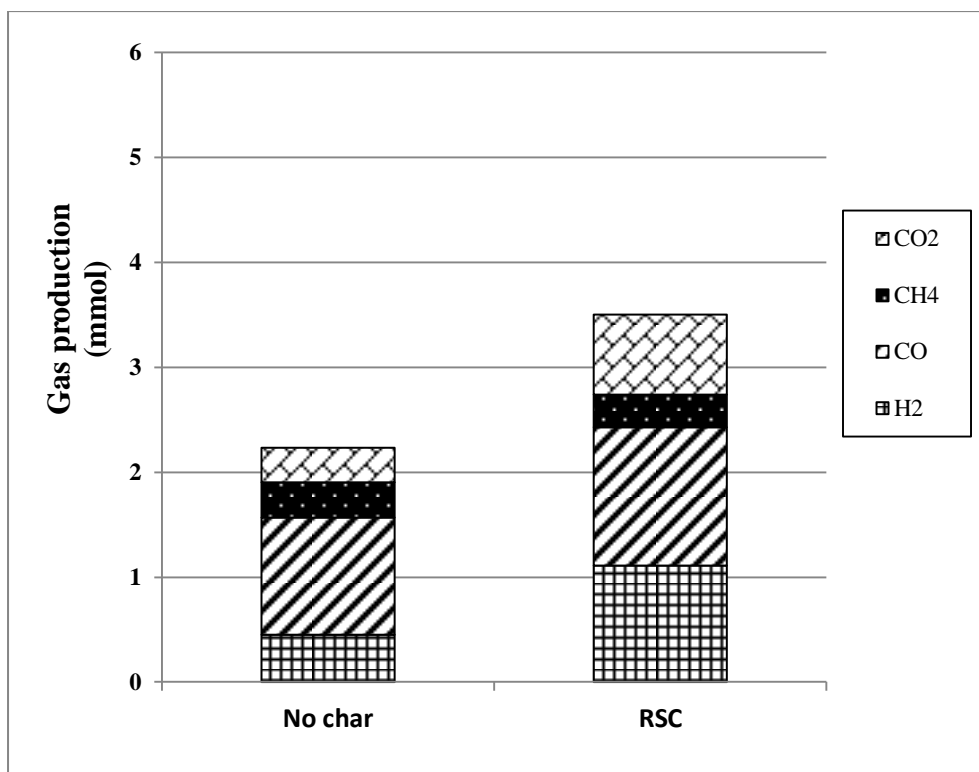
ทำการศึกษาแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิการแตกตัวทาร์เท่ากับ 800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและกรณีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC) จากผลของร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังแสดงรูปที่ 4.2 พบว่า กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว สามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น (จากร้อยละ 45 เป็นร้อยละ 55) ส่วนผลิตภัณฑ์ซาร์นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 7)



รูปที่ 4.2 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในแก๊สที่เค้นด้วยไอน้ำของฟางข้าว  
ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

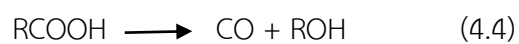
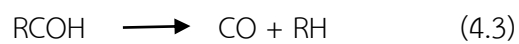
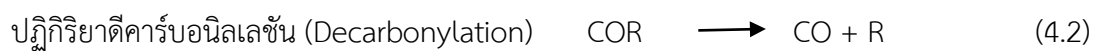
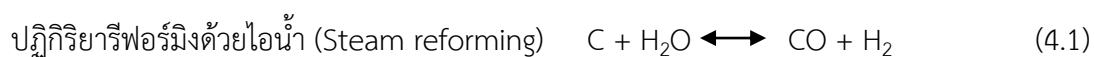
เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้หลังจากแก๊สที่เค้นด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า กลไกการเกิดปฏิกิริยาในระบบกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam reforming) แสดงดังสมการที่ 4.1 โดยคาร์บอนจากชีวมวลที่ถูกปลดปล่อยออกมาทำปฏิกิริยากับไอน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบ เกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation) แสดงดังสมการที่ 4.2-4.4 เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อนของเซลลูโลสในฟางข้าว ซึ่งส่วนใหญ่มีองค์ประกอบที่มีกลุ่มของคาร์บอนิล ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic) มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง [29] ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์หลัก



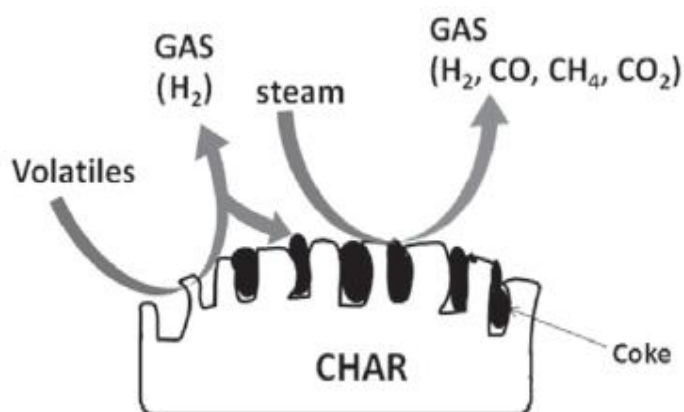


รูปที่ 4.3 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้หลังจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

กลไกการเกิดปฏิกิริยาในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ



กรณีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว พบว่า ทาร์สามารถแตกตัวบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยสารระเหยที่มาจากฟางข้าวจะถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์กลายเป็นโค้ก (Coke) และปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนบางส่วนออกมา จากนั้นไอน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะเข้าทำปฏิกิริยากับโค้ก ทำให้เกิดการแตกตัวหรือสลายตัวกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น [30] ซึ่งปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกี่ยวข้อง ได้แก่ ปฏิกิริยาน้ำและแก๊ส (Water-gas) ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift) ปฏิกิริยาโค้กรีฟอร์มมิง (Coke reforming) และปฏิกิริยาไฮโดรคาร์บอนรีฟอร์มมิง (Hydrocarbon reforming) ดังแสดงสมการที่ 4.5-4.9 ตามลำดับ

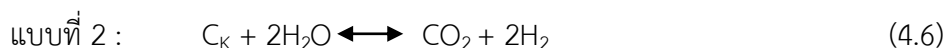
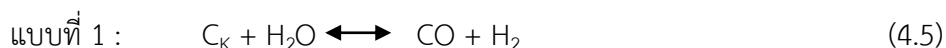


รูปที่ 4.4 ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ [30]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์

Carbon from tar  $\longrightarrow$  Coke  $\longrightarrow$  Carbon from coke ( $C_K$ ) +  $H_2O$   $\longrightarrow$  Product

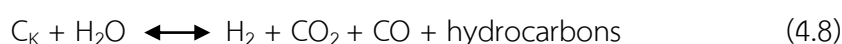
ปฏิกิริยาน้ำและแก๊ส (Water-gas) :



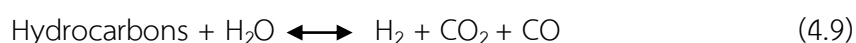
ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift) :



ปฏิกิริยาโค้กรีฟอร์มมิง (Coke reforming) :

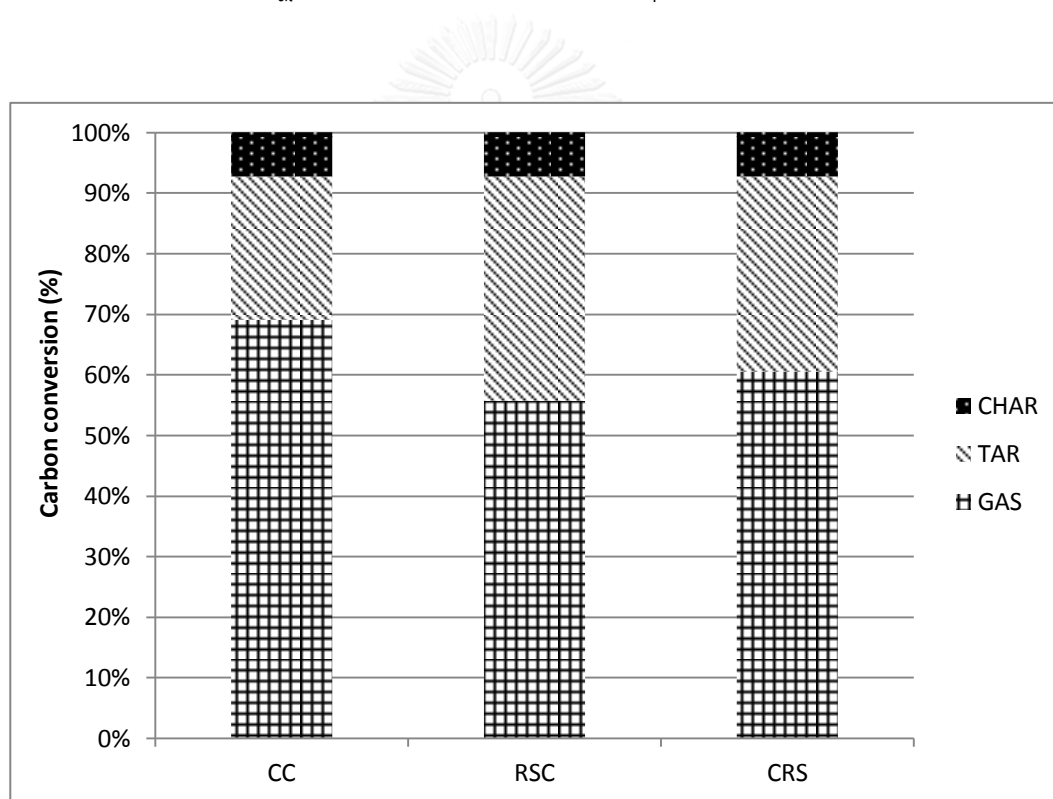


ปฏิกิริยาไฮโดรคาร์บอนรีฟอร์มมิง (Hydrocarbon reforming) :



#### 4.3.2 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว

ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC) โดยรูปที่ 4.5 แสดงร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนต่อผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ได้ ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิการแตกตัวเท่ากันที่ 800 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าวมีประสิทธิภาพต่อการลดทาร์ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว แต่ประสิทธิภาพต่อการลดทาร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าวดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนของผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินมีค่ามากที่สุด



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์หลังจากการทดลองทั้ง 3 ชนิด ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area) และปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume) ด้วยเทคนิค BET ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้ง 3 ชนิด มีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนรวมเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ก่อนใช้ (ตารางที่ 4.4) เนื่องจากสภาวะในระบบมีการป้อนไอน้ำเข้าไปในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ไอน้ำถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ทาร์หรือโค้กบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์เกิดการแตกตัวกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น [30] นอกจากนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมระหว่างถ่านหินและฟางข้าว (CRS) มีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนรวมสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC) ส่งผลให้พื้นที่ผิวรองรับต่อการเกิดปฏิกิริยา (Active site) เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) ก่อนการทดลองและหลังการทดลอง พบว่า พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินหลังการทดลองเพิ่มขึ้นจาก 180.3 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมเป็น 270.54 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (คิดเป็นร้อยละ 50) โดยมีพื้นที่ผิวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว ซึ่งมีพื้นที่ผิวก่อนการทดลองจาก 283.8 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมเป็น 301.3 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน ส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการแตกตัวของทาร์ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินยังมีปริมาตรรูพรุนรวมสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ชนิดอื่น ทำให้ความสามารถในการแตกตัวของทาร์บนพื้นที่ผิวมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์หลังจากการทดลองในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

	ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ จากถ่านหิน (CC)	ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ จากฟางข้าว (RSC)	ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ ผสมถ่านหินและฟาง ข้าว (CRS)
พื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area, $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	270.54	234.39	301.30
ปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume, $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ )	0.2647	0.1717	0.2357

#### 4.4 ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อประสิทธิภาพการลดทาร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์โดยใช้ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่ป้อนสู่ระบบ

ศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าว ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน ช่วงอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยที่ทำการศึกษา คือ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิการแตกตัวทาร์คงที่ที่ 800 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทดลอง 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่ใช้ทำการทดลองประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้งหมดเตรียมจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองรายงานด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงของทาร์ (Tar conversion) คำนวณได้ดังสมการที่ 4.10 และ 4.11

การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในทาร์ (Carbon conversion in tar)

$$X_{C,tar} = 100 - X_{C,gas} - X_{C,char} \quad (4.10)$$

เมื่อ  $X_{C,tar}$  คือ ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ทาร์ (Carbon conversion of tar)  $X_{C,gas}$  คือ ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในผลิตภัณฑ์แก๊ส (Carbon conversion of gas) และ  $X_{C,char}$  คือ ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ชาร์ (Carbon conversion of char)

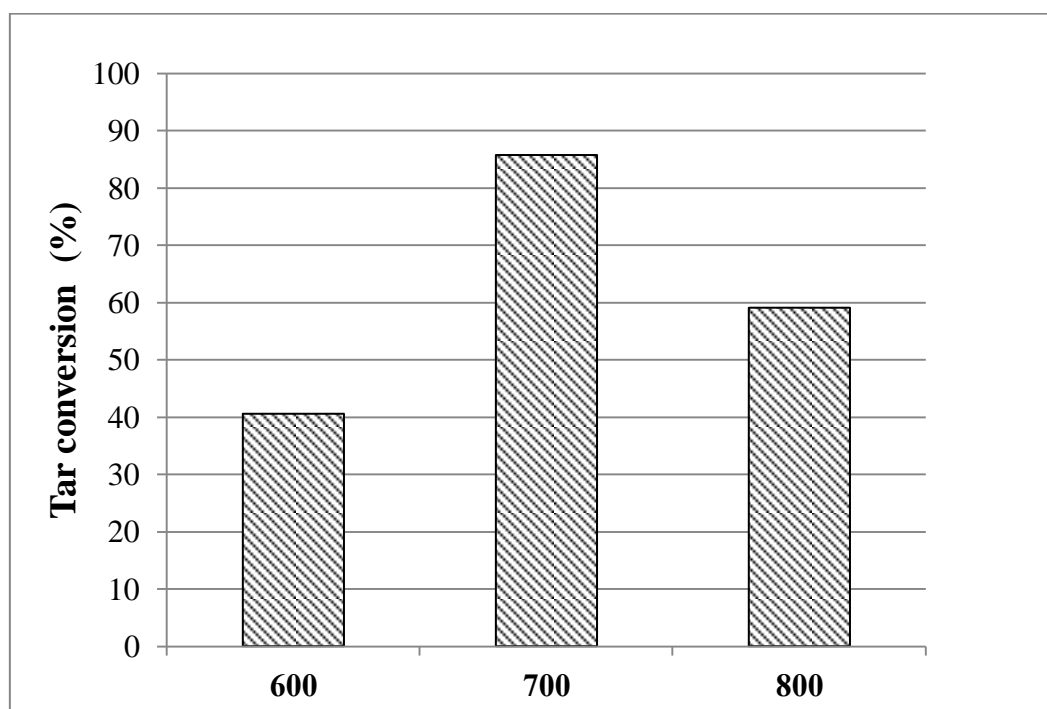
การคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ (Tar conversion,  $X_{tar}$ )

$$X_{tar} = \left( \frac{X_{C,tar(pyr)} - X_{C,tar(steam)}}{X_{C,tar(pyr)}} \right) \times 100 \quad (4.11)$$

เมื่อ  $X_{C,tar(pyr)}$  คือ ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ทาร์จากการไพโรไลซิส (Carbon conversion of tar in pyrolysis) และ  $X_{C,tar(steam)}$  คือ ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ (Carbon conversion of tar in steam gasification)

#### 4.4.1 กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน

ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์สูงสุดที่ร้อยละ 85 ส่วนที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ลดลง และที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียสมีค่าน้อยที่สุดประมาณร้อยละ 40



รูปที่ 4.6 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC)

อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยเป็นอุณหภูมิของเตาด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นบริเวณที่ชีวมวลเกิดการไพโรไลซิส การที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยแตกต่างกัน ส่งผลต่อลักษณะหรือองค์ประกอบของทาร์ในสารระเหย ดังนั้น องค์ประกอบของทาร์น่าจะมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวได้

ทำการศึกษาร่องประกอบของทาร์จากฟางข้าวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) ผลการทดลองดังแสดงตารางที่ 4.6 พบว่า ร่องประกอบของทาร์แต่ละอุณหภูมิ มีร่องประกอบที่แตกต่างกันไป โดยร่องประกอบของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เป็นทาร์ที่มีกลุ่มออกซิเจน (Oxygenated tar) อยู่ในร่องประกอบ เช่น พวาคีโตนและเอสเทอร์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยเป็น 700 องศาเซลเซียส พบว่าทาร์ที่มีกลุ่มออกซิเจนยังคงอยู่และเริ่มพบทาร์พวก แอโรแมติกวงเดียวเป็นร่องประกอบมากขึ้น เช่น ฟีนอล (Phenol) ทูโลอิน (Toluene) และสไตรีน (Styrene) เป็นต้น ส่วนที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส พบทาร์พวกแอโรแมติกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [28]

ตารางที่ 4.6 ร่องประกอบของทาร์จากฟางข้าวที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)

No.	RT (min)	Compound name	Relative intensity (%)		
			RT600	RT700	RT800
1	5.18	1-hydroxy-2-Butanone	1.15	-	-
2	5.21	Toluene	-	4.72	4.91
3	7.18	Furfural	6.02	2.02	-
4	7.63	3-methyl, 2-Butanone	1.03	-	-
6	7.8	5-methyl-5-Hexen-2-one	1.74	-	-
7	8.31	p-Xylene	-	2.16	1.37
8	8.37	2-(1-methylethoxy), Ethanol	2.58	-	
9	8.87	Styrene	-	4.54	6.12
10	9.12	2-methyl, 2-Cyclopentenone	2.51	0.89	-
11	9.24	1-(2-furanyl), Ethanone	1.01	-	-
12	9.57	1,2-Cyclopentanedione	1.34	-	-

No.	RT (min)	Compound name	Relative intensity (%)		
			RT600	RT700	RT800
13	10.45	5-methyl, 2-Furancarboxaldehyde	2.73	-	-
14	10.83	Phenol	6.93	6.08	6.24
15	11.14	1-Decene	1.25	0.57	-
16	11.22	Benzofuran	2.2	3.61	2.43
17	12.18	Indene	2.39	4.68	8.50
18	12.27	2-methyl, Phenol	3.71	12.29	1.66
19	12.4	Acetic acid, phenyl ester		4.50	4.1
20	12.67	2-methyl, Phenol	4.75	3.87	2.23
21	13.95	2,6-dimethyl, Phenol	1.58	-	-
22	14.09	3-methyl, 1H-Indene	1.46	1.80	1.25
23	14.23	4-ethyl, Phenol	3.27	-	-
24	14.37	4-Dihydronaphthalene	-	0.62	0.35
25	14.63	1,2-Benzenediol	4.64	-	-
26	14.72	Naphthalene	-	5.11	17.2
27	15.06	2,3-dihydro, Benzofuran	7.26	4.51	2.26
28	16.43	2-methyl, Naphthalene		2.69	3.97
29	16.66	1-methyl, Naphthalene		1.90	2.87
30	18.32	Biphenyl	-	0.91	1.4
31	18.61	Acenaphthylene	-	0.96	3.3
32	20.31	Fluorene	-	0.67	0.5



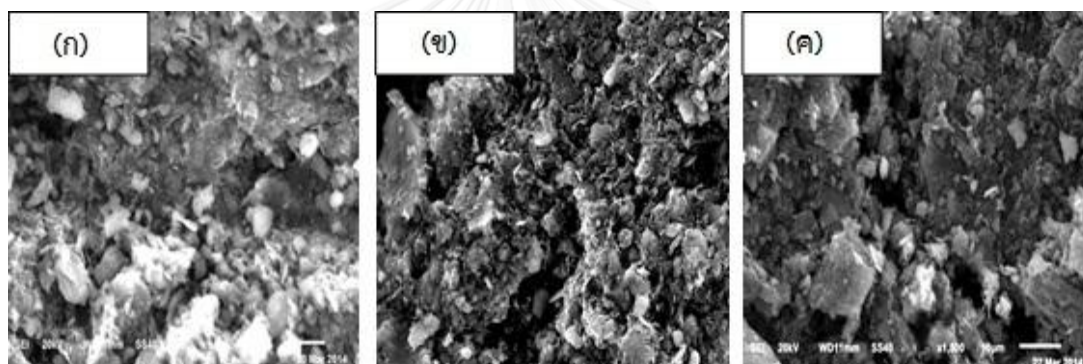
เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส พบว่า แนฟทาลีนเป็นองค์ประกอบหลักของทาร์ที่ได้ ซึ่งแนฟทาลีนเป็นทาร์พวกแอโรแมติก 2 วง ที่มีเสถียรภาพสูง ดังนั้น แนฟทาลีนน่าจะแตกตัวบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ไดยาก ส่งผลให้คาร์บอนเกิดการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส จากข้อมูลที่ได้นี้มีสอดคล้องกับผลการทดลองจากรูปที่ 4.6 นอกจากนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ที่เตรียมจากไพโรไลซิส สามารถแตกตัวทาร์พวกแอโรแมติกวงเดียวได้ดีกว่าทาร์ชนิดอื่น โดยเฉพาะทาร์พวกแอโรแมติกที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ อย่างเช่น ฟีนอล (Phenol) เนื่องจากฟีนอลเป็นสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้าง สามารถแตกตัวและถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่มีไอ้หน้าได้ดี [31]

พิจารณาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) หลังจากการทดลองในแกซีฟิเคชันด้วยไอ้หน้าของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกันด้วยเทคนิค BET แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินหลังการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนรวมสูงกว่าชนิด แต่กลับมีคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนของทาร์น้อยกว่าที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส เนื่องจาก ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส ทาร์ส่วนใหญ่เป็นพวกแอโรแมติกที่มีเสถียรภาพสูงอย่าง แนฟทาลีน ทำให้ความสามารถในการแตกตัวของทาร์บนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินลดลง

ตารางที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) หลังจากการทดลองในแกซีฟิเคชันด้วยไอ้หน้าของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน

อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย	600 องศาเซลเซียส	700 องศาเซลเซียส	800 องศาเซลเซียส
พื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area, $m^2 g^{-1}$ )	236.78	242.96	270.54
ปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume, $cm^3 g^{-1}$ )	0.2264	0.2402	0.2647

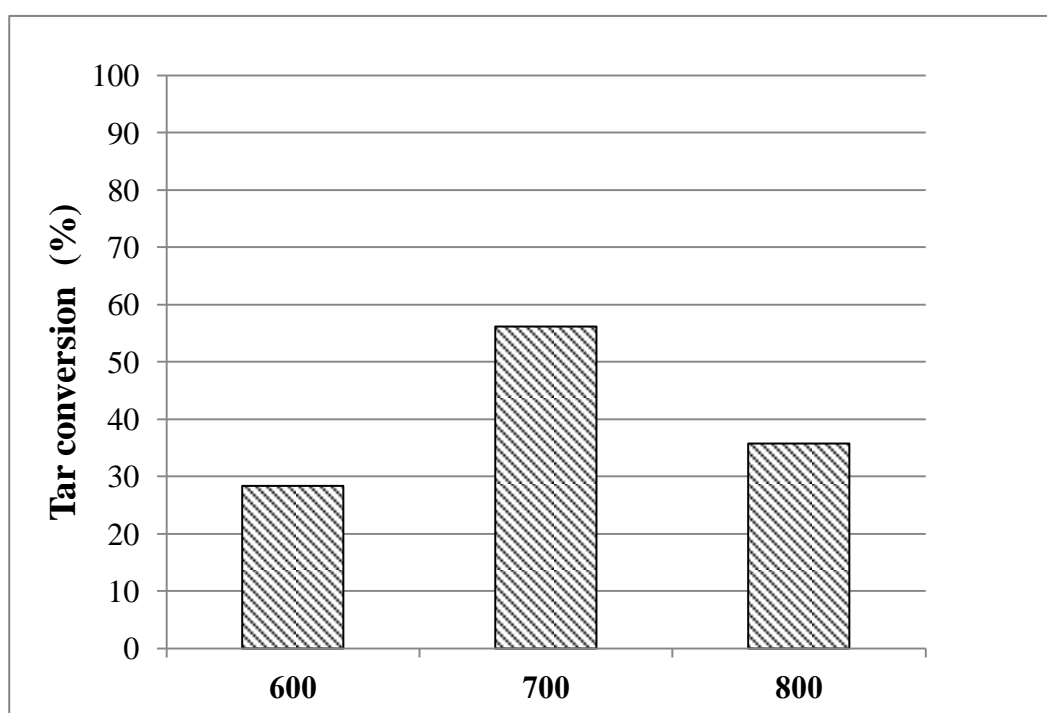
หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินหลังการทดลองเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินก่อนการทดลอง โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินก่อนการทดลองและหลังจากการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินหลังการทดลองทั้ง 2 ชนิด มีพื้นที่ผิวขรุขระมากกว่าก่อนการทดลองอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส ไม่ได้ส่งผลเชิงเร่งต่อปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ ซึ่งเป็นผลจากองค์ประกอบของแนฟทาลินที่มีปริมาณมากกว่าอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยอื่น ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียสมีค่าสูงสุด



รูปที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินก่อนการทดลอง (ก) และหลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

#### 4.4.2 กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว

ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์สูงสุดที่ร้อยละ 56 ส่วนที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ลดลง และที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยที่สุดประมาณร้อยละ 28



รูปที่ 4.8 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC)

เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ระหว่างกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหิน (CC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC) พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์สูงสุดเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส ดังนั้น ผลขององค์ประกอบของทาร์ถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการแตกตัวของทาร์ โดยจากการศึกษาพบว่า ทาร์พวกแอรโม่ติกวงเดียวที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสามารถแตกตัวบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้ง 2 ชนิดได้ดีกว่าทาร์ชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะทาร์พวกแอรโม่ติกในกลุ่มของฟีนอลิก

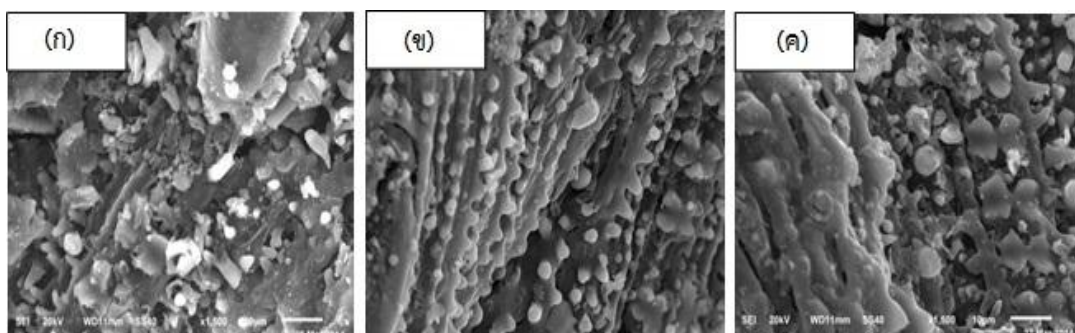
เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC) หลังจากการทดลองในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกันด้วยเทคนิค BET แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวหลังการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนรวมสูงกว่าชนิดอื่น เนื่องจากทาร์พวกแอโรแมติกวงเดียวที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ สามารถถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์กลายเป็นไค้หรือคาร์บอน จากนั้นคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำที่ทำการป้อนเข้าสู่ระบบกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สและสร้างพื้นที่ผิววงไวต่อการเกิดปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่ ส่งผลให้พื้นที่ผิววงไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น [32] ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวหลังการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส จึงมีพื้นที่ผิวเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนรวมสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC) หลังจากการทดลองในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน

อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย	600 องศาเซลเซียส	700 องศาเซลเซียส	800 องศาเซลเซียส
พื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area, $m^2 g^{-1}$ )	260.06	271.43	234.39
ปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume, $cm^3 g^{-1}$ )	0.1881	0.2014	0.1717

หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวหลังการทดลองเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวก่อนการทดลอง โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว (RSC) ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวก่อนการทดลองและหลังจากการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวหลังการทดลองทั้ง 2 ชนิด มีพื้นที่ผิวขรุขระมากกว่าก่อนการทดลอง เนื่องจากเกิดการสลายตัวของคาร์บอนที่อยู่บนพื้นที่ผิวของ

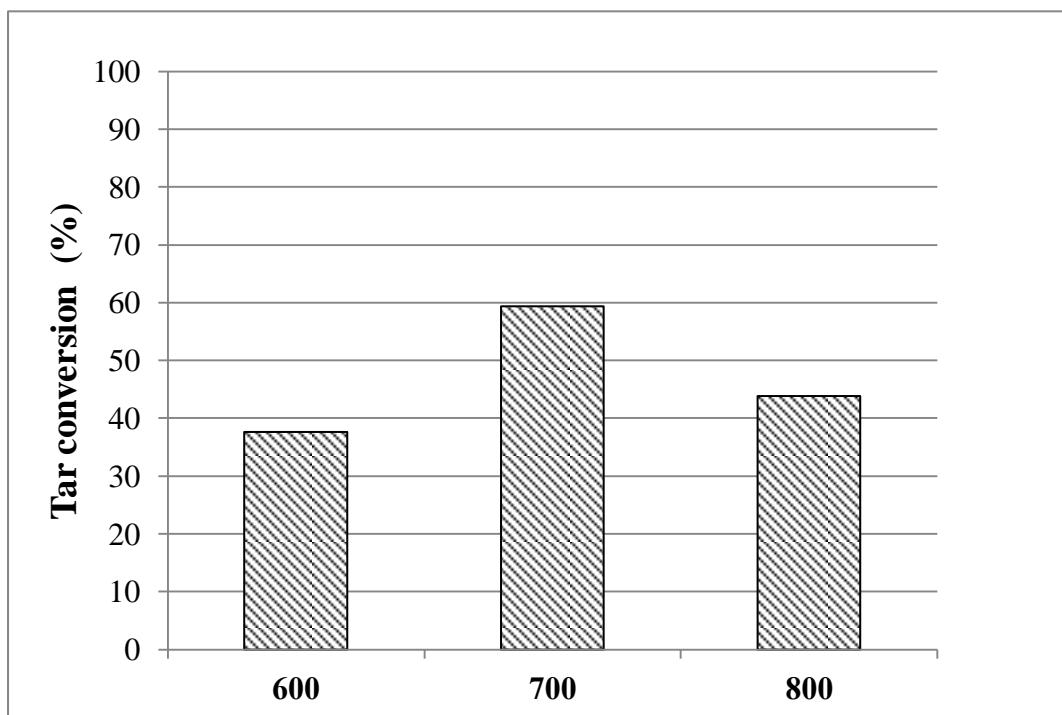
ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าว ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยเป็น 800 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวลดลง ดังแสดงรูปที่ 4.9 (ค) เนื่องจากเกิดการรวมตัวของพื้นที่ผิวของคาร์บอนกับทาร์ที่มาจาก การไพโรไลซิสของฟางข้าว ทำให้รูพรุนบนพื้นที่ผิวลดลง นอกจากนี้ ยังมีผลของแนพทาลินที่ส่งผลให้ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ลดลง



รูปที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากฟางข้าวก่อนการทดลอง (ก) และหลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

#### 4.4.3 กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว

ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์สูงสุดที่ร้อยละ 59 ส่วนที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ลดลง และที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียสมีค่าน้อยที่สุดประมาณร้อยละ 37



รูปที่ 4.10 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซีพีเคชันของ ฟางข้าวด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS)

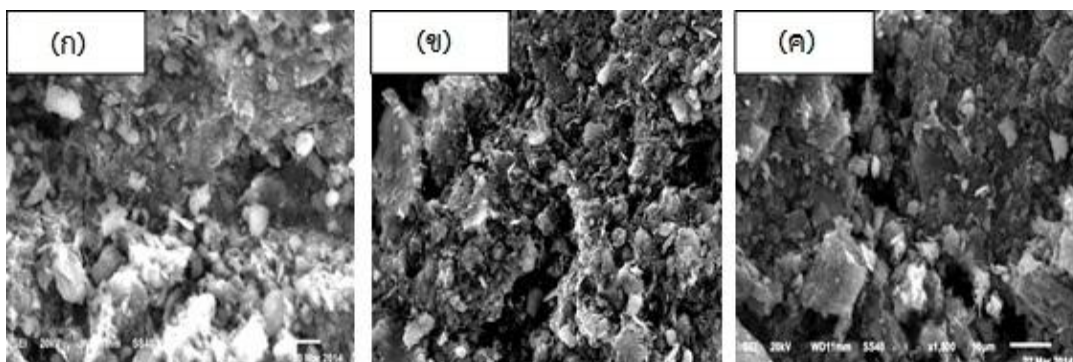
เมื่อทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) พบว่า ทาร์พวกแอโรแมติกวงเดียวที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ สามารถแตกตัวบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมได้ดีเหมือนกับตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ที่ไม่ได้ผสม ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ

พิจารณาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) หลังจากการทดลองในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกันด้วยเทคนิค BET แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมหลังการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนรวมสูงกว่าชนิดอื่น เป็นผลมาจากการสลายตัวของคาร์บอนบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและสร้างพื้นที่ผิวขึ้นมาใหม่ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวว่างไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวทาร์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียสมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) หลังจากการทดลองในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน

อุณหภูมิปลดปล่อย สารระเหย	600 องศาเซลเซียส	700 องศาเซลเซียส	800 องศาเซลเซียส
พื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area, $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	257.23	320.04	301.30
ปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume, $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ )	0.2013	0.2463	0.2357

หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมหลังการทดลองเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมก่อนการทดลอง โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 4.11 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าวก่อนการทดลองและหลังจากการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมหลังการทดลองมีพื้นที่ผิวขรุขระมากกว่าก่อนการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.11 (ข) และ (ค) พบว่า ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวขรุขระมากกว่าที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นผลมาจากองค์ประกอบของทาร์พวกแอมติกวงเดี่ยวที่มีหมู่ออกซิเจนในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของคาร์บอนบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์กับไอน้ำและการสร้างพื้นที่ผิวใหม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.11 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าวก่อนการทดลอง (ก) และหลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

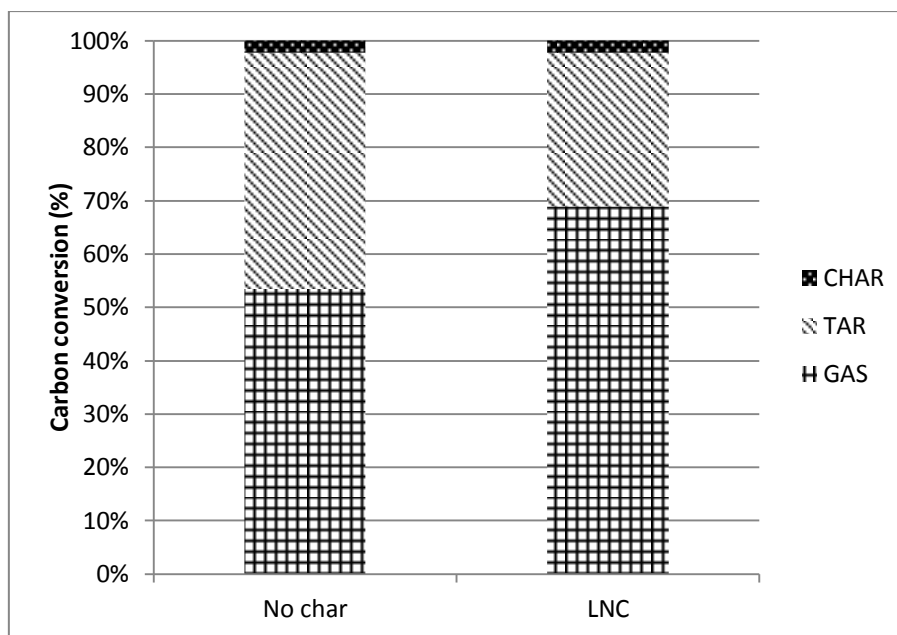
#### 4.5 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการลดทาร์ ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล โดยใช้ไม้กระถินยักษ์ เป็นชีวมวลที่ป้อนสู่ระบบ

ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน วิเคราะห์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิการแตกตัวทาร์เท่ากันที่ 800 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทดลอง 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ที่ใช้ทำการทดลอง ประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหิน (CC) ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) และตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ทั้งหมดเตรียมจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

##### 4.5.1 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากไม้กระถินยักษ์เปรียบเทียบกับกรณีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

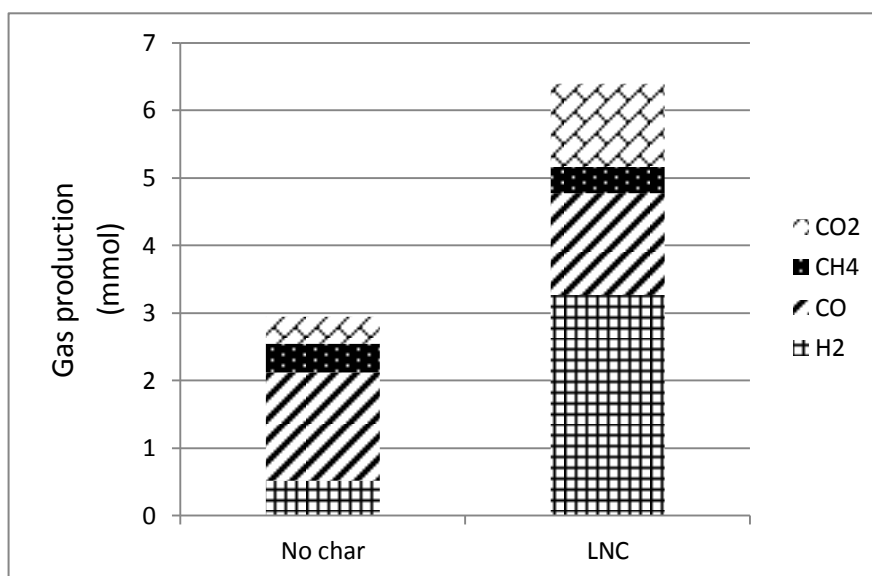
ทำการศึกษาแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิการแตกตัวทาร์เท่ากันที่ 800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและกรณีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) โดยศึกษาผลของร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังแสดงรูปที่ 4.12 พบว่า กรณีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากไม้กระถินยักษ์ สามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น (จากร้อยละ 53 เป็นร้อยละ 68) ส่วนผลิตภัณฑ์ชาร์นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 2)





รูปที่ 4.12 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ  
ของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้หลังจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่า กลไกการเกิดปฏิกิริยาในระบบกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ดังสมการที่ 4.1 และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation) ดังสมการที่ 4.2-4.4 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเดียวกับกรณีที่ใช้ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 ส่งผลให้เกิดไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์หลัก แต่มีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบในเชิงปริมาณ

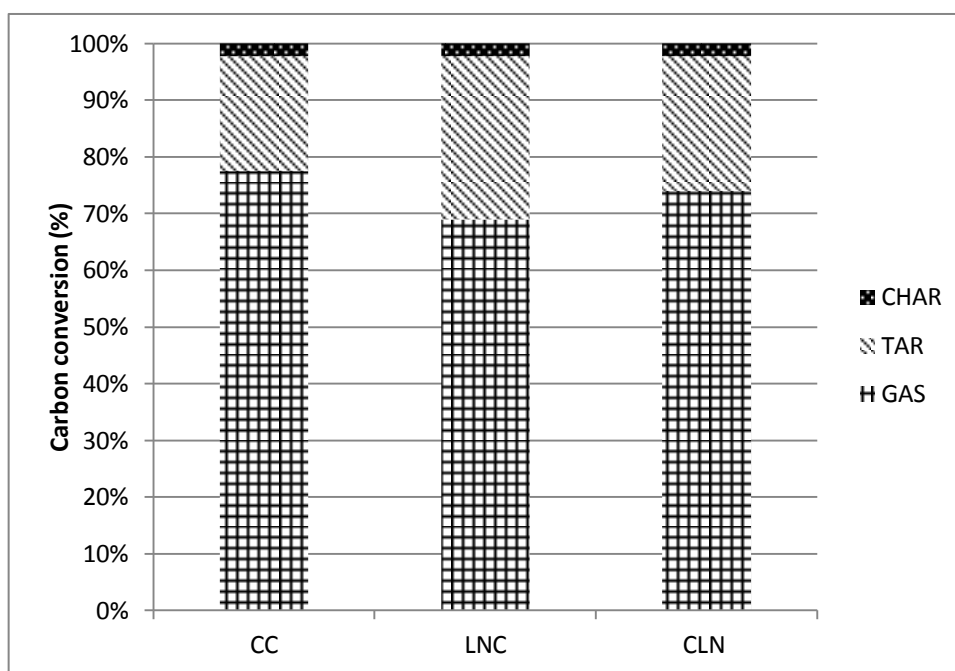


รูปที่ 4.13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้หลังจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

กรณีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) พบว่า ทาร์สามารถแตกตัวบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ได้ (ดังแสดงในรูปที่ 4.4) โดยกลไกการแตกตัวของทาร์จากไม้กระถินยักษ์นั้นเหมือนกับกลไกการแตกตัวของทาร์ที่ได้จากฟางข้าว แต่ความสามารถในการแตกตัวของทาร์และปริมาณขององค์ประกอบแก๊สแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยกรณีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ พบว่า ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่คาร์บอนมอนอกไซด์กลับไม่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์เกิดจากปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift) ดังสมการที่ 4.7[33] ซึ่งมีการใช้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นสารตั้งต้นและทำปฏิกิริยากับไอน้ำ

#### 4.5.2 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์

ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) โดยรูปที่ 4.14 แสดงร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนต่อผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้ ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิพลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิการแตกตัวทาร์เท่ากันที่ 800 องศาเซลเซียส พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ มีประสิทธิภาพต่อการลดทาร์ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ แต่มีประสิทธิภาพต่อการลดทาร์น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหิน ซึ่งความสามารถในการแตกตัวของทาร์ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่ใช้



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน  
ในแก๊สพีเคชั่นด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

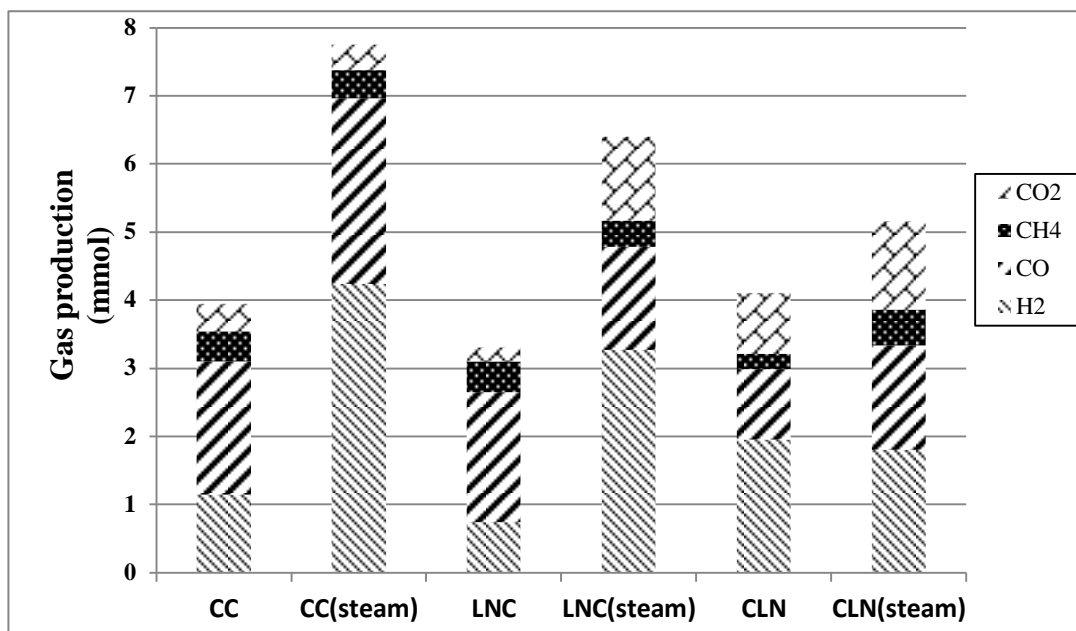
เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์หลังจากการทดลองทั้ง 3 ชนิด ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area) และปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume) ด้วยเทคนิค BET แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนรวมเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ก่อนใช้ (ตารางที่ 4.4) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) และตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมระหว่างถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนรวมสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหิน (CC) โดยการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ เกิดจากสถานะในระบบที่ใช้มีการป้อนไอน้ำเข้าไปในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และไอน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนหรือโค้กที่อยู่บนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้คาร์บอนบนพื้นที่ผิวเกิดการสลายตัวและสร้างพื้นที่ผิวใหม่ขึ้นมา นอกจากนี้ การป้อนไอน้ำสามารถป้องกันการอุดตันของรูพรุน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา [32]

ตารางที่ 4.10 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์หลังจากการทดลองในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

	ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ จากถ่านหิน	ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ จากไม้กระถินยักษ์	ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสม ถ่านหินและไม้กระถินยักษ์
พื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area, $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	298.03	483.07	395.56
ปริมาตรของรูพรุน รวม (Total pore volume, $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ )	0.2935	0.3341	0.3339

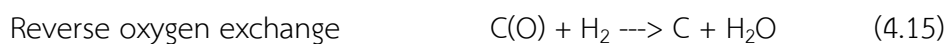
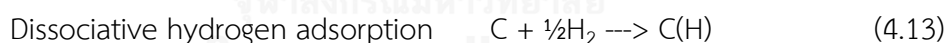
เมื่อพิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14 พบว่า ไม่สอดคล้องกันเนื่องจากพื้นที่ผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่สูงขึ้นไม่ได้ส่งเสริมให้คาร์บอนเกิดการเปลี่ยนของทาร์สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่ใช้ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบ โดยลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) หลังการทดลอง มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนรวมสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) แต่กลับให้ประสิทธิภาพต่อการลดทาร์ที่ต่ำกว่า ดังนั้น ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะเกิดขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้ง 2 ชนิด คือ อาจเกิดปฏิกิริยาบางอย่างที่ส่งผลให้ความสามารถในการแตกตัวของทาร์บนพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ลดลง โดยจะพิจารณาจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.15 เพื่อทำการศึกษาปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้ง 3 ชนิด จึงทำการทดลองด้วยกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองขั้นตอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้ง 3 ชนิด ทำการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิแตกตัวทาร์เท่ากับ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำข้อมูลของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดจากการไพโรไลซิสเปรียบเทียบกับแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ แสดงดังรูปที่ 4.15

เพื่อทำการศึกษากิจกรรมที่คาดว่าจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้ง 3 ชนิด จึงทำการทดลองเปรียบเทียบสภาวะในระบบที่แตกต่างกัน ระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ ทำการศึกษาด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองขั้นตอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้ง 3 ชนิด ทำการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิแตกตัวเท่ากันที่ 800 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สระหว่างไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ 3 ชนิด ประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN)



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สระหว่างการไพโรไลซิสและแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ แสดงดังรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) พบว่า ในระบบแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ มีปริมาณของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 1.14 มิลลิโมล เป็น 4.23 มิลลิโมล มากขึ้นประมาณ 3 เท่า และคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 1.95 มิลลิโมล เป็น 2.72 มิลลิโมล ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นอย่างมากของไฮโดรเจนเป็นผลมาจากทาร์บางส่วนจากชีวมวลที่มาจากเตาด้านบนของปฏิกรณ์ เกิดปฏิกิริยาฟอर्मิงด้วยไอน้ำก่อนที่จะดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ ส่วนกรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) พบว่า ระบบแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ มีปริมาณของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบไพโรไลซิส แต่ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง เป็นผลมาจากปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift) และกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) พบว่า ระบบแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ มีปริมาณของไฮโดรเจนลดลง ซึ่งแตกต่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ 2 ชนิดก่อนหน้านี้ และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สต่างๆ กลับเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของมีเทน มาจากปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation) ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10 ดังนั้น การหายไปของไฮโดรเจนจำนวนมากเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดมีเทน นอกจากนี้การหายไปของไฮโดรเจน อาจเกิดจากการดูดซับบนพื้นที่ผิวของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสม ทำให้พื้นที่ผิวที่ว่างไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Active site) ลดลง โดยกลไกที่อาจเกิดบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์มีอยู่ 3 รูปแบบ แสดงดังสมการที่ 4.13-4.15 [34, 35]

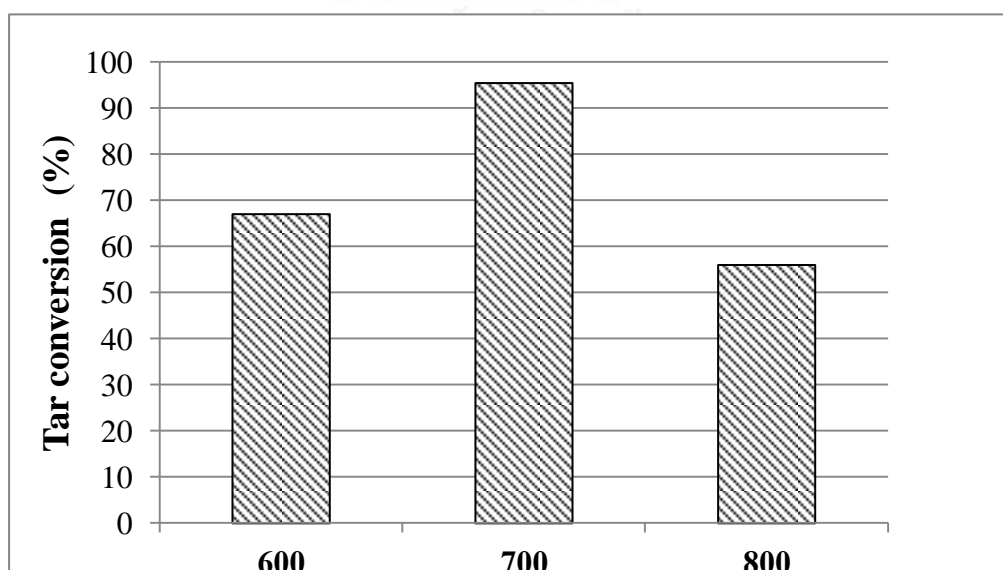


#### 4.6 ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อประสิทธิภาพการลดทาร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์โดยใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นชีวมวลที่ป้อนสู่ระบบ

ศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน ช่วงอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยที่ทำการศึกษาคือ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิการแตกตัวทาร์คงที่ที่ 800 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทดลอง 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่ใช้ทำการทดลอง ประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้งหมดเตรียมจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองรายงานด้วยค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ (Tar conversion) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 4.10 และ 4.11 (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 4.4)

##### 4.6.1 กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน

ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน แสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์สูงสุดที่ร้อยละ 95 ส่วนที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ลดลง และที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียสมีค่าน้อยที่สุดประมาณร้อยละ 56



รูปที่ 4.16 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC)

เพื่อติดตามผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อลักษณะหรือองค์ประกอบของทาร์ที่ได้จากไม้กระถินยักษ์ จึงนำทาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของทาร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) และจากตารางที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบของทาร์จากไม้กระถินยักษ์ที่วิเคราะห์ได้ พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยที่แตกต่างกัน ส่งผลให้องค์ประกอบของทาร์มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน และองค์ประกอบที่ได้จากการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ พบว่า มีลักษณะหรือองค์ประกอบของทาร์คล้ายกับการไพโรไลซิสจากฟางข้าว เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยเดียวกัน นอกจากนี้ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส จะพบแนฟทาลินเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งแนฟทาลินจัดเป็นสารประกอบพวกแอโรแมติก 2 วง ที่มีเสถียรภาพสูง

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบของทาร์จากไม้กระถินยักษ์ที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)

No.	RT (min)	Compound name	Relative intensity (%)		
			LT600	LT700	LT800
1	5.23	Toluene	-	6.60	5.29
2	6.2	Propanoic acid, 2-oxo-, methyl ester	1.44	-	-
3	7.37	Furfural	5.34	-	-
4	7.79	Diisopropyl 2-oxomalonate	2.26	-	-
5	7.94	Ethanol, 2-(1-methylethoxy)-	1.54	-	-
6	8.03	Ethylbenzene	-	1.14	0.46
7	8.32	p-Xylene	-	0.55	0.89
8	8.92	Styrene	1.71	7.41	7.43
9	9.19	2-methyl-2-Cyclopentenone	1.68	-	-
10	9.65	1,2-Cyclopentanedione	1.41	-	-



No.	RT (min)	Compound name	Relative intensity (%)		
			LT600	LT700	LT800
11	10.52	5-methyl,2-Furancarboxaldehyde	1.00	-	-
12	10.85	Phenol	4.51	11.73	5.84
13	11.25	m-methyl, Styrene	1.83	2.92	2.86
14	12.22	Indene	3.08	8.54	14.88
15	12.3	2-methyl, Phenol	4.43	5.46	1.41
16	12.68	4-methyl, Phenol	4.5	5.41	1.39
17	13.96	2,4-dimethyl, Phenol	1.85	0.84	-
18	14.62	1,2-Benzenediol	10.64	0.36	-
19	14.73	Naphthalene	1.22	7.48	21.29
20	15.06	2,3-dihydro, Benzofuran	1.61	0.95	0.32
21	15.21	1,4-Benzenediol, diacetate	3.20	1.52	
22	16.45	2-methyl, Naphthalene	0.95	2.39	2.74
23	16.66	1-methyl, Naphthalene	-	1.73	2.08
24	18.61	Acenaphthylene	-	1.67	3.26
25	20.31	Fluorene	-	0.42	0.83
26	22.98	Phenanthrene	-	1.13	0.88

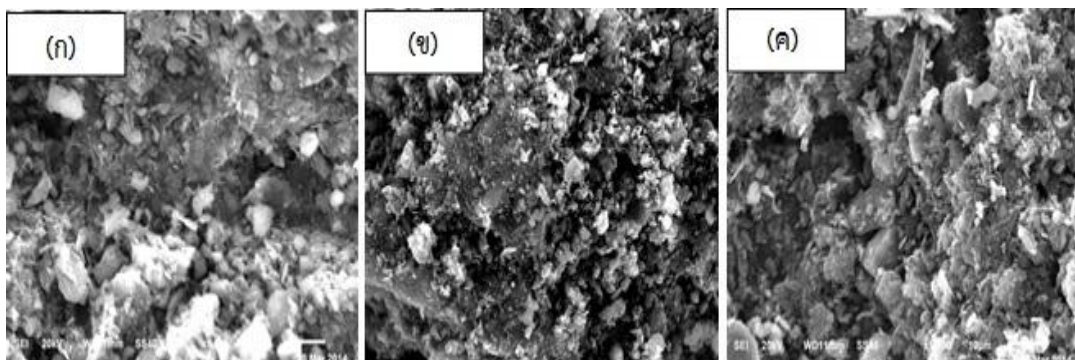
จากตารางที่ 4.11 เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส พบว่า ทาร์พวกแอโรแมติกวงเดียวที่มีหมู่ไฮดรอกซิล อย่างเช่น ฟีนอล พบว่า มีปริมาณมากที่สุด (ร้อยละ 11.73) เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอื่น ดังนั้น อาจสรุปได้ว่า ฟีนอล คือองค์ประกอบของทาร์ที่สามารถแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ดีกว่าทาร์ชนิดอื่น ส่งผลให้ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีร้อยละการเปลี่ยนของทาร์สูงสุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยเป็น 800 องศาเซลเซียส พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ต่ำกว่าที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยที่ 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีปริมาณของแนฟทาลินเป็นจำนวนมาก (ร้อยละ 21.29) ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ลดลง

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) หลังจากการทดลองในแกซิฟเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกันด้วยเทคนิค BET และ XRF แสดงดังตารางที่ 4.12 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินหลังการทดลองที่มีอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนรวมสูงกว่าที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์กับไอน้ำ แต่อย่างไรก็ตาม ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส ไม่ได้มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 700 และ 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีองค์ประกอบของแนฟทาลินในปริมาณมาก (มากกว่ากรณีที่เป็นฟางข้าว) ส่งผลให้ความสามารถในการแตกตัวบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง นอกจากนี้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [27] ได้อธิบายว่า แร่ธาตุที่อยู่ในซาร์สามารถส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ โดยเฉพาะธาตุโลหะอัลคาไลด์และอัลคาไลด์เอิร์ท (Alkali and alkaline earth metals, AAEM) เช่น โพแทสเซียมและแคลเซียม และข้อมูลจากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินหลังการทดลองมีปริมาณของโพแทสเซียมและแคลเซียมสูงสุด เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโพแทสเซียมเกิดจากการสร้างกลุ่มฟีนอล (K-O-C) ซึ่งเป็นกลุ่มที่ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำ โดยกลุ่มฟีนอลเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างโพแทสเซียมจากฟางข้าวกับคาร์บอนที่มีออกซิเจนอยู่บนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ [27] ส่วนแคลเซียมจะอยู่ในรูปของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งส่งผลให้เกิดการดูดซับของคาร์บอนที่มาจากไม้กระถินยักษ์และเกิดการแตกตัวเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น [36] ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ

ตารางที่ 4.12 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) หลังจากการทดลองในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน

อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย	600 องศาเซลเซียส	700 องศาเซลเซียส	800 องศาเซลเซียส
พื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area, $m^2 g^{-1}$ )	243.09	259.96	298.03
ปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume, $cm^3 g^{-1}$ )	0.2365	0.2522	0.2935
ปริมาณโพแทสเซียม (K, wt%)	0.234	0.267	0.256
ปริมาณแคลเซียม (Ca, wt%)	0.496	0.554	0.540

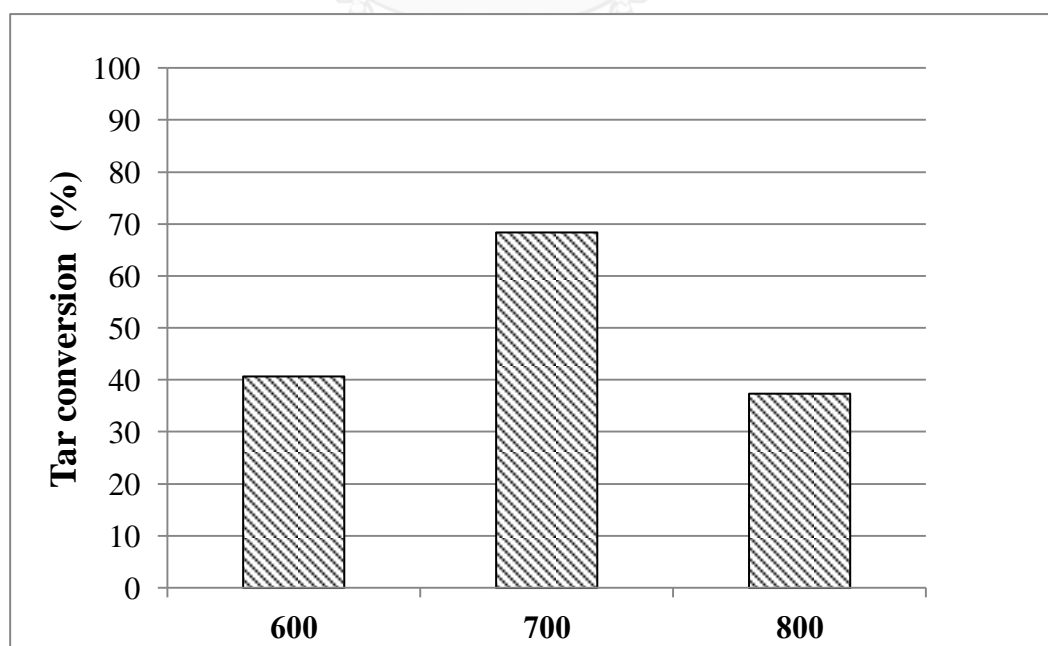
หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินหลังการทดลองเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ก่อนการทดลอง โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ก่อนการทดลองและหลังจากการทดลองที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์หลังการทดลองทั้ง 2 ชนิด มีพื้นที่ผิวขรุขระมากกว่าก่อนการทดลอง แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวในกรณีที่ใช้อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยที่ 800 องศาเซลเซียส ดังแสดงรูปที่ 4.17 (ค) ไม่ได้ส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวทาร์ เนื่องจากองค์ประกอบของทาร์ส่วนใหญ่คือ แนฟทาลีน นอกจากนี้ ยังมีผลของโพแทสเซียมและแคลเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแตกตัวของทาร์อีกด้วย



รูปที่ 4.17 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหินก่อนการทดลอง (ก) และหลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

#### 4.6.2 กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์

ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ แสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์สูงสุดที่ร้อยละ 68 ส่วนที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ลดลง และที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียสมีค่าน้อยที่สุดประมาณร้อยละ 37



รูปที่ 4.18 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC)

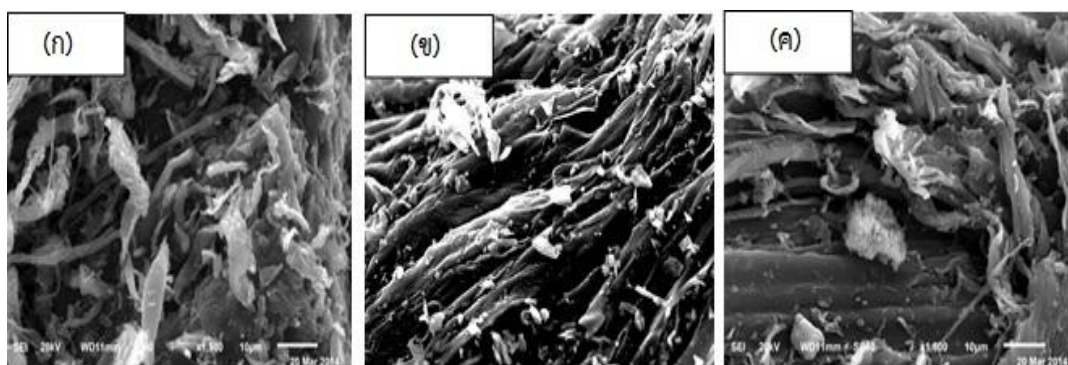
เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ระหว่างกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหิน (CC) และตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์สูงเมื่อใช้อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส ดังนั้นองค์ประกอบของทาร์มีอิทธิพลต่อความสามารถในการแตกตัวของทาร์ โดยทาร์พวกเอโรแมติกวงเดียวที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจะแตกตัวบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ทั้ง 2 ชนิดได้ดีกว่าทาร์ชนิดอื่นๆ

พิจารณาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) หลังจากการทดลองในแก๊สพีเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกันด้วยเทคนิค BET และ XRF แสดงดังตารางที่ 4.13 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์หลังการทดลองที่มีอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนรวมสูงกว่าที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากับไอน้ำ แต่อย่างไรก็ตาม การลดลงของร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส เกิดจากปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water-gas shift) ที่อุณหภูมิสูง และเมื่อพิจารณาแร่ธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ พบว่า ปริมาณของโพแทสเซียมที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 และ 800 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณของแคลเซียมที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียสมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการทดลองที่อุณหภูมิอื่น ดังนั้น อาจสรุปได้ว่า แคลเซียมคือ แร่ธาตุหลักที่ส่งเสริมความสามารถในการแตกตัวของทาร์เมื่อทำการทดลองด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากชีวมวล

ตารางที่ 4.13 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (CLN) หลังจากการทดลองในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน

อุณหภูมิปลดปล่อย สารระเหย	600 องศาเซลเซียส	700 องศาเซลเซียส	800 องศาเซลเซียส
พื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area, $m^2 g^{-1}$ )	518.33	524.95	483.07
ปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume, $cm^3 g^{-1}$ )	0.3649	0.3761	0.3341
ปริมาณโพแทสเซียม (K, wt%)	1.66	1.74	1.76
ปริมาณแคลเซียม (Ca, wt%)	1.44	1.62	1.43

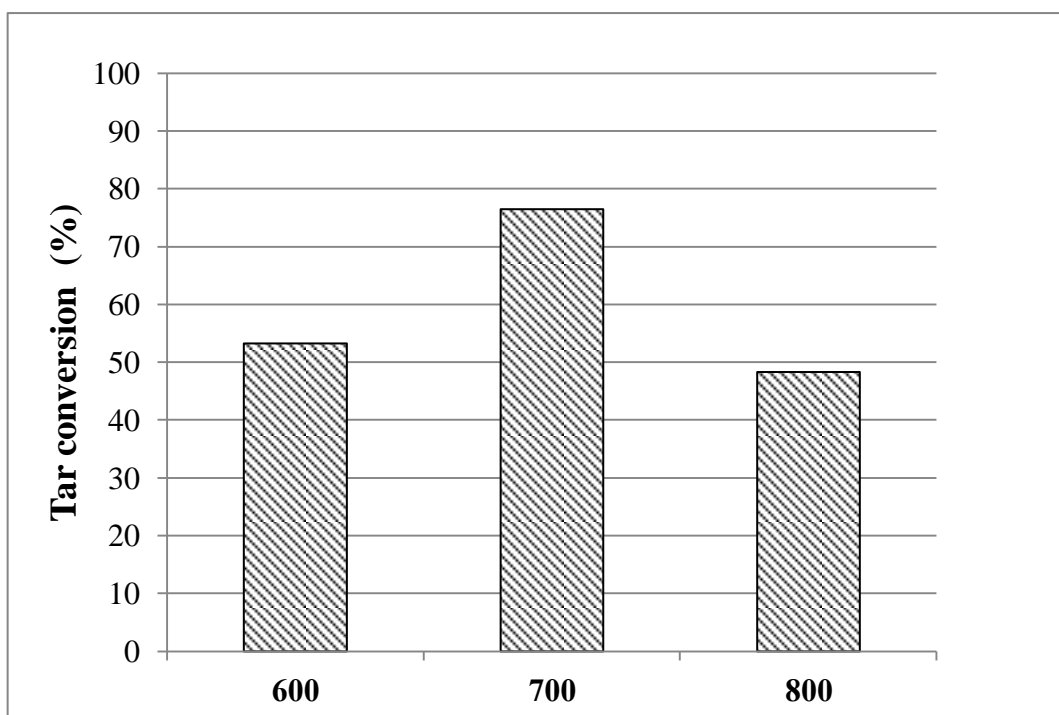
หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์หลังการทดลองเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ก่อนการทดลอง โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) ก่อนการทดลองและหลังจากการทดลองที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์หลังการทดลองทั้ง 2 ชนิด มีพื้นที่ผิวขรุขระมากกว่าก่อนการทดลอง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยเป็น 800 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ลดลง ดังแสดงรูปที่ 4.19 (ค) เนื่องจากเกิดการรวมตัวของพื้นที่ผิวของคาร์บอนกับทาร์ที่มาจากคาร์บอนไฟโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ ทำให้รูพรุนบนพื้นที่ผิวลดลงและเกิดพื้นที่ผิวเรียบมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลของแฉะธาตุมืออยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ที่ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ลดลง



รูปที่ 4.19 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากไม้กระถินยักษ์ก่อนการทดลอง (ก) และหลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

#### 4.6.3 กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์

ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ในแก๊สพีเคชั่นของไม้กระถินยักษ์ด้วยไอน้ำ แสดงในรูปที่ 4.20 พบว่า ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์สูงสุด (ร้อยละ 76) และต่ำสุดที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส (ร้อยละ 48) ซึ่งต่างจากกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) เนื่องจากกรณีที่ใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นชีวมวล มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียส มากกว่าที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation) และการดูดซับของไฮโดรเจนบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ ทำให้พื้นที่ผิวที่ว่างไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Active site) ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพต่อการลดทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียสลดลง



รูปที่ 4.20 ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN)

นอกจากปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation) และการถูกดูดซับไฮโดรเจนบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียสแล้ว อีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ คือ องค์ประกอบของทาร์โดยเฉพาะแนฟทาลิน ซึ่งส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ต่ำลง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียสพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) สามารถแตกตัวทาร์พวกแอโรแมติกวงเดียวได้ดีเช่นเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) และจากไม้กระถินยักษ์ (LNC) ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ

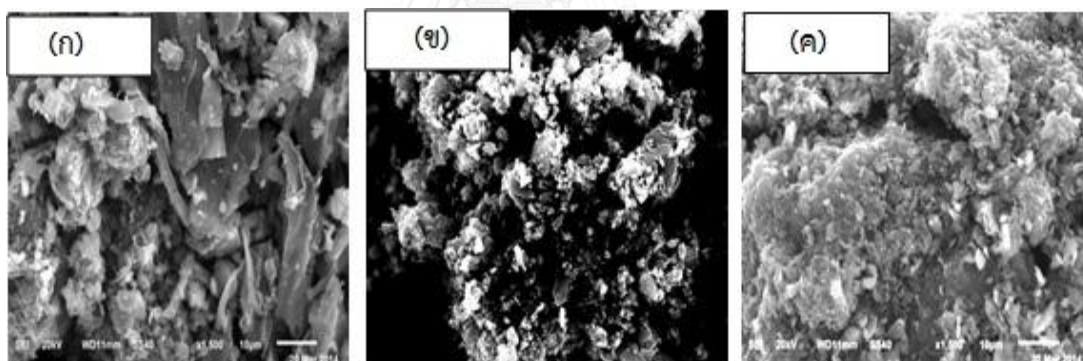


จากลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) หลังจากการทดลองในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน ด้วยเทคนิค BET และ XRF แสดงดังตารางที่ 4.14 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมหลังการทดลองที่มีอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยและปริมาตรของรูพรุนรวมสูงกว่าที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส ไม่ได้มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 700 และ 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดมีเทนและการดูดซับไฮโดรเจนบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงการมีอยู่ขององค์ประกอบของแนฟทาลินในปริมาณมาก และเมื่อพิจารณาปริมาณของแร่ธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) หลังจากการทดลอง พบว่า ปริมาณของโพแทสเซียมและแคลเซียมสูงสุดที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มเหมือนกับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหิน (CC) ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ

ตารางที่ 4.14 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ หลังจากการทดลองในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน

อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย	600 องศาเซลเซียส	700 องศาเซลเซียส	800 องศาเซลเซียส
พื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area, $m^2 g^{-1}$ )	305.43	375.56	395.56
ปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume, $cm^3 g^{-1}$ )	0.2608	0.3222	0.3339
ปริมาณโพแทสเซียม (K, wt%)	0.525	0.583	0.575
ปริมาณแคลเซียม (Ca, wt%)	0.689	0.768	0.761

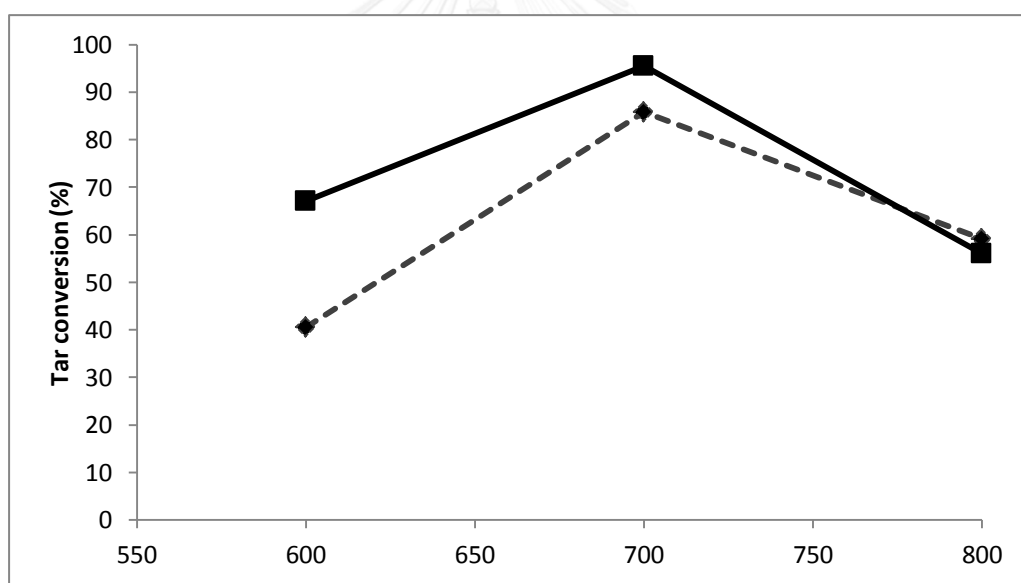
หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมหลังการทดลองเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมก่อนการทดลอง โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) ก่อนการทดลองและหลังจากการทดลองที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์หลังการทดลองทั้ง 2 ชนิด มีพื้นที่ผิวขรุขระมากกว่าก่อนการทดลอง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมกับไอน้ำที่ทำการป้อนเข้าสู่ระบบ แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส ไม่ได้ส่งผลให้ความสามารถในการแตกตัวของทาร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีปริมาณของแร่ธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมน้อยและการมีเนฟทาซีนเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียสนี้น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.21 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ก่อนการทดลอง (ก) และหลังการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ข) และ 800 องศาเซลเซียส (ค) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

#### 4.7 ผลของชีวมวลต่อการลดทาร์ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ

ทำการเปรียบเทียบชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ ชีวมวลที่ใช้ศึกษา คือ ฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ ทำการเปรียบเทียบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์จากถ่านหิน (CC) ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส โดยรูปที่ 4.22 แสดงผลของอุณหภูมิในการปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์จากชีวมวล 2 ชนิด ซึ่งพบว่าเมื่อทำการป้อนฟางข้าวหรือไม้กระถินยักษ์เข้าสู่ระบบแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอื่น เนื่องจากองค์ประกอบทาร์ที่อุณหภูมินี้ ส่วนใหญ่เป็นทาร์พวกแอโรแมติกวงเดี่ยวที่มีหมู่ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะทาร์ที่มีหมู่ฟีนอลิก (Phenolic group) ซึ่งสามารถแตกตัวบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ได้ดีกว่าทาร์ประเภทอื่นๆ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส พบว่า ทาร์จากไม้กระถินยักษ์มีความสามารถแตกตัวได้ดีกว่าฟางข้าว



รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิในการปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์จากชีวมวล 2 ชนิด (—■— คือ ไม้กระถินยักษ์ และ -●- คือ ฟางข้าว)

เมื่อพิจารณาปริมาณของทาร์พวกแอโรแมติกวงเดียวที่มีหมู่ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบใน ฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิการปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส พบว่า กรณีที่ใช้ ไม้กระถินยักษ์จะมีปริมาณทาร์ประเภทนี้มากกว่ากรณีที่ใช้ฟางข้าว ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของ ทาร์จากไม้กระถินยักษ์สูงกว่าฟางข้าว และเมื่อพิจารณาทาร์กลุ่มฟีนอลิกเพียงอย่างเดียว จะพบว่า มี องค์ประกอบของฟีนอล เมทิลฟีนอล และไดเมทิลฟีนอล จากผลทดลองในตารางที่ 4.6 และ 4.11 พบว่า ทาร์จากฟางข้าวส่วนใหญ่เป็นพวกเมทิลฟีนอล (Methyl phenol) มากกว่าทาร์กลุ่มฟีนอลิก ชนิดอื่น ส่วนทาร์จากไม้กระถินยักษ์มีปริมาณทาร์พวกฟีนอล (Phenol) มากที่สุด ดังนั้น อาจจะสรุป ได้ว่า ทาร์พวกฟีนอลสามารถแตกตัวบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ได้ดีกว่าทาร์ประเภทอื่น เนื่องจากฟีนอลมีหมู่ไฮดรอกซิลบนแอโรแมติกเพียงหมู่เดียว ทำให้สามารถดูดซับและแตกตัวบน พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ในสถานะที่มีไอน้ำได้ง่ายกว่าทาร์ชนิดอื่น [31] ส่งผลให้ค่าร้อยละการ เปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียสจากไม้กระถินยักษ์มีค่าสูงกว่า กรณีที่ใช้ฟางข้าว ส่วนร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส ของไม้กระถินยักษ์ต่ำกว่ากรณีที่ใช้ฟางข้าว เป็นผลมาจากการมีปริมาณของแนฟทาลินที่มากกว่า จึง ทำให้เกิดการแตกตัวของทาร์บนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ได้ยากขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิสหรืออุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อการลดทอนในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล โดยใช้ชาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองขั้นตอน (Two-stage fixed bed reactor) โดยชีวมวลที่ศึกษามี 2 ชนิด คือ ฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ ช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ที่เตรียมได้มีทั้งหมด 5 ชนิด ประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหิน (CC) ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากฟางข้าว (RSC) ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากไม้กระถินยักษ์ (LNC) ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมจากถ่านหินและฟางข้าว (CRS) และตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมจากถ่านหินและไม้กระถินยักษ์ (CLN) ซึ่งเตรียมจากการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งหนึ่งขั้นตอน และจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ต่อประสิทธิภาพการลดทอนในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ

จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ทุกชนิดที่เตรียมได้จากการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส สามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวทาร์จากชีวมวลในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำได้ ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ส่วนผลิตภัณฑ์ชาร์ที่ได้หลังจากการทดลองที่อุณหภูมิเดียวกัน มีค่าใกล้เคียงกันทุกการทดลอง เมื่อชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบเป็นชนิดเดียวกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากถ่านหิน (CC) ให้ประสิทธิภาพในการลดทอนดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นที่อุณหภูมิเดียวกัน ทั้งกรณีที่ใช้ฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์เป็นชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบ นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์ผสมทั้ง 2 ชนิด (CRS, CLN) มีประสิทธิภาพในการลดทอนดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากชีวมวล (RSC, LNC)

### 5.1.2 ผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อประสิทธิภาพการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ

จากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยมีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ เนื่องจากอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยส่งผลโดยตรงต่อองค์ประกอบของทาร์ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียส พบว่า องค์ประกอบของทาร์ส่วนใหญ่เป็นทาร์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยเป็น 700 องศาเซลเซียส ทาร์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีปริมาณน้อยลง และเริ่มพบทาร์พวกแอโรแมติกวงเดียว (Light aromatic tar) มากขึ้น และพบทาร์พวกแอโรแมติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือทาร์พวกแอโรแมติก 2-3 วง (Light polycyclic aromatic hydrocarbon tar) มากขึ้น เมื่ออุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยสูงถึง 800 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ยังพบว่าแนฟทาลีนเป็นองค์ประกอบหลักของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส ซึ่งแนฟทาลีนเป็นสารประกอบที่มีเสถียรภาพสูง ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียสต่ำกว่าที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมทั้งสองชนิดที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพในการลดทาร์พวกแอโรแมติกวงเดียวที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมากกว่าทาร์พวกแอโรแมติก 2-3 วง

ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ อาทิเช่น พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวมและแร่ธาตุที่ยังคงเหลืออยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ ส่งผลต่อความสามารถในการแตกตัวของทาร์ โดยการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวม เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนบนพื้นที่ผิวกับไอน้ำ ส่วนโพแทสเซียมและแคลเซียมที่ยังคงเหลืออยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพต่อการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำได้

### 5.1.3 ผลของชีวมวลต่อการลดทาร์ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ

จากการศึกษาผลของชีวมวลทั้ง 2 ชนิด พบว่า เมื่อทำการทดลองโดยใช้ชีวมวลต่างชนิดกัน ส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนและปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สต่างๆ รวมถึงร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบจากตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์และที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของทาร์ที่แตกต่างกัน และจากการทดลอง พบว่า ทาร์พวกแอโรแมติกวงเดียวที่อยู่ในกลุ่มฟีนอลิก อย่างเช่น ฟีนอล ซึ่งพบมากที่สุดเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส โดยใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบ สามารถดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์และสลายตัวกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ง่ายกว่าทาร์ชนิดอื่น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

นอกจากพื้นที่ผิวเฉลี่ย (Average surface area) และปริมาตรของรูพรุนรวม (Total pore volume) ของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ จะสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพต่อการลดทอนในแกซีฟิเคชันได้แล้ว และจากงานวิจัยนี้ พบว่า แร่ธาตุที่คงเหลือในตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์โดยเฉพาะแร่ธาตุโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ท (Alkali and alkali earth metallic, AAEM) สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลดทอนได้ ดังนั้น การเติมแร่ธาตุโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ทลงไปให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ด้วยวิธีการต่างๆ น่าจะส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่อการลดทอนในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้



### รายการอ้างอิง

1. ศิวพรรณ มหาสุภาพ, ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จากชีวมวลในเบตนึ่งสองขั้นตอน, เคมีเทคนิค. 2553, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. Krerkkaiwan, S., et al., *Synergetic effect during co-pyrolysis/gasification of biomass and sub-bituminous coal*. Fuel Processing Technology, 2013. 115: p. 11-18.
3. Song, Y., et al., *Effects of volatile-char interactions on in situ destruction of nascent tar during the pyrolysis and gasification of biomass. Part I. Roles of nascent char*. Fuel, 2014. 122: p. 60-66.
4. Saxena, R.C., D.K. Adhikari, and H.B. Goyal, *Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. 13(1): p. 167-178.
5. Zanzi, R., *Pyrolysis of biomass. Rapid pyrolysis at high temperature. Slow pyrolysis for active carbon preparation.*, in *KTH, Superseded Departments, Chemical Engineering and Technology*. 2001, Royal institute of technology: Stockholm.
6. Farm, S.o.t. *Plant Structure & Function*. September 23,2014]; Available from: <http://sci.waikato.ac.nz/farm/content/plantstructure.html>
7. Jonas, W., *Modelling of Hemicellulose Degradation during Softwood Kraft Pulping*, in *Department of Chemical and Biological Engineering*. 2012, Chalmers University of Technology.
8. Biochemistry, D.o.c.a. *Sustainable Chemistry and Biomass Conversion*. 2014 May 28 2014]; Available from: <http://www.chem.ucsb.edu/fordgroup/research/biomass>
9. Brown, R.C., *Biorenewable Resources: Engineering New Products from Agriculture*. 2003: Blackwell.
10. กองทุนเพื่อการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน. *แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี*. ตุลาคม 20, 2014]; Available from: <http://www.enconfund.go.th/pdf/index/aedp25.pdf>



11. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, ส. การพยากรณ์ผลผลิตการเกษตร. 2557 ตุลาคม 20, 2557]; Available from:  
[http://www2.oae.go.th/forecast/15\\_SEP2557/Thai/all/wh\\_01.pdf](http://www2.oae.go.th/forecast/15_SEP2557/Thai/all/wh_01.pdf)
12. ประเทศสีเขียว. กระถินยักษ์. 2551 พฤษภาคม 14, 2557]; Available from:  
<http://www.greencoun.com/Leucaena1.php>
13. วิชาการ.คอม. ฟางข้าว. 2556 พฤษภาคม 14, 2557]; Available from:  
<http://www.vcharkarn.com/varticle/43896>
14. Saxena, R.C., et al., *Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008. 12(7): p. 1909-1927.
15. นคร ทิพย์วาศ์, เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. 2553, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).
16. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. เทคโนโลยีการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงจากเศษไม้. 2552 พฤษภาคม 28, 2557]; Available from:  
<http://www.dpim.go.th/recycling/article?catid=228&articleid=3502>.
17. Shen, Y. and K. Yoshikawa, *Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 21: p. 371-392.
18. Li, C. and K. Suzuki, *Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification—An overview*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. 13(3): p. 594-604.
19. Lopamudra, D., J.P. Krzysztof, and J.J.G.J. Frans, *A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes*. Biomass & Biocnergy, 2005. 24: p. 125-140.
20. Han, J. and H. Kim, *The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008. 12(2): p. 397-416.
21. กระทรวงพลังงาน, ก.พ. ความสำคัญของถ่านหิน. พฤษภาคม 29, 2557]; Available from:  
[http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3071&Itemid=119&lang=th](http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=3071&Itemid=119&lang=th).

22. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ความรู้ทั่วไปของถ่านหิน. 2554 29 พฤษภาคม 2557]; Available from: [http://projects-pdp2010.egat.co.th/projects1/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1:introduction-of-coal&catid=1:introduction-of-coal&Itemid=8](http://projects-pdp2010.egat.co.th/projects1/index.php?option=com_content&view=article&id=1:introduction-of-coal&catid=1:introduction-of-coal&Itemid=8).
23. Gilbert, P., et al., *Tar reduction in pyrolysis vapours from biomass over a hot char bed*. *Bioresour Technol*, 2009. 100(23): p. 6045-51.
24. Sun, Q., et al., *Decomposition and gasification of pyrolysis volatiles from pine wood through a bed of hot char*. *Fuel*, 2011. 90(3): p. 1041-1048.
25. Kihedu, J.H., *Conversion Synergies during Steam Co-Gasification of Ligno-Cellulosic Simulated Biomass with Coal*. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2012. 02(04): p. 97-103.
26. Masnadi, M.S., et al., *Fuel characterization and co-pyrolysis kinetics of biomass and fossil fuels*. *Fuel*, 2014. 117: p. 1204-1214.
27. Yuan, S., et al., *Rapid co-pyrolysis of rice straw and a bituminous coal in a high-frequency furnace and gasification of the residual char*. *Bioresour Technol*, 2012. 109: p. 188-97.
28. Krerkkaiwan, S., A. Tsutsumi, and P. Kuchonthara, *Biomass derived tar decomposition over coal char bed*. *ScienceAsia*, 2013. 39(5): p. 511.
29. Kantarelis, E., *Catalytic Steam Pyrolysis of Biomass for Production of Liquid Feedstock*, in *Material Science and Engineering*. 2014, Royal Institute of Technology.
30. Krerkkaiwan, S., et al., *Influences of heating rate during coal char preparation and AAEMs on volatile-char interaction with different sources of biomass volatile*. *Fuel Processing Technology*, 2014. 119: p. 10-18.
31. Phuphuakrat, T., T. Namioka, and K. Yoshikawa, *Tar removal from biomass pyrolysis gas in two-step function of decomposition and adsorption*. *Applied Energy*, 2010. 87(7): p. 2203-2211.
32. Duc, L., K. Morishita, and T. Takar, *Catalytic Decomposition of Biomass Tars at Low-Temperature*. 2013.
33. Diniyati, D., et al., *Catalytic Activity of Coal Char on Water-Gas Shift Reaction*. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2009. 42(3): p. 153-159.

34. Fushimi, C., T. Wada, and A. Tsutsumi, *Inhibition of steam gasification of biomass char by hydrogen and tar*. Biomass and Bioenergy, 2011. 35(1): p. 179-185.
35. M. G. Lussier, Z., Zhang, and D. J. Miller, *Hydrogen inhibition in steam gasification of Saran and coal char.*, in *Biennial Conference on Carbon*. 1995: San Diego, Canada. p. 612-613.
36. Kyotani, T., S. Hayashi, and A. Tomita, *Study of calcium catalysis on carbon gasification with molecular oxygen-18*. Energy & fuels, 1991. 5(5): p. 683-688.





## ภาคผนวก ก

## วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลและถ่านหิน

## การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) : ASTM D3172

- ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

วิธีการทดลอง

1. อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying oven) 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desicator) ที่งั้วประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
3. นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่
4. นำถาดอลูมิเนียมออกมาที่งั้วให้เย็นลง แล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ ประมาณ 15 นาที แล้วชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายในบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ	M	= ร้อยละความชื้น
	$W_1$	= น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)
	$W_2$	= น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)
	W	= น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

- ปริมาณสารระเหย (Volatile matter): ASTM D3175

#### วิธีการทดลอง

1. เผาครุชชีเบิล (Crucible) พร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ (Desiccator) แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบิลพร้อมฝาบ้นที่กผล
2. ชั่งตัวอย่างใส่ในครุชชีเบิลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
3. นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
4. หย่อนครุชชีเบิลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
5. หย่อนครุชชีเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
6. นำครุชชีเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบ้นที่กผล

#### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [100 (W_3 - W_4) / W ]$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	$W_3$	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
	$W_4$	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
	M	=	ร้อยละความชื้น

- เถ้า (Ash): ASTM D3174

#### วิธีการทดลอง

1. เผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ (Desiccator) ชั่งน้ำหนักครุชชีเบล (Crucible) พร้อมฝา
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม
3. นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด
4. ใส่ครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
5. นำครุชชีเบลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

#### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100 (W_5 - W_6) / W$$

เมื่อ	A	= ร้อยละของเถ้า
	$W_5$	= น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)
	$W_6$	= น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา (กรัม)
	W	= น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

- ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)

#### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละความชื้น} - \text{ร้อยละสารระเหย} - \text{ร้อยละของเถ้า}$$

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์ทาร์

#### 1 การวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ ยี่ห้อ 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)

โดยแก๊สโครมาโตกราฟมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

- แก๊สพา (Carrier gas)
- ตัวควบคุมการไหล (Flow controller)
- ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injector port)
- คอลัมน์ (Column)
- ดีเทคเตอร์ (Detector)
- เครื่องบันทึก (Recorder)

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

- แก๊สพา (Carrier gas)

แก๊สพา เป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุมให้คงที่



แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีสสมบัติ คือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่างมีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กัน โดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

#### - คอลัมน์ (Column)

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสาร เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วนๆ ดังนั้น โครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์

#### - ดีเทคเตอร์ (Detector)

ดีเทคเตอร์ คือ ส่วนที่สามารถบ่งบอกในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นๆที่แตกต่างไปจากแก๊สพา ดังนั้น เครื่องตรวจวัดจึงเป็นเครื่องมือที่มีความสามารถสัญญาณกับสารต่างๆ ในลักษณะเฉพาะ 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

### ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาจากแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่ง ขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์ แล้วดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

## 2 การวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี -แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี -แมสสเปกโตรเมตรี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010 Gas chromatograph-Mass spectrometry (GC-MS) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงใช้สำหรับวิเคราะห์สารเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ซึ่งสามารถวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่ผสมรวมกันหลายชนิดในปริมาณต่ำระดับนาโนกรัม โดยการแยกให้เป็นสารบริสุทธิ์ และสารประกอบอินทรีย์ที่นำมาวิเคราะห์นั้น จะต้องระเหยได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 450 องศาเซลเซียส เมื่อตรวจวัดเรียบร้อยแล้วจะแสดงผลออกมาในรูปของโครมาโตแกรม (Chromatogram)

### 2.1 แมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนผสมในตัวอย่าง และเพื่อการพิสูจน์เอกลักษณ์สารทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยรูปแบบของการแตกไอออน (Fragmentation pattern) อันเนื่องมาจากการเกิด Ionization ด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งจะแสดงความแตกต่างของค่ามวลต่อประจุออกมา ( $m/z$ ) กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง Ion abundance และ  $m/z$  ของ Fragment ion ต่างๆที่เกิดขึ้น ถูกเรียกว่า Mass spectrum ซึ่งให้ข้อมูลทางโครงสร้างเพื่อใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร โดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลจากเทคนิคอื่นๆร่วมด้วย

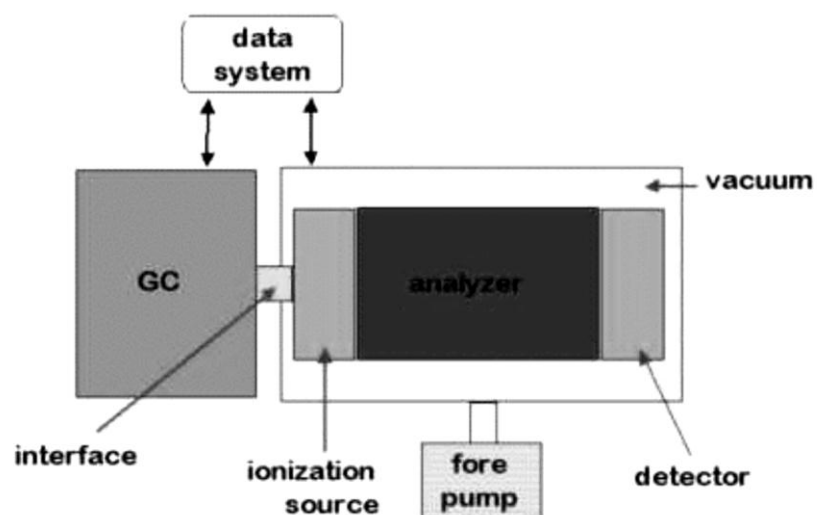
### หลักการของแมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry)

โมเลกุลถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนภายในบริเวณ Ionization chamber ซึ่งถูกเรียกว่าแหล่งไอออน (Ion Source) ไอออนจะถูกดึงและโฟกัสด้วยชุดของเลนส์และถูกแยกโดยหน่วยวิเคราะห์มวล (Mass Analyzer) จากนั้น ไอออนจะถูกกำหนดให้ไปตกกระทบที่เครื่องตรวจวัดไอออน (Ion Detector) ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของไอออนในตัวอย่าง กระแสไอออนจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป Digital signal และถูกบันทึกใน Data system ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณนี้อยู่ในรูปที่เรียกว่าแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) และสามารถนำไปใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวอย่างต่อไป

### 2.2 องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี -แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS) แสดงได้ดังรูปที่ ข 1

- 1 ส่วนการป้อนสารอัตโนมัติ (Auto sampler)
- 2 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)
  - Injector
  - Oven column
- 3 ส่วนการเชื่อมต่อ (Interface)
- 4 แมสสเปกโตรเมตรี (MS)
  - Ionization เป็นชนิด EI ใช้ศักย์ไฟฟ้า 70 eV
  - Mass analysis เป็นแบบ Quadrupole Mass Filters โดยการให้ความถี่ชนิด DC และชนิด AC ไปที่ Mass analyzer ซึ่งประกอบด้วยแท่งรูปทรง Hyperbolic จำนวน 4 แท่ง การเพิ่มของความถี่ชนิด DC และชนิด AC ทำให้ไอออนที่มีค่า  $m/z$  ต่ำไปสู่สูง สามารถ Oscillate ไปถึง Detector ได้ตามลำดับ
  - Ion detection

## Mass spectrometer components



รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS)

## ภาคผนวก ค

## การคำนวณ

## 1. หาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเข้าท่อชั้นในและชั้นนอก

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อชั้นใน 8.8 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อชั้นใน 10.0 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อชั้นนอก 18.8 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อชั้นนอก 20.0 มิลลิเมตร

ความเร็ว/พื้นที่หน้าตัด

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

เพราะฉะนั้น

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

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

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

จะได้

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

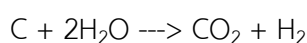
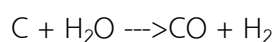
## 2. หาอัตราการป้อนไอน้ำ

น้ำหนักชีวมวลทั้งสองชนิด 0.120 กรัม

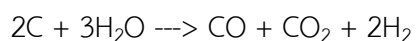
ร้อยละของคาร์บอนในฟางข้าว 37.39

ร้อยละของคาร์บอนในไม้กระถินยักษ์ 42.83

จากปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน



รวม



**ฟางข้าว**

$$C = 0.120 * (37.39/100) = 0.045 \text{ กรัม} = 0.045/12 = 0.0038 \text{ โมล}$$

$$H_2O = 0.0038 * 3/2 = 0.0057 \text{ โมล} = 0.0057 * 18 = 0.1026 \text{ กรัม} = 0.1026 \text{ มิลลิลิตร}$$

**ไม้กระถินยักษ์**

$$C = 0.120 * (42.83/100) = 0.051 \text{ กรัม} = 0.051/12 = 0.0043 \text{ โมล}$$

$$H_2O = 0.0043 * 3/2 = 0.0065 \text{ โมล} = 0.0065 * 18 = 0.1170 \text{ กรัม} = 0.1170 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น จึงทำการป้อนน้ำด้วยอัตราการเร็ว 0.140 มิลลิลิตร/นาที

**3. หาร้อยละโดยปริมาตรของน้ำ**

เปิดตารางไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ได้ Specific volume 4.952 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม

อัตราการไหลของน้ำ 0.140 มิลลิลิตร/นาที = 0.140 กรัม/นาที

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ปริมาตรของไอน้ำ} &= 4.952 \text{ ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม} \times 0.140 \text{ กรัม/นาที} \times (1 \\ &\text{กิโลกรัม/1000 กรัม}) \times (1000 \text{ ลิตร/1 ลูกบาศก์เมตร}) \times (1000 \\ &\text{มิลลิลิตร/1 ลิตร}) \\ &= 693.280 \text{ มิลลิลิตร/นาที} \end{aligned}$$

อัตราการไหลของไนโตรเจน 110 มิลลิลิตร/นาที

$$\text{จาก} \quad V_1/V_2 = T_1/T_2$$

$$110/V_2 = 298/1073$$

$$\text{จะได้} \quad V_2 = 396.074 \text{ มิลลิลิตร/นาที}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ร้อยละโดยปริมาตรของไอน้ำ (\%Vol)} &= 693.280/(396.074+693.280) * 100 \\ &= 63.640 \end{aligned}$$

#### 4. ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในกระบวนแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ

- กรณีใช้ไม้กระถินยักษ์

##### วิธีการคำนวณ

ชั่งน้ำหนักไม้กระถินยักษ์	0.127 กรัม
อุณหภูมิเตาบน (ปลดปล่อยสารระเหย)	800 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเตาล่าง (แตกตัวทาร์)	800 องศาเซลเซียส
อัตราการป้อนไอน้ำ	0.140 มิลลิลิตรต่อนาที
คาร์บอนในไม้กระถินยักษ์	42.83 wt% (as receive)
เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในไม้กระถินยักษ์ = $0.127 \times 42.83 / 100 = 0.0544$ กรัม	

น้ำหนักชาร์ที่ได้จากการทดลอง	0.0149 กรัม
คาร์บอนในชาร์ (C-char)	8.05 wt% (as receive)
เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในชาร์ = $0.0149 \times 8.05 / 100 = 0.0012$ กรัม	

คาร์บอนในแก๊สที่ได้จากการทดลอง ( $\text{CO} + \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ) = 0.0291 กรัม

$$\begin{aligned}
 \text{เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในทาร์} &= \text{น้ำหนักคาร์บอนในไม้กระถินยักษ์} - (\text{น้ำหนัก} \\
 &\quad \text{คาร์บอนในชาร์} + \text{น้ำหนักคาร์บอนในแก๊ส}) \\
 &= 0.0544 - (0.0012 + 0.0291) \\
 &= 0.0241 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนคิดเป็น

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊ส} = (0.0291/0.0544) \times 100 = 53.49$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์} = (0.0012/0.0544) \times 100 = 2.20$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์} = (0.0241/0.0544) \times 100 = 44.31$$

## - กรณีใช้ฟางข้าว

### วิธีการคำนวณ

ชั่งน้ำหนักฟางข้าว	0.127 กรัม
อุณหภูมิตาบน (ปลดปล่อยสารระเหย)	800 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิตาล่าง (แตกตัวทาร์)	800 องศาเซลเซียส
อัตราการป้อนไอน้ำ	0.140 มิลลิลิตรต่อนาที
คาร์บอนในฟางข้าว	37.39 wt% (as receive)

เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในฟางข้าว =  $0.127 \times 37.39 / 100 = 0.0474$  กรัม

น้ำหนักชาร์ที่ได้จากการทดลอง	0.0211 กรัม
คาร์บอนในชาร์ (C-char)	16.11 wt% (as receive)

เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในชาร์ =  $0.0211 \times 16.11 / 100 = 0.0034$  กรัม

คาร์บอนในแก๊สที่ได้จากการทดลอง ( $\text{CO} + \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ) = 0.0213 กรัม

เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในทาร์ = น้ำหนักคาร์บอนในฟางข้าว - (น้ำหนักคาร์บอนในชาร์ + น้ำหนักคาร์บอนในแก๊ส)

$$= 0.0474 - (0.0034 + 0.0213)$$

$$= 0.0227 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนคิดเป็น

ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊ส =  $(0.0213 / 0.0474) \times 100 = 44.94$

ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์ =  $(0.0034 / 0.0474) \times 100 = 7.17$

ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ =  $(0.0227 / 0.0474) \times 100 = 47.89$



## ภาคผนวก ง

## การหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด (Gas production)

## ในกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล

- กรณีใช้ไม้กระถินยักษ์ป้อนสู่ระบบและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ผสมจากถ่านหิน/ไม้กระถินยักษ์

## ครั้งที่ 1

ชั่งน้ำหนักไม้กระถินยักษ์	0.127 กรัม
อุณหภูมิเตาบน (ปลดปล่อยสารระเหย)	800 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเตาล่าง (แตกตัวทาร์)	800 องศาเซลเซียส
อัตราการป้อนไอน้ำ	0.140 มิลลิลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของแก๊สรวม	110 มิลลิลิตรต่อนาที
เวลาที่เก็บแก๊สทุก 10 นาที บรรจุในถุงเก็บแก๊ส เป็นเวลา 60 นาที	
ปริมาตรแก๊สในถุงเก็บแก๊ส 1 ถุง เท่ากับ 1100 มิลลิลิตร	

## ตาราง ง1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard)

ชนิดแก๊ส	Area	%Balance in N <sub>2</sub>
H <sub>2</sub>	35803.0	1.000
CO	1871.9	1.000
CH <sub>4</sub>	6621.3	1.000
CO <sub>2</sub>	2790.8	1.000

ตาราง ง2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง

ถุ่ที่ 1 (10 นาทีแรก)

ชนิดแก๊ส	Area	%เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในถุ่ (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H <sub>2</sub>	148021.5	4.13433	45.47766	1.85973
CO	7757.0	4.14391	45.58310	1.86404
CH <sub>4</sub>	7643.3	1.15435	12.69785	0.51925
CO <sub>2</sub>	4594.5	1.64630	18.10932	0.74055

วิธีการคำนวณถุ่ที่ 1

ชนิดแก๊ส	Area	%เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในถุ่ (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H <sub>2</sub>	148021.5	148021.5/35803.0	(4.13*1100)/100	45.4776/(0.08206*298)
CO	7757.0	7757.0/1871.9	(4.14*1100)/100	45.5831/(0.08206*298)
CH <sub>4</sub>	7643.3	7643.3/6621.3	(1.15*1100)/100	12.6978/(0.08206*298)
CO <sub>2</sub>	4594.5	4594.5/2790.8	(1.64*1100)/100	18.1093/(0.08206*298)

ถุ่ที่ 2

ชนิดแก๊ส	Area	%เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในถุ่ (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H <sub>2</sub>	69518.4	1.94169	21.35861	0.87342
CO	1602.7	0.85618	9.41807	0.38513
CH <sub>4</sub>	109.0	0.01646	0.18108	0.00740
CO <sub>2</sub>	1274.9	0.45682	5.02504	0.20549

ฉิ่งที่ 3

ชนิดแก๊ส	Area	%เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในฉิ่ง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H <sub>2</sub>	192655.2	5.38097	59.19077	2.42056
CO	1857.2	0.99214	10.91361	0.44629
CH <sub>4</sub>	199.2	0.03008	0.33093	0.01353
CO <sub>2</sub>	4857.8	1.74064	19.14712	0.78298

ฉิ่งที่ 4

ชนิดแก๊ส	Area	%เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในฉิ่ง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H <sub>2</sub>	257727.6	7.19849	79.18340	3.23807
CO	1504.8	0.80388	8.84278	0.36161
CH <sub>4</sub>	291.9	0.04408	0.48493	0.01983
CO <sub>2</sub>	7294.5	2.61376	28.75143	1.17574

ฉิ่งที่ 5

ชนิดแก๊ส	Area	%เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในฉิ่ง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H <sub>2</sub>	219736.7	6.13738	67.51120	2.76075
CO	1158.8	0.61905	6.80955	0.27846
CH <sub>4</sub>	196.2	0.02963	0.32594	0.01332
CO <sub>2</sub>	6471.9	2.31901	25.50913	1.04315

ฉิ่งที่ 6

ชนิดแก๊ส	Area	%เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในถุง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H <sub>2</sub>	211959.1	5.92014	65.12164	2.66303
CO	1166.7	0.62327	6.85597	0.28036
CH <sub>4</sub>	193.2	0.02917	0.32096	0.01312
CO <sub>2</sub>	6170.5	2.21101	24.32116	0.99457

ดั่งนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ในเวลา 60 นาที

ชนิดแก๊ส	จำนวนโมล (mmol)	จำนวนโมล/น้ำหนักชีวมวล (mmol/g biomass)
H <sub>2</sub>	19.65132	154.73480
CO	6.42512	50.59149
CH <sub>4</sub>	0.81977	6.45488
CO <sub>2</sub>	5.99404	47.19716

## ภาคผนวก จ

## ข้อมูลการทดลอง

## 1. ข้อมูลการวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการต่างๆ

ตาราง จ1 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol)	ครั้งที่ 2 (mmol)	เฉลี่ย	SD
ถ่านหิน	600	H <sub>2</sub>	6.1777	5.9559	6.0668	0.1568
		CO	5.3381	5.9096	5.6239	0.4041
		CH <sub>4</sub>	0.5776	0.5537	0.5657	0.0169
		CO <sub>2</sub>	0.5290	0.6117	0.5704	0.0585
	700	H <sub>2</sub>	6.3227	6.2472	6.2850	0.0534
		CO	6.2962	6.3918	6.3440	0.0676
		CH <sub>4</sub>	0.7580	0.5447	0.6514	0.1508
		CO <sub>2</sub>	0.8107	0.9143	0.8625	0.0732
	800	H <sub>2</sub>	5.9254	5.5508	5.7381	0.2648
		CO	5.5471	5.2559	5.4015	0.2059
		CH <sub>4</sub>	0.5774	0.4990	0.5382	0.0554
		CO <sub>2</sub>	0.7343	0.9718	0.8530	0.1680

ตาราง จ1 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol)	ครั้งที่ 2 (mmol)	เฉลี่ย	SD
ไม้กระถินยักษ์	600	H <sub>2</sub>	5.4786	5.5890	5.5338	0.0781
		CO	4.1840	4.1354	4.1597	0.0344
		CH <sub>4</sub>	0.5010	0.5614	0.5312	0.0427
		CO <sub>2</sub>	0.7715	0.9577	0.8646	0.1317
	700	H <sub>2</sub>	5.5887	5.5715	5.5801	0.0121
		CO	4.0937	4.3782	4.2360	0.2012
		CH <sub>4</sub>	0.5256	0.4898	0.5077	0.0254
		CO <sub>2</sub>	1.2402	0.8501	1.0452	0.2759
	800	H <sub>2</sub>	5.4786	5.5890	5.5338	0.0781
		CO	4.1840	4.1354	4.1597	0.0344
		CH <sub>4</sub>	0.5010	0.5614	0.5312	0.0427
		CO <sub>2</sub>	0.9011	0.7284	0.8147	0.1221
ถ่านหิน/ไม้กระถินยักษ์	600	H <sub>2</sub>	5.8926	5.4912	5.6919	0.2839
		CO	4.9145	4.6804	4.7974	0.1655
		CH <sub>4</sub>	0.6492	0.6519	0.6506	0.0020
		CO <sub>2</sub>	0.9077	0.9845	0.9461	0.0543
	700	H <sub>2</sub>	5.2512	5.5783	5.4147	0.2313
		CO	4.6063	4.9571	4.7817	0.2480
		CH <sub>4</sub>	0.6121	0.6736	0.6429	0.0435
		CO <sub>2</sub>	2.7251	1.9960	2.3606	0.5156
	800	H <sub>2</sub>	6.1093	6.1095	6.1092	0.0002
		CO	5.1269	5.1260	5.1265	0.0007
		CH <sub>4</sub>	0.6986	0.6980	0.6983	0.0004
		CO <sub>2</sub>	1.3039	1.3900	1.3470	0.0609

ตาราง จ2 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol)	ครั้งที่ 2 (mmol)	เฉลี่ย	SD
ถ่านหิน	600	H <sub>2</sub>	20.1409	22.4635	21.3022	1.6423
		CO	6.0723	5.4518	5.7621	0.4387
		CH <sub>4</sub>	0.4622	0.3991	0.4306	0.0446
		CO <sub>2</sub>	6.6349	7.4787	7.0568	0.5967
	700	H <sub>2</sub>	22.6270	22.0681	22.3475	0.3952
		CO	5.6814	5.7209	5.7011	0.0279
		CH <sub>4</sub>	0.4409	0.4615	0.4512	0.0146
		CO <sub>2</sub>	7.8794	7.9550	7.9172	0.0534
	800	H <sub>2</sub>	18.7224	24.9530	21.8377	4.4057
		CO	6.4345	6.6033	6.5189	0.1194
		CH <sub>4</sub>	0.4904	0.5324	0.5114	0.0297
		CO <sub>2</sub>	6.2743	6.2695	6.2719	0.0034
ไม้กระถินยักษ์	600	H <sub>2</sub>	15.0545	16.1915	15.6230	0.8040
		CO	5.9931	6.0117	6.0024	0.0131
		CH <sub>4</sub>	0.4670	0.4618	0.4644	0.0037
		CO <sub>2</sub>	5.1981	5.1890	5.1936	0.0065
	700	H <sub>2</sub>	16.7242	17.2125	16.9684	0.3453
		CO	6.4303	6.9409	6.6856	0.3611
		CH <sub>4</sub>	0.4969	0.4448	0.4708	0.0368
		CO <sub>2</sub>	5.6632	5.0451	5.3541	0.4370
	800	H <sub>2</sub>	15.7690	15.6530	15.7110	0.0821
		CO	6.6798	6.6844	6.6821	0.0033
		CH <sub>4</sub>	0.4543	0.4198	0.4371	0.0244
		CO <sub>2</sub>	4.9323	4.9236	4.9280	0.0061

ตาราง จ2 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อุณหภูมิ ปลดปล่อย สารระเหย	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol)	ครั้งที่ 2 (mmol)	เฉลี่ย	SD
ถ่านหิน/ไม้ กระถินยักษ์	600	H <sub>2</sub>	21.4423	20.4581	20.9502	0.6959
		CO	5.5855	5.7225	5.6540	0.0969
		CH <sub>4</sub>	0.6084	0.5507	0.5796	0.0408
		CO <sub>2</sub>	6.7392	6.6715	6.7054	0.0479
	700	H <sub>2</sub>	21.5059	20.8553	21.1806	0.4601
		CO	6.1866	6.2643	6.2255	0.0549
		CH <sub>4</sub>	0.7005	0.5751	0.6378	0.0887
		CO <sub>2</sub>	6.8225	6.7523	6.7874	0.0497
	800	H <sub>2</sub>	19.6494	21.1057	20.3775	1.0298
		CO	6.4251	5.6365	6.0308	0.5576
		CH <sub>4</sub>	0.8198	0.5753	0.6976	0.1728
		CO <sub>2</sub>	5.9941	6.9656	6.4798	0.6869



ตาราง จ3 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิสของฟางข้าว

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ ปลดปล่อย สารระเหย	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol)	ครั้งที่ 2 (mmol)	เฉลี่ย	SD
ถ่านหิน	600	H <sub>2</sub>	5.5089	5.3810	5.4450	0.0905
		CO	4.9530	4.6570	4.8050	0.2093
		CH <sub>4</sub>	0.4567	0.3670	0.4119	0.0635
		CO <sub>2</sub>	0.8641	0.8440	0.8541	0.0142
	700	H <sub>2</sub>	6.0340	6.6015	6.3178	0.4013
		CO	5.5059	5.2943	5.4001	0.1496
		CH <sub>4</sub>	0.4891	0.4045	0.4468	0.0598
		CO <sub>2</sub>	0.7921	0.7977	0.7949	0.0040
	800	H <sub>2</sub>	6.4268	5.4260	5.9264	0.7077
		CO	5.3615	5.0180	5.1898	0.2429
		CH <sub>4</sub>	0.4539	0.4460	0.4499	0.0056
		CO <sub>2</sub>	0.7562	0.9030	0.8296	0.1038
ฟางข้าว	600	H <sub>2</sub>	4.6633	4.6996	4.6814	0.0257
		CO	3.1950	3.2097	3.2023	0.0104
		CH <sub>4</sub>	0.4723	0.4520	0.4622	0.0143
		CO <sub>2</sub>	0.7250	0.6935	0.7092	0.0223
	700	H <sub>2</sub>	4.3674	4.7629	4.5651	0.2796
		CO	3.2773	3.1950	3.2361	0.0582
		CH <sub>4</sub>	0.4295	0.4723	0.4509	0.0303
		CO <sub>2</sub>	0.7506	0.8203	0.7855	0.0493
	800	H <sub>2</sub>	4.5995	4.4553	4.5274	0.1019
		CO	3.2097	3.2773	3.2435	0.0478
		CH <sub>4</sub>	0.4520	0.4295	0.4407	0.0160
		CO <sub>2</sub>	0.7897	0.8302	0.8099	0.0286

ตาราง จ3 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิสของฟางข้าว

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol)	ครั้งที่ 2 (mmol)	เฉลี่ย	SD
ถ่านหิน/ ฟางข้าว	600	H <sub>2</sub>	3.8421	4.3823	4.1122	0.3820
		CO	2.8233	2.9728	2.8980	0.1057
		CH <sub>4</sub>	0.4451	0.6139	0.5295	0.1193
		CO <sub>2</sub>	0.8273	0.7937	0.8105	0.0238
	700	H <sub>2</sub>	5.0021	4.2957	4.6489	0.4995
		CO	3.3703	3.2310	3.3006	0.0985
		CH <sub>4</sub>	0.5323	0.4994	0.5158	0.0233
		CO <sub>2</sub>	0.8383	0.7522	0.7952	0.0609
	800	H <sub>2</sub>	5.2012	3.8316	4.5164	0.9684
		CO	3.2674	3.0699	3.1687	0.1396
		CH <sub>4</sub>	0.4701	0.4244	0.4472	0.0323
		CO <sub>2</sub>	0.8149	0.7231	0.7690	0.0649

ตาราง จ4 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าว

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อุณหภูมิ ปลดปล่อย สารระเหย	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol)	ครั้งที่ 2 (mmol)	เฉลี่ย	SD
ถ่านหิน	600	H <sub>2</sub>	19.0151	18.0440	18.5296	0.6867
		CO	6.1891	3.9587	5.0739	1.5772
		CH <sub>4</sub>	0.4731	0.3069	0.3900	0.1175
		CO <sub>2</sub>	5.1168	7.8102	6.4635	1.9045
	700	H <sub>2</sub>	21.4685	20.8927	21.1806	0.4072
		CO	5.4219	5.4904	5.4562	0.0485
		CH <sub>4</sub>	0.4030	0.3839	0.3934	0.0134
		CO <sub>2</sub>	7.2870	7.2223	7.2546	0.0457
	800	H <sub>2</sub>	20.1831	22.2590	21.2211	1.4679
		CO	4.5354	4.9781	4.7568	0.3131
		CH <sub>4</sub>	0.3991	0.4476	0.4233	0.0343
		CO <sub>2</sub>	7.6360	7.0169	7.3264	0.4378
ฟางข้าว	600	H <sub>2</sub>	9.4841	10.4786	9.9813	0.7032
		CO	4.6795	4.8617	4.7706	0.1288
		CH <sub>4</sub>	0.4042	0.2550	0.3296	0.1055
		CO <sub>2</sub>	3.0942	2.9937	3.0439	0.0711
	700	H <sub>2</sub>	11.0269	11.8904	11.4586	0.6106
		CO	4.6838	4.2387	4.4613	0.3147
		CH <sub>4</sub>	0.3258	0.4437	0.3848	0.0834
		CO <sub>2</sub>	3.8334	4.3098	4.0716	0.3368
	800	H <sub>2</sub>	10.4586	10.4586	10.4586	0.0000
		CO	5.2704	5.1653	5.1653	0.0743
		CH <sub>4</sub>	0.3875	0.3526	0.3526	0.0247
		CO <sub>2</sub>	3.4065	3.1741	3.1741	0.1643

ตาราง จ4 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิลดปล่อยสารระเหยต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของฟางข้าว

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อุณหภูมิ ปลดปล่อย สารระเหย	ชนิดแก๊ส	ครั้งที่ 1 (mmol)	ครั้งที่ 2 (mmol)	เฉลี่ย	SD
ถ่านหิน/ ฟางข้าว	600	H <sub>2</sub>	16.8956	16.8899	16.8927	0.0041
		CO	4.1560	4.5679	4.3620	0.2913
		CH <sub>4</sub>	0.4174	0.5267	0.4720	0.0773
		CO <sub>2</sub>	6.4683	5.9941	6.2312	0.3353
	700	H <sub>2</sub>	17.8805	17.0301	17.4553	0.6013
		CO	4.9084	4.6108	4.7596	0.2104
		CH <sub>4</sub>	0.3890	0.5364	0.4627	0.1042
		CO <sub>2</sub>	6.1404	6.1935	6.1669	0.0375
	800	H <sub>2</sub>	16.5532	15.9291	16.8899	0.4413
		CO	4.1983	4.0409	4.5679	0.1113
		CH <sub>4</sub>	0.4106	0.5197	0.5267	0.0771
		CO <sub>2</sub>	5.7537	5.7765	5.9941	0.0161

ตารางที่ 5 ข้อมูลจากการทดลองผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สและร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน โดยไม่มีชีวมวลป้อนเข้าสู่ระบบไพโรไลซิส

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ผลิตภัณฑ์แก๊ส (เฉลี่ย)				% C in gas
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO	
ถ่านหิน	4.5992	3.4468	0.0938	0.4477	3.9883
ไม้กระถินยักษ์	4.7806	2.4910	0.0702	0.3042	2.8653
ฟางข้าว	3.6513	1.8816	0.0271	0.4065	2.3152
ถ่านหิน/ไม้กระถินยักษ์	4.1635	4.0890	0.4725	0.4523	5.0138
ถ่านหิน/ฟางข้าว	3.5876	1.7097	0.0122	0.3148	2.0367

ตารางที่ 6 ข้อมูลจากการทดลองผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซาร์ต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สและร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน โดยไม่มีชีวมวลป้อนเข้าสู่ระบบแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ผลิตภัณฑ์แก๊ส (เฉลี่ย)				% C in gas
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO	
ถ่านหิน	17.6032	3.7951	0.0990	5.8934	9.7875
ไม้กระถินยักษ์	12.4434	5.1750	0.0522	3.6928	8.9200
ฟางข้าว	9.3496	3.8492	0.0375	2.4137	6.3004
ถ่านหิน/ไม้กระถินยักษ์	18.5831	4.4978	0.1726	5.1826	9.8531
ถ่านหิน/ฟางข้าว	14.5922	3.1785	0.0698	5.4481	8.6965

ตาราง จ7 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน  
เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิปลดปล่อย สารระเหย	%C in gas	%C in tar	%C in char
No char	600	26.2818	69.8989	3.8194
	700	40.6007	56.4293	2.9700
	800	51.8097	45.9361	2.2542
ถ่านหิน	600	61.1441	35.0365	3.8194
	700	85.3674	11.6626	2.9700
	800	61.8695	35.8764	2.2542
ไม้กระถินยักษ์	600	57.6949	38.4858	3.8194
	700	64.4957	32.5343	2.9700
	800	56.5943	41.1516	2.2542
ถ่านหิน/ ไม้กระถินยักษ์	600	30.4503	65.7303	3.8194
	700	61.1393	35.8907	2.9700
	800	56.5910	41.1548	2.2542

ตาราง จ8 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน  
เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในแก๊สพีเคชั้นด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิปลดปล่อย สารระเหย	%C in gas	%C in tar	%C in char
No char	600	45.8133	50.3673	3.8194
	700	46.6870	50.3430	2.9700
	800	53.4300	44.3158	2.2542
ถ่านหิน	600	76.3761	19.8046	3.8194
	700	94.4679	2.5621	2.9700
	800	77.5401	20.2057	2.2542
ไม้กระถินยักษ์	600	60.4563	35.7244	3.8194
	700	79.2127	17.8173	2.9700
	800	68.9892	28.7566	2.2542
ถ่านหิน/ไม้กระถิน ยักษ์	600	68.0783	28.1023	3.8194
	700	83.7796	13.2504	2.9700
	800	74.0187	23.7271	2.2542

ตาราง จ9 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน  
เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสของฟางข้าว

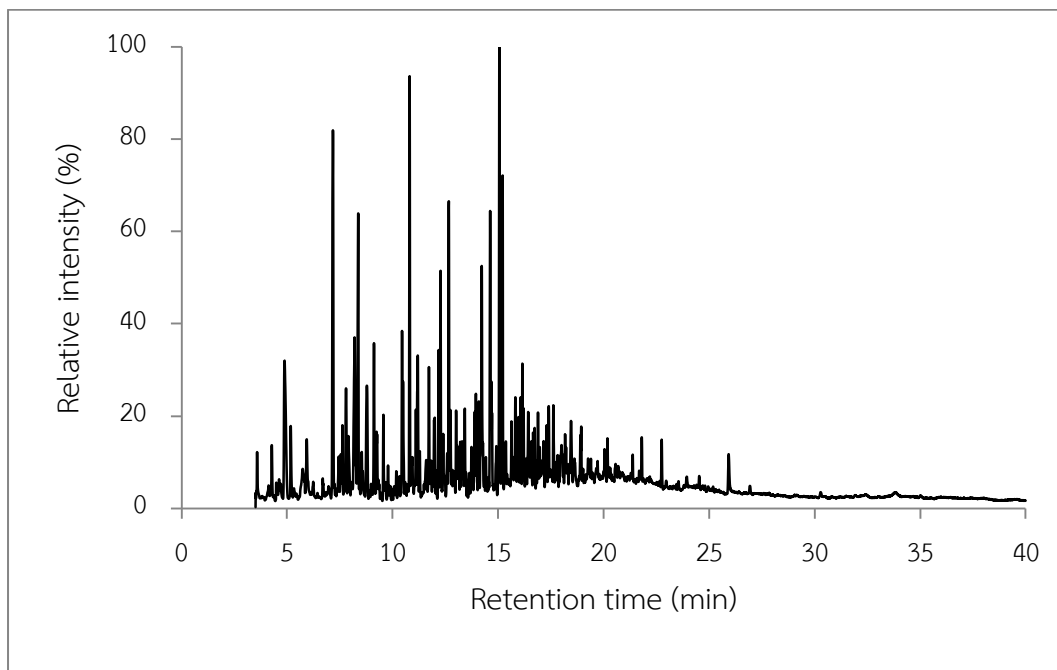
ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิปลดปล่อย สารระเหย	%C in gas	%C in tar	%C in char
No char	600	29.0562	61.6709	9.2729
	700	32.4945	59.8455	7.6600
	800	35.1928	57.5679	7.2393
ถ่านหิน	600	52.6295	38.0976	9.2729
	700	54.5154	37.8246	7.6600
	800	62.6966	30.0642	7.2393
ฟางข้าว	600	52.0198	38.7073	9.2729
	700	54.5154	37.8246	7.6600
	800	55.0630	37.6973	7.2393
ถ่านหิน/ฟางข้าว	600	55.6308	35.0963	9.2729
	700	65.0736	27.2664	7.6600
	800	59.3433	33.4174	7.2393



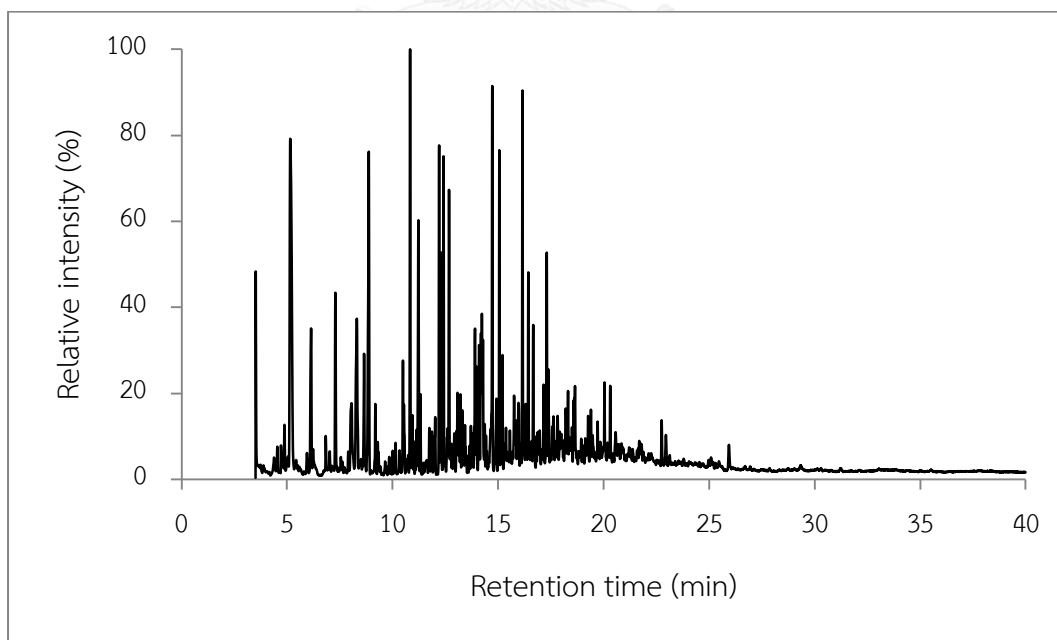
ตาราง จ10 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน  
เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในแก๊สพีเคชั้นด้วยไอน้ำของฟางข้าว

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิปลดปล่อย สารระเหย	%C in gas	%C in tar	%C in char
No char	600	29.6563	61.0708	9.2729
	700	37.5293	54.8107	7.6600
	800	44.9842	47.7765	7.2393
ถ่านหิน	600	54.0788	36.6483	9.2729
	700	83.8186	8.5214	7.6600
	800	68.7142	24.0466	7.2393
ฟางข้าว	600	46.5932	44.1340	9.2729
	700	66.1393	26.2007	7.6600
	800	55.7966	36.9641	7.2393
ถ่านหิน/ฟางข้าว	600	59.2666	31.4605	9.2729
	700	68.0478	24.2922	7.6600
	800	60.4540	32.3067	7.2393

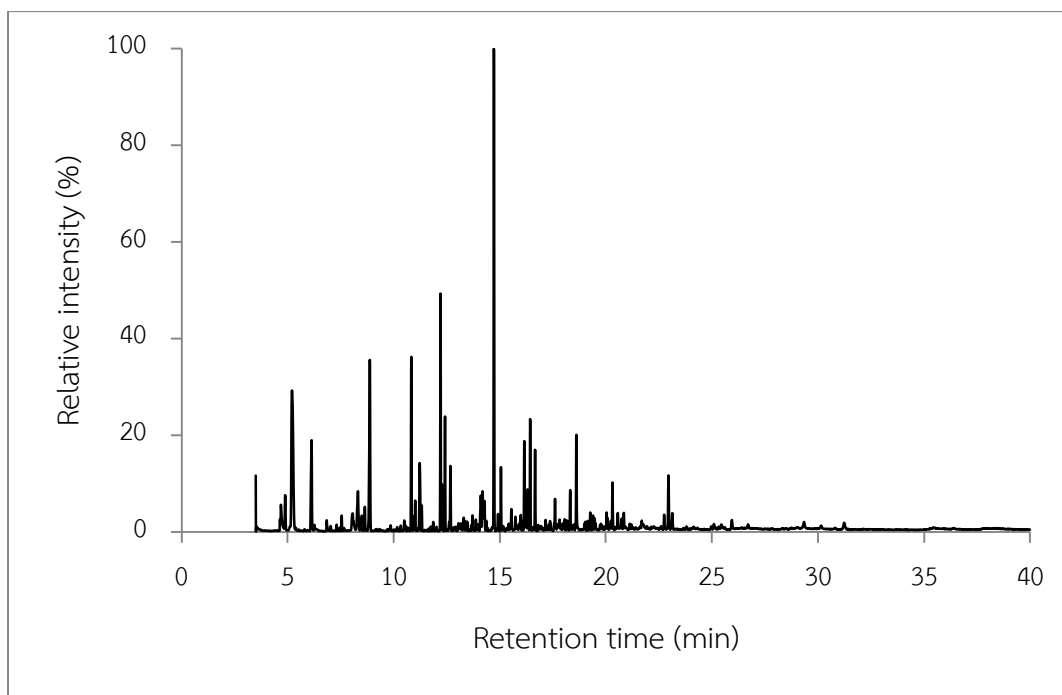
2. โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารจากชีวมวลที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยต่างกัน



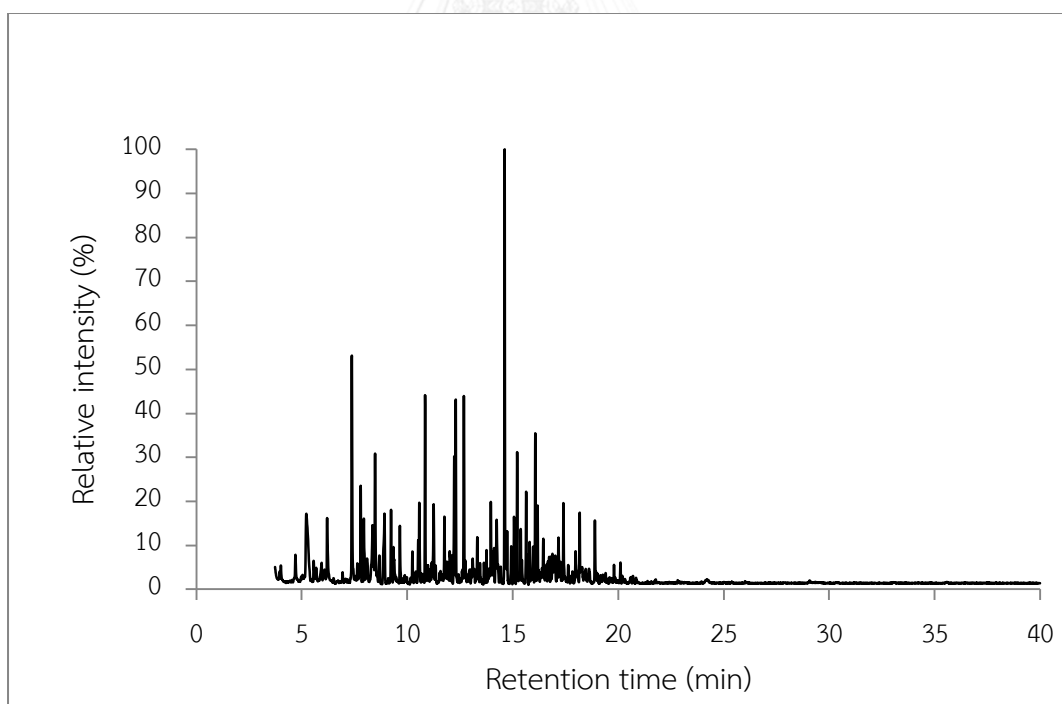
รูปที่ จ1 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารจากการไพโรไลซิสของฟางข้าว ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียส



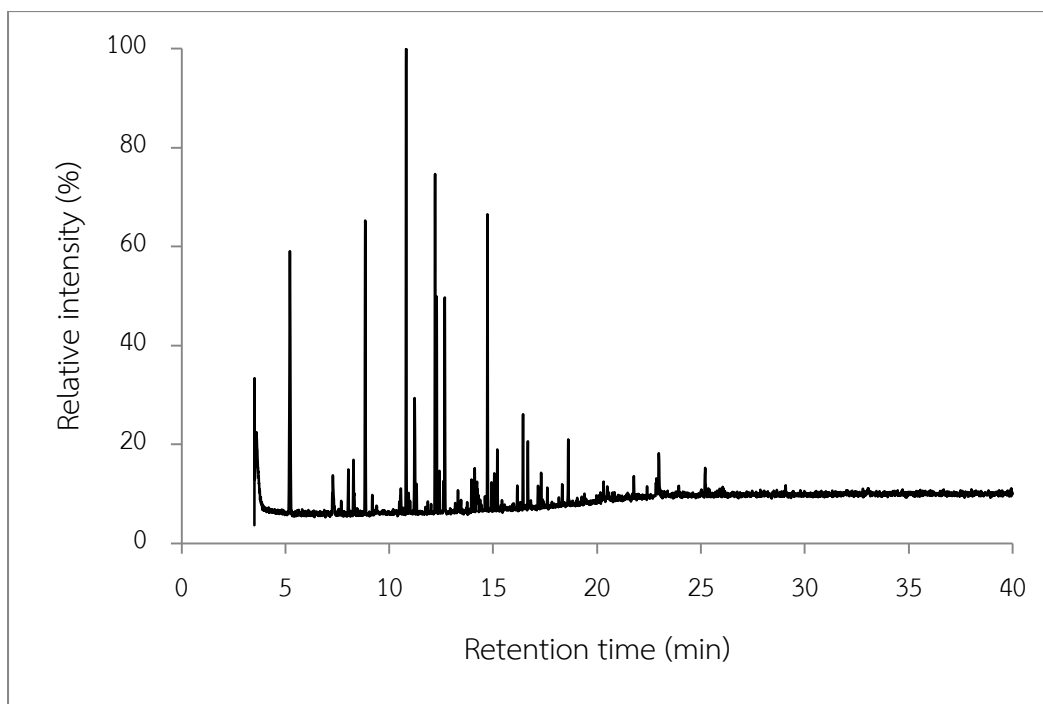
รูปที่ จ2 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารจากการไพโรไลซิสของฟางข้าว ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส



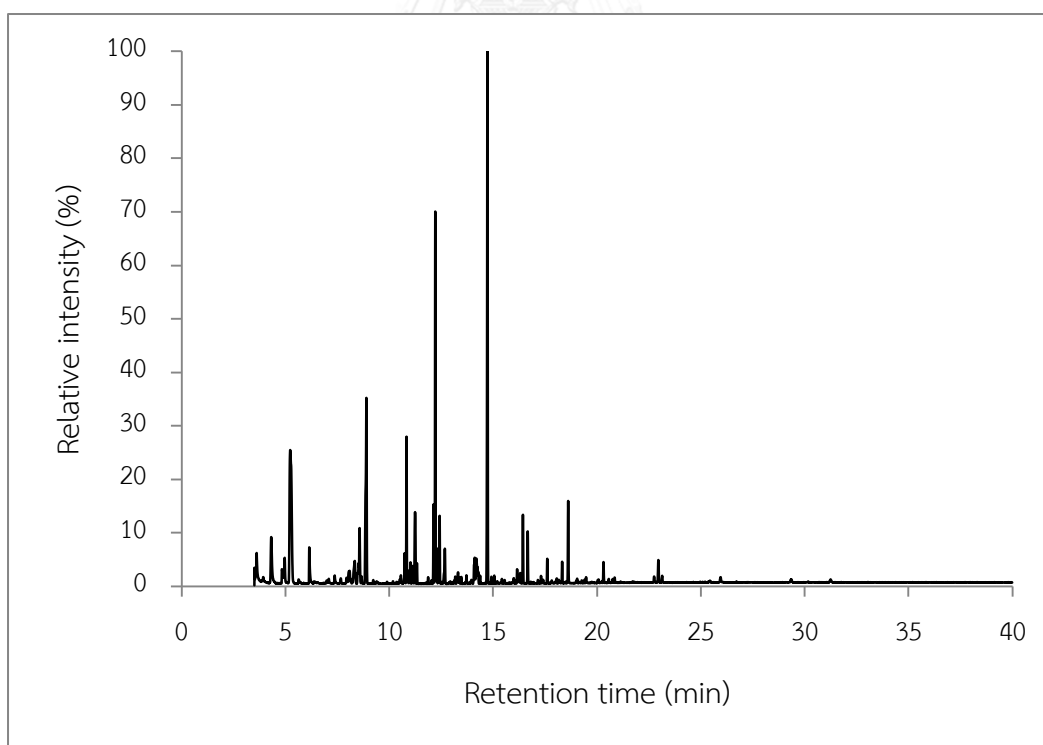
รูปที่ จ3 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของहारจากการไฟโรไลซิสของฟางข้าว  
ที่อุณหภูมิลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ จ4 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของहारจากการไฟโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์  
ที่อุณหภูมิลดปล่อยสารระเหย 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ จ5 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของทาร์จากการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์  
ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ จ6 โครมาโทแกรม (Chromatogram) ของทาร์จากการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์  
ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 800 องศาเซลเซียส

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุวัฒน์ เมืองทะ เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิตจากภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554 และเข้าต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2555 และได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ The 5th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology and The 20th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers ในวันที่ 22 เมษายน 2557 ณ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพมหานคร

