

การผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สฟิเคชันของไบอ้อยด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับโดยใช้  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$   
และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROGEN PRODUCTION FROM SORPTION-ENHANCED STEAM GASIFICATION OF  
SUGARCANE LEAVES USING  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  and  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สฟิเคชันของไบอ้อยด้วยไอน้ำที่
	เพิ่มการดูดซับโดยใช้ $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ และ $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$
โดย	นายต่อพงษ์ ศงสนันท์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธारा

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธारा)	
.....	กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พุกตะ)	

ต่อพงษ์ ศงสนันท์ : การผลิตไฮโดรเจนจากแกซิฟิเคชันของใบอ้อยด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับโดยใช้  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ . ( HYDROGEN PRODUCTION FROM SORPTION-ENHANCED STEAM GASIFICATION OF SUGARCANE LEAVES USING  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  and  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับลิเทียมอโทธิลิเกต ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง และศึกษาผลของอัตราส่วนผสมโดยมวลของ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  ต่อแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  ต่อแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) รวมถึงผลของอุณหภูมิแกซิฟิเคชันต่อผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น จากผลการทดลองจะพบว่า  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  ที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจะมีความสามารถในการดูดซับ  $\text{CO}_2$  สูงสุดเท่ากับ 509.45 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ และจากผลของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  ต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย พบว่าทุกอัตราส่วนผสมแสดงให้เห็นถึงผลเสริมกันในการสังเคราะห์ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) อัตราส่วนผสมโดยมวลเท่ากับร้อยละ 50 มีผลได้ของ  $\text{H}_2$  สูงที่สุดเท่ากับ 12.47 มิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อย จากผลของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  ต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย พบว่าทุกอัตราส่วนผสมแสดงให้เห็นถึงผลเสริมกันในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สและผลได้  $\text{H}_2$  พบว่าอัตราส่วนผสมโดยมวลเท่ากับร้อยละ 25 มีผลได้ของ  $\text{H}_2$  สูงสุดเท่ากับ 12.18 มิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อย อุณหภูมิแกซิฟิเคชันมีอิทธิพลอย่างมากต่อผลได้และองค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส อุณหภูมิแกซิฟิเคชันที่เหมาะสมต่อการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อยด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  คือ 700 องศาเซลเซียส และจากการทดลองประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25 พบว่าในระหว่างการทดลองการดูดซับและคายซับ  $\text{CO}_2$  เป็นจำนวน 7 รอบการทดลอง ความสามารถในการดูดซับ  $\text{CO}_2$  ของ LHCAO25 ลดลงร้อยละ 11.44 โดยมวลต่อรอบการทดลอง

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5971971223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Steam gasification, Lithium orthosilicate, Calcium oxide, Magnesium oxide

Torpong Songsanan : HYDROGEN PRODUCTION FROM SORPTION-ENHANCED STEAM GASIFICATION OF SUGARCANE LEAVES USING  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  and  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ . Advisor: Assoc. Prof. Prapan Kuchonthara, Ph.D.

This work aimed to study  $\text{CO}_2$  sorption capacity of  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  synthesized with different calcination temperatures. Experiments were performed using a fixed-bed reactor. Moreover, the influences of gasification temperature, mass ratio of  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  to MgO and mass ratio of  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  to CaO on gaseous products synthesized by steam gasification of sugarcane leaves were investigated in a two-stage fixed-bed reactor. The results indicated that the highest  $\text{CO}_2$  sorption capacity was 509.45 mmol/g- $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  at the calcination temperature of 700 °C. All mass ratios of  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  to MgO for the mixed  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  catalysts exhibited positive effects during steam gasification of sugarcane leaves. The  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  doped with 50 wt.% of MgO gave the maximum hydrogen yield of 12.47 mmol/g-sugarcane leaves. The  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  catalysts also indicated notable synergy during steam gasification of sugarcane leaves for all mass ratios of  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  to CaO. The  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  doped with 25 wt.% of CaO provided the maximum hydrogen yield of 12.18 mmol/g-sugarcane leaves. The gasification temperature extremely affected the gaseous products in the terms of yields and concentrations. The most suitable gasification temperature for steam gasification of sugarcane leaves using  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  or  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  was 700 °C.  $\text{CO}_2$  absorption-desorption cycles of LHCAO25 at 700 °C could be repeated 7 times with a slight drop in absorption capacity with the rate of 11.44 wt.% per cycle.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา ที่กรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมี เทคนิคที่ได้มอบความรู้ตลอดจนคำปรึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบ ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พุ กูตะ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและความคิดเห็นเพื่อปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ช่วยเหลือ และให้คำปรึกษา อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยทั้งในเรื่องของการจัดการงานธุรการ อุปกรณ์งานวิจัยและเทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยดูแลและเป็นกำลังใจ รวมถึงคอยสนับสนุนในทุกๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกท่านที่เป็นที่ปรึกษา รวมไปถึงคอยสนับสนุนและช่วยเหลือในด้านต่างๆ อย่างเต็มที่

งานวิจัย “การผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สซิฟิเคชันของไบอ้อยด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับโดยใช้  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ” จะสำเร็จไปไม่ได้เลยหากขาดทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนา บัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ของศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ และทุนสมทบผู้ช่วยวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอแสดงความดีความชอบทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้แก่บุคคลดังที่กล่าวข้างต้น รวมถึงผู้มีพระคุณท่านอื่นที่ยังไม่ได้กล่าวนามมา ณ โอกาสนี้

ต่อพงษ์ ศงสนันท์

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูป.....	3
บทที่ 1 บทนำ.....	7
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	7
1.2 วัตถุประสงค์.....	8
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ชีวมวล (Biomass).....	11
2.1.1.ประเภทของชีวมวล.....	11
2.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของชีวมวล.....	12
2.1.3 ศักยภาพทางด้านพลังงานของชีวมวล.....	15
2.1.4 ศักยภาพทางด้านพลังงานและปริมาณของอ้อยในประเทศไทย.....	18
2.1.5 สมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวล.....	19

2.1.6	ฐานข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิง .....	22
2.2	กระบวนการแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงาน.....	23
2.2.1	การแปรสภาพทางกายภาพ .....	24
2.2.2	การแปรสภาพทางชีวภาพ .....	25
2.2.3	การแปรสภาพเชิงเคมีความร้อน .....	26
2.3	แกซิฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic gasification) .....	32
2.4	แกซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับ (Sorption-enhanced gasification).....	34
2.4.1	ขั้นตอนพื้นฐานของแกซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับ .....	34
2.4.2	การประยุกต์ใช้งานของแก๊สสังเคราะห์ .....	35
2.5	ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง (High temperature CO <sub>2</sub> sorbent materials) .....	36
2.5.1	ตัวดูดซับกลุ่มแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide-based sorbents).....	36
2.5.2	ตัวดูดซับลิเทียมออร์โทซิลิเกต (Lithium orthosilicate; Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> ) .....	37
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.6.1	แกซิฟิเคชัน.....	39
2.6.2	ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	40
บทที่ 3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง .....	42
3.1	การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ .....	42
3.1.1	เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษาแกซิฟิเคชัน.....	42
3.1.2	เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	43
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	43
3.2.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไบอ้อย .....	43
3.2.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา.....	43
3.2.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น .....	44



3.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ .....	45
3.3 วิธีการทดลอง.....	46
3.3.1 การเตรียมซีมวอล .....	46
3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต .....	46
3.3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา .....	47
3.3.4 ขั้นตอนการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ .....	47
3.3.5 ขั้นตอนการทดลองแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ .....	48
3.3.6 ขั้นตอนการทดลองประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25 .....	49
3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	49
3.4.1 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography; GC) .....	49
3.4.2 เอกซ์เรย์ดิฟแฟลกชันสเปคโตรสโคปี (X-ray diffraction spectroscopy; XRD).....	50
3.4.3 ไนโตรเจนฟิซิชอร์พชันเมเชอร์เมนต์ (Nitrogen physisorption measurement; BET) .....	50
3.4.4 สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Scanning electron microscopy; SEM).....	50
3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติของไบอ้อย .....	50
3.4.6 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	51
3.5 ตัวแปรที่ศึกษา.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	52
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไบอ้อย .....	53
4.2 ผลของการสังเคราะห์และความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับลิเทียม อโทซิลิเกต .....	54
4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้.....	54
4.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	56
4.2.3 ผลของ LH700 ต่อแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย.....	58

4.3 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของแมกนีเซียมออกไซด์และ $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิแกซีพีเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	61
4.3.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ .....	61
4.3.2 ผลของแมกนีเซียมออกไซด์ต่อแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย .....	62
4.3.3 ผลของ LHMGO50 ต่อแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย .....	63
4.4 ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชัน อัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ ในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย .....	65
4.4.1 ผลของอัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ ในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ....	65
4.4.2 ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชันต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ ในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย .....	68
4.5 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์และ $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิแกซีพีเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	71
4.5.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO .....	71
4.5.2 ผลของแคลเซียมออกไซด์ต่อแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย .....	73
4.5.3 ผลของ LHCAO25 ต่อแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย .....	75
4.6 ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชัน อัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย .....	77
4.6.1 ผลของอัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย .....	77
4.6.2 ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชันต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย .....	82
4.7 ประสิทธิภาพการไ้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25 .....	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....	90

5.1 สรุปผลการทดลอง .....	90
5.1.1 ผลการสังเคราะห์ลิเทียมออร์โทซิลิเกตและผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของลิเทียมออร์โทซิลิเกตต่อ แกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย .....	90
5.1.3 ผลของอัตราส่วนผสมของ $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซีพีเคชันด้วย ไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิแกซีพีเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	90
5.1.4 ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชันต่อการทำงานของ LHMGO50 ในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของ ไบอ้อย .....	91
5.1.5 ผลของอัตราส่วนผสมของ $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซีพีเคชันด้วย ไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิแกซีพีเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	91
5.1.6 ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชันต่อการทำงานของ LHCAO50 ในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของ ไบอ้อย .....	92
5.1.7 ประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO50 .....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	93
บรรณานุกรม .....	94
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของไบอ้อย .....	98
ภาคผนวก ข การคำนวณ .....	101
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง .....	110
ประวัติผู้เขียน .....	117

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของชีวมวลประเภทต่างๆ .....	12
2.2 สถิติการใช้พลังงานทดแทนด้านต่างๆ ตั้งแต่ปี 2556 ถึง 2560 .....	17
2.3 พื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตอ้อยปีการผลิต 2559/60.....	18
2.4 ภาวะที่ใช้ในการดำเนินการของแกซิฟิเคชันและผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้น .....	29
3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สตัวอย่าง .....	49
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณบนฐานข้อมูลที่ได้รับมาของใบอ้อย (Proximate analysis, as received basis) .....	53
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุองค์ประกอบบนฐานแห้งไร้เถ้า (Ultimate analysis, Dry and ash-free basis).....	53
ตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของ LH600 LH700 และ LH800 ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET.....	55
ตารางที่ 4.4 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับของ LH600 LH700 และ LH800.....	57
ตารางที่ 4.5 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา LH700 LHMGO25 LHMGO50LHMGO75 และแมกนีเซียมออกไซด์ต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อยในหน่วยมิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อย .....	65
ตารางที่ 4.6 ผลได้ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา LH700 LHCAO25 LHCAO50 LHCAO75 และแคลเซียมออกไซด์ในหน่วยมิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อย .....	78
ข1 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานด้วยเทคนิค GC.....	102
ข2 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่ 4 ด้วยเทคนิค GC.....	102
ข3 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส .....	104
ข4 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานด้วยเทคนิค GC .....	104
ข5 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	104
ข6 การคำนวณผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในการทดลองแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อยด้วย LHCAO25.....	105

ตาราง	หน้า
ข7 การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส .....	106
ข8 การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ลิเทียมอโทซิลิเกต .....	ของ 107
ค1 ข้อมูลการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทซิลิเกต.....	110
ค2 ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกตจากแกซีพีเคชั้นด้วยไอน้ำของไบอ้อย.....	111
ค3 ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LHMGO จากแกซีพีเคชั้นด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่ อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิแกซีพีเคชั้นเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส .....	112
ค4 ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LHMGO จากแกซีพีเคชั้นด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแกซีพีเคชั้นต่างๆ .....	113
ค5 ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LHCAO จากแกซีพีเคชั้นด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิแกซีพีเคชั้นเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส .....	114
ค6 ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LHCAO จากแกซีพีเคชั้นด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแกซีพีเคชั้นต่างๆ .....	115
ค7 ข้อมูลน้ำหนักและร้อยละโดยมวลที่เปลี่ยนแปลงไปของ LHCAO25 .....	116

## สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 (ก) โครงสร้างของเซลลูโลส (ข) พันธะไฮโดรเจนภายในและภายนอกโครงสร้างเซลลูโลส .....	13
2.2 ตัวอย่างโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสที่เกิดจากน้ำตาลชนิดต่างๆ .....	14
2.3 ตัวอย่างโครงสร้างของลิกนิน.....	14
2.4 สถิติการใช้พลังงานทดแทนปี 2556 ถึง 2560 .....	15
2.5 สัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนขั้นสุดท้ายปี 2560 .....	16
2.6 กราฟของ Van Krevelen .....	22
2.7 การเปรียบเทียบฐานข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิง.....	23
2.8 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	27
2.9 ขั้นตอนการเกิดไพโรไลซิสอย่างง่ายของชีวมวล.....	28
2.10 ขั้นตอนในแกซิฟิเคชัน.....	30
2.11 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ.....	33
2.12 แบบจำลองการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออโทซิลิเกต .....	38
3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น .....	42
3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง.....	43
3.3 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น .....	44
3.4 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง.....	45
4.1 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LH600 LH700 และ LH800.....	54
4.2 ลักษณะสัญญาณของตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผาเท่ากับ ก) 600 องศาเซลเซียส ข) 700 องศาเซลเซียส และ ค) 800 องศาเซลเซียส .....	55
4.3 กราฟเส้นโค้งเบรคทรูของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยของ LH600 LH700 LH800 และ Blank.....	56
4.4 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของตัวดูดซับ LH600 LH700 และ LH800 หลังการ ทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	58

4.5 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ LH700 และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	60
4.6 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LH700 และ LH700-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	60
4.7 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของตัวดูดซับ LHMGO25 LHMGO50 และ LHMGO75 หลังการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที .....	61
4.8 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของแมกนีเซียมออกไซด์และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	62
4.9 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ LHMGO50 และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	64
4.10 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50 หลังปรับสภาพ (LHMGO50-H) และ LHMGO50-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	64
4.11 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHMGO25-A LHMGO50-A และ LHMGO75-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	67
4.12 ผลได้ของไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลอง (จุดที่บ) และผลได้จากการทำนาย (จุดโปร่ง) .....	68
4.13 ผลกระทบของอุณหภูมิแกซีฟิเคชันต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50 .....	70
4.14 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHMGO50-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส .....	71
4.15 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 LHCAO25-H และ LHCAO25-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	73
4.16 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของแคลเซียมออกไซด์และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	74
4.17 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของแคลเซียมออกไซด์ก่อนและหลังแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส .....	75

4.18 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ LHCAO25 และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส.....	76
4.19 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 หลังปรับสภาพและหลังแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส.....	77
4.20 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 LHCAO50 และ LHCAO75 หลังแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส.....	80
4.21 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO50 และ LHCAO75 หลังการปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	80
4.22 ผลได้ของไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลอง (จุดที่บ) และผลได้จากการทำนาย (จุดโปร่ง).....	81
4.23 ผลกระทบของอุณหภูมิแกซีฟิเคชันต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันของใบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO50.....	84
4.24 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO50 หลังแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส.....	84
4.25 ผลการวิเคราะห์ TGA ของ LHCAO25 หลังจากการผสมทางกายภาพ.....	87
4.26 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในหน่วยร้อยละโดยมวลต่อจำนวนรอบที่ทำการทดลองของการทดสอบประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของ LHCAO25 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	87
4.27 ผลการวิเคราะห์ TGA ของ LHCAO25 หลังจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	88
4.28 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 หลังปรับสภาพด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและหลังการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	88
4.29 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 หลังการคายซับจากการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์รอบที่ 1 และ 7 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	89





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การขยายตัวของประชากรโลกและการเติบโตทางเศรษฐกิจส่งผลให้เกิดความต้องการพลังงานที่สูงมากยิ่งขึ้น ในปี 2017 ปริมาณความต้องการพลังงานของโลก (Global energy demand) เพิ่มขึ้นมากถึงร้อยละ 2.1 เป็นผลมาจากความต้องการน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ และถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 1.4 [1] ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและบรรยากาศของโลก จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นเป็นอย่างมากในการพัฒนาและวิจัยแหล่งพลังงานทางเลือกเพื่อลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) โดยในปัจจุบันพลังงานทางเลือกได้รับความสนใจเป็นวงกว้างและมีการค้นคว้าวิจัยอย่างแพร่หลาย อาทิ พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ หรือพลังงานจากชีวมวล หนึ่งในพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจได้แก่พลังงานจากชีวมวล เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีผลผลิตทางการเกษตรหลายชนิดเหมาะต่อการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการแปรรูปเป็นพลังงาน อีกทั้งยังมีปริมาณมากเพียงพอ

การผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำจากชีวมวลเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจและใช้งานอย่างกว้างขวางภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีความยืดหยุ่นของสารตั้งต้นสูง กล่าวคือสามารถใช้กับสารตั้งต้นได้ทั้งสถานะของเหลวและของแข็งและสามารถใช้กับสารตั้งต้นได้หลากหลายชนิด อีกทั้งเชื้อเพลิงแก๊สที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรงหรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารมูลค่าเพิ่ม อาทิเช่น เอทานอล เมทานอลและผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีต่าง ๆ [2] แก๊สซิเคชันเป็นกระบวนการแปรสภาพเชิงเคมีความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงแก๊สในภาวะออกซิเจนจำกัด ร่วมกับการทำปฏิกิริยาร่วมกับสารร่วมแก๊สฟาย (Gasifying agent) อาทิเช่นออกซิเจน อากาศ และไอน้ำ ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจะมีองค์ประกอบของไฮโดรเจน (Hydrogen) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) และมีเทน (Methane) เป็นหลัก แต่ข้อจำกัดของกระบวนการแก๊สซิเคชันคือจะให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในปริมาณที่ไม่มากพอและได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือชาร์ (Char) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการในปริมาณที่สูง ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาลงในกระบวนการ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มเข้าไปในกระบวนการมีส่วนช่วยในการแตกตัวของทาร์และชาร์ เพื่อให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้นจากการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว และปฏิกิริยาแก๊สซิเคชันต่างๆ รวมถึงช่วยปรับปรุงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ให้มีคุณภาพหรือปริมาณของไฮโดรเจน

สูงมากยิ่งขึ้น [3] แต่การประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวยังให้ผลได้ของไฮโดรเจนไม่เพียงพอกับความต้องการ ดังนั้นจึงมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการเพิ่มตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปในกระบวนการ ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ถูกประยุกต์ใช้ในแกซิฟิเคชันเพื่อดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ เพื่อลดข้อจำกัดทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาชิฟต์ (Water-gas shift reaction, WGS) ส่งผลให้ผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น [4, 5] แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากทั้งในภาคการวิจัยและภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง ราคาถูก หาง่าย แต่มีข้อจำกัดกีดในเรื่องของการคายซับที่อุณหภูมิสูง และเสถียรภาพในการใช้ซ้ำต่ำ [6] ตัวดูดซับลิเทียมออกไซด์เกิดเป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับความสนใจและถูกวิจัยอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง ง่ายต่อการคายซับและนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง แต่ข้อเสียของตัวดูดซับลิเทียมออกไซด์คือมีพื้นที่ผิวต่ำและเกิดการจับกลุ่มก้อน (Agglomeration) ได้ง่าย [7] ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการพอกพูน (Dopping) ตัวดูดซับลงบนตัวรองรับ (Support) หรือทำการเจือ (Doping) ธาตุหรือสารประกอบบางตัวลงไปโครงสร้างของตัวดูดซับเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการดูดซับและเสถียรภาพของตัวดูดซับ

จากสาเหตุข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวดูดซับลิเทียมออกไซด์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (Calcination) ต่อโครงสร้างและลักษณะ (Characteristics) รวมถึงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยารวมถึงการทำงานร่วมกัน (Synergistic) ของ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  ต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย และศึกษาอุณหภูมิแกซิฟิเคชันที่เหมาะสมต่อการดำเนินการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ อีกทั้งยังศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากชีวมวลผ่านแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$
- 1.2.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างลิเทียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ อัตราส่วนระหว่างลิเทียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ และอุณหภูมิของกระบวนการที่มีต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์รวมถึงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต และศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  ต่อการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย และศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแกซีฟิเคชันต่อประสิทธิภาพการทำงานของแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยการดูดซับ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนจากชีวมวลผ่านแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ

### 1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับและตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.5.2 เตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ต้องใช้ในงานวิจัย
- 1.5.3 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวล ได้แก่ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)
- 1.5.4 เตรียมตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยา เตรียมตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตด้วยวิธีการโซลิด-สเตททรานส์ฟอร์เมชัน (Solid-state transformation) ใช้ซิลิกาฟูล์มลิเทียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นโดยซังซิลิกาฟูล์ม 1 กรัม ผสมกับสารตั้งต้นของลิเทียมให้มีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่อลิเทียมเท่ากับ 1:4.4 ผสมกับเอทานอล 10 มิลลิลิตร แล้วทำการบดสารด้วยโกร่งบดสารเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการเผา (Calcination) ที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศ ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Temperature ramp rate) เท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 7 ชั่วโมง เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  ด้วยวิธีการผสมเชิงกายภาพ โดยนำแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มาผสมกับลิเทียมอโทซิลิเกตให้มีอัตราส่วนโดยมวลร้อยละ 25 50 และ 75 แล้วทำการบดสารด้วยโกร่งบดสารเป็นเวลา 10 นาที

- 1.5.5 ทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งโดยใช้ตัวดูดซับ 0.5 กรัม แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และอาร์กอนเป็นแก๊สตัวพาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
- 1.5.6 ศึกษาการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้นโดยใช้ไบอ้อย 0.2 กรัมเป็นสารตั้งต้น ในขั้นแรกจะเป็นขั้นตอนการเกิดไพโรไลซิสของไบอ้อยเกิดเป็นสารระเหยและชาร์ หลังจากนั้นสารระเหยที่เกิดขึ้นจะถูกแก๊สตัวพาได้แก่อาร์กอน (Ar) พาเข้าสู่ชั้นที่ 2 ซึ่งเป็นชั้นที่เกิดแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยกำหนดให้อัตราการป้อนเข้าของน้ำ (Water injection rate) มีค่าเท่ากับ 0.1 กรัมต่อนาทีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัมรองรับอยู่ หลังจากผ่านชั้นที่ 2 ไอรระเหยจะถูกทำให้เย็นลงเพื่อกำจัดทาร์และน้ำที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์แก๊ส และผ่านซิลิกาเจลเพื่อลดความชื้นก่อนเก็บผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้โดยถูกเก็บแก๊ส และนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อคำนวณหาผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊ส
- 1.5.7 ศึกษาผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่
- อัตราส่วนลิเทียมออกโทซิลิเกตต่อแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 25 50 และ 75 โดยมวล
  - อัตราส่วนลิเทียมออกโทซิลิเกตต่อแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 25 50 และ 75 โดยมวล
  - อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส
- 1.5.8 ศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอิทธิพลต่อแกซิฟิเคชันสูงสุด โดยการวัดร้อยละโดยมวลที่เปลี่ยนไปเมื่อเกิดปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.5.9 วิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของตัวดูดซับก่อนและหลังการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังแกซิฟิเคชัน เพื่อศึกษาลักษณะดังต่อไปนี้
- พื้นที่ผิวและการกระจายขนาดของรูพรุน (Surface area and pore size distribution)
  - สัณฐาน (Morphology) ของตัวดูดซับ
  - สมบัติเชิงโครงสร้าง
- 1.5.10 วิเคราะห์ผล สรุปลผล และเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ วัสดุชีวภาพที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต ธรรมชาติ หรือกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับทางชีวภาพ อาทิ ผลผลิตจากพืช สัตว์ ขยะและวัสดุเหลือใช้จากชุมชนหรือจากภาคอุตสาหกรรม เป็นวัสดุที่มีความหลากหลายทางโครงสร้าง องค์ประกอบ และลักษณะทางกายภาพที่ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและชนิดของวัสดุ ชีวมวลจัดเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy resource) ชนิดหนึ่ง กล่าวคือสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิง แล้วเกิดการผลิตทดแทนขึ้นมาใหม่ได้ จุดเด่นของการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงคือเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) ออกสู่บรรยากาศ และเป็นพลังงานหมุนเวียนเพียงชนิดเดียวที่สามารถเปลี่ยนสารตั้งต้นให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตสารมูลค่าเพิ่มอื่นๆ ได้ อาทิ เมทานอล (Methanol) เอทานอล (Ethanol) หรือผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีต่างๆ [2] นอกจากนี้ยังมีความโดดเด่นในเรื่องของระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตแหล่งพลังงานทดแทน จะพบว่ามีระยะเวลาในการสร้างแหล่งพลังงานทดแทนที่น้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel)

##### 2.1.1. ประเภทของชีวมวล

การแบ่งประเภทของชีวมวลไม่มีเกณฑ์ที่ตายตัว อาจแบ่งตามลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางชีวภาพ หรือแบ่งตามแหล่งกำเนิดของชีวมวล หากใช้ลักษณะทางชีวภาพเป็นเกณฑ์สามารถแบ่งชีวมวลออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ดังนี้

- ชีวมวลประเภทไม้ (Woody biomass) คือชีวมวลที่มีเนื้อไม้ อาทิ ไม้ยืนต้น ไม้ดอก พืชเมล็ดัด เปลือย เช่น สน ปาล์ม น้ำมัน มะพร้าว เป็นต้น
- ชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้ (Non-woody biomass) คือชีวมวลนอกเหนือจากชีวมวลประเภทไม้ อาทิ
  - ไม้ล้มลุก เช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย ทานตะวัน หญ้า เป็นต้น
  - พืชน้ำ เช่น สาหร่ายชนิดต่างๆ จอกเหวน ผักตบชวา เป็นต้น
  - ผลิตภัณฑ์และของเสียจากสัตว์ เช่น มูลสัตว์ ไขมันสัตว์ เป็นต้น
  - วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและจากอุตสาหกรรม เช่น ขี้เลื่อย เปลือกไม้ ชานอ้อย กากน้ำตาล ชังข้าวโพด กากตะกอนจากโรงงานผลิตกระดาษ เป็นต้น
  - ของเสียจากชุมชน เช่น น้ำมันพืชใช้แล้ว เศษอาหาร เศษขยะชุมชน เป็นต้น

### 2.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของชีวมวล

ชีวมวลประกอบไปด้วยธาตุหลัก ได้แก่ ไฮโดรเจน (Hydrogen) ออกซิเจน (Oxygen) คาร์บอน (Carbon) และไนโตรเจน (Nitrogen) อาจจะมีซัลเฟอร์ (Sulfur) และธาตุอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย จากองค์ประกอบของธาตุดังกล่าวทำให้ชีวมวลมีคุณสมบัติในการใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เมื่อพิจารณาถึงส่วนประกอบทางเคมีของชีวมวลจะประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) แป้ง (Starch) โปรตีน (Protein) สารอินทรีย์ (Organic compounds) และอนินทรีย์ (Inorganic compounds) ตัวอื่นๆ ชีวมวลประเภทไม้จะมีองค์ประกอบของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน รวมเรียกว่าลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic material) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันออกไป และวัสดุชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้จะมีองค์ประกอบของแป้ง โปรตีน และไขมันเป็นหลัก ยกตัวอย่างองค์ประกอบของชีวมวลแต่ละประเภทได้ดังตารางที่ 2.1

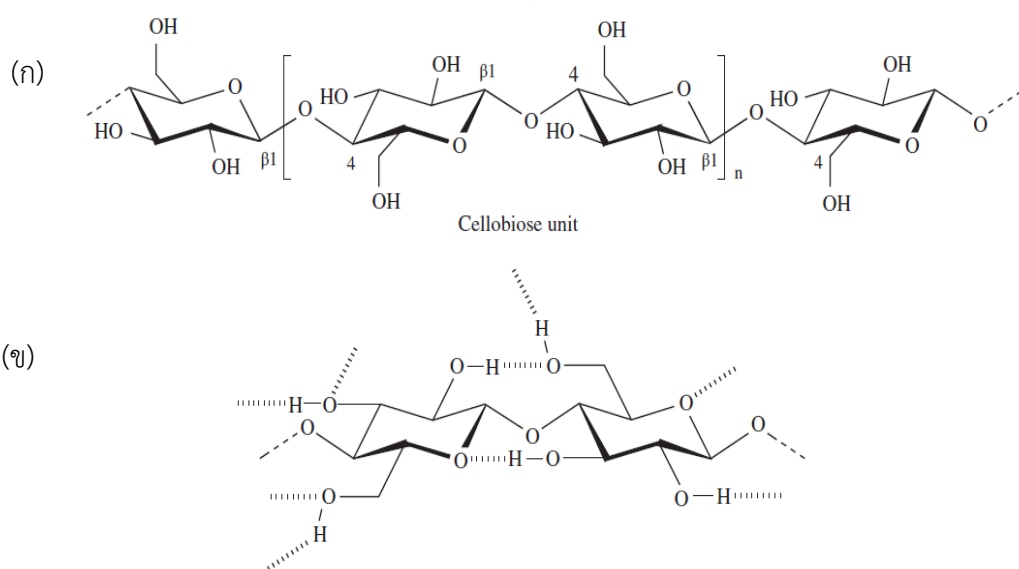
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวลประเภทต่างๆ [8]

ชนิด	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ชีวมวลประเภทไม้ (Woody biomass)			
ไม้เนื้อแข็ง (เฉลี่ย)	45.2	31.3	21.7
ไม้เนื้ออ่อน (เฉลี่ย)	45.8	24.4	28
สน	45.6	24	26.8
เปลือกไม้	22	47	31
ชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้ (Non-woody biomass)			
อ้อย	41.3	22.6	18.3
เปลือกมะพร้าว	35.3	25.1	28.7
ขานอ้อย	33-44	27-32	19-24

จะเห็นได้ว่า โครงสร้างของชีวมวลแต่ละชนิดมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากปัจจัยหลายๆ อย่าง อาทิ ชนิดหรือประเภทของชีวมวล ชิ้นส่วนของชีวมวลที่นำมาใช้ รวมถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของชีวมวล อาทิ ปริมาณแสงแดด สภาพอากาศ ชนิดและคุณภาพของดิน รวมไปถึงอายุของชีวมวลและเทคนิคในการเก็บเกี่ยว การจัดเก็บ การขนส่งของชี

มวลด้วย องค์ประกอบที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อการนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิง รวมถึงคุณสมบัติ และคุณลักษณะของเชื้อเพลิงที่สังเคราะห์ได้

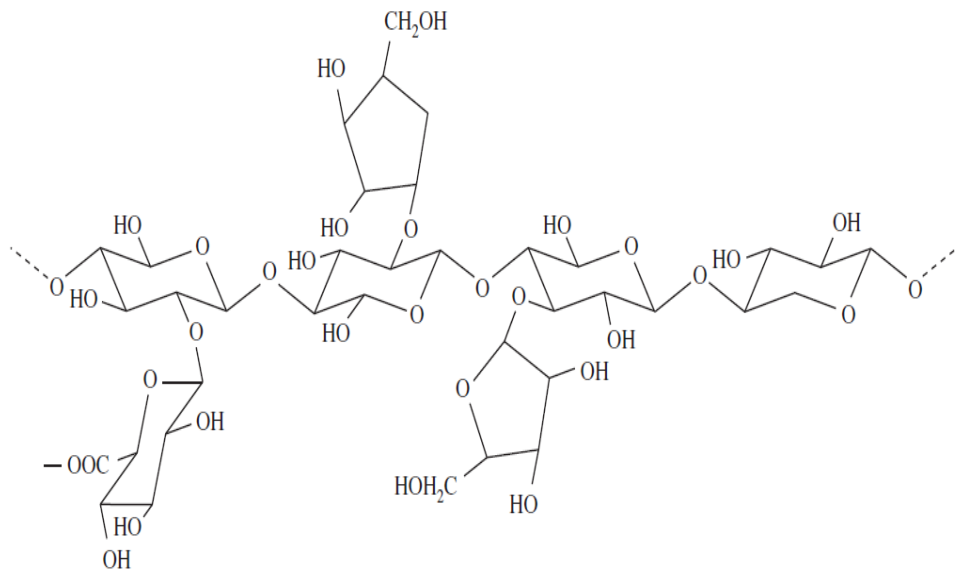
โครงสร้างของเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ของน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ของพืช ชีวมวลส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสประมาณร้อยละ 40 ถึง 50 โดยน้ำหนักฐานแห้ง โครงสร้างของเซลลูโลสเกิดจากกลูโคสมากกว่า 14,000 หน่วยเชื่อมกันด้วยพันธะเบต้ากลูโคซิดิก - 1,4 แสดงดังรูปที่ 2.1(ก) หมู่ไฮดรอกไซด์ภายในโครงสร้างสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ทั้งภายในและภายนอกโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.1(ข) ส่งผลให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงและย่อยสลายได้ยาก



รูปที่ 2.1 (ก) โครงสร้างของเซลลูโลส (ข) พันธะไฮโดรเจนภายในและภายนอกโครงสร้างเซลลูโลส [9]

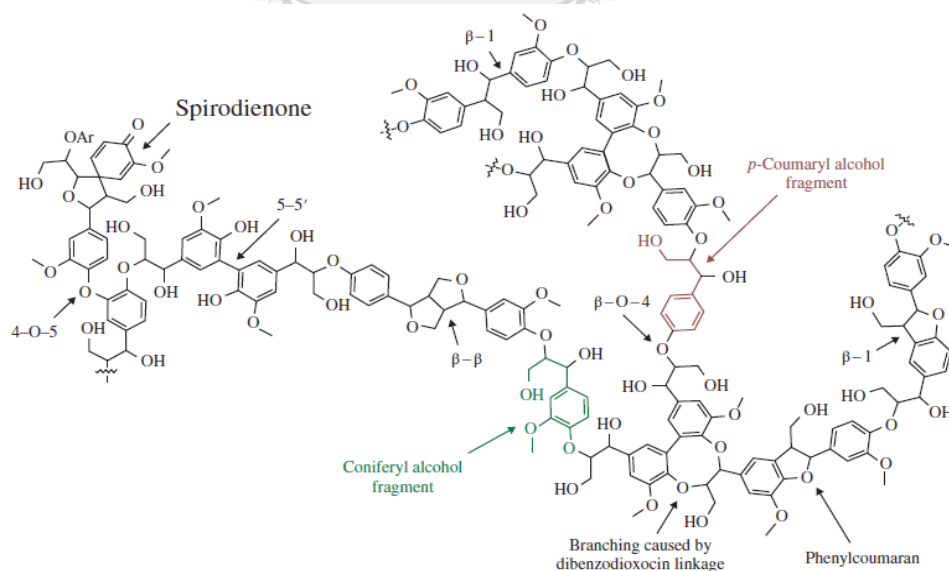
เฮมิเซลลูโลสจัดเป็นเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharides) ที่ประกอบด้วย น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดคาร์บอน 5 อะตอมและคาร์บอน 6 อะตอม เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวม เรียกว่าโฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีปริมาณรองลงมาจากเซลลูโลส ชีวมวลส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสประมาณ ร้อยละ 25 ถึง 35 โดยน้ำหนักฐานแห้ง โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยมอโนเมอร์ (Monomers) ประมาณ 50-200 หน่วยโดยมีการสร้างพันธะที่ต่างออกไปจากเซลลูโลส ทำให้เฮมิเซลลูโลสมีความแข็งแรงน้อยกว่าเซลลูโลส และสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่า ตัวอย่างโครงสร้างของ เฮมิเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.2





รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสที่เกิดจากน้ำตาลชนิดต่างๆ [9]

ลิกนินเป็นอสัณฐานพอลิเมอร์ (Amorphous polymers) ที่มีความซับซ้อนของโครงสร้างสูง หน้าทีของลิกนินคือเป็นตัวประสานโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์และสร้างความแข็งแรงให้กับเซลล์ วัสดุชีวมวลส่วนใหญ่มีส่วนประกอบของลิกนินประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ลิกนินมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงและย่อยสลายได้ยากและมีค่าความร้อน (Heating value) สูง ตัวอย่างโครงสร้างของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.3

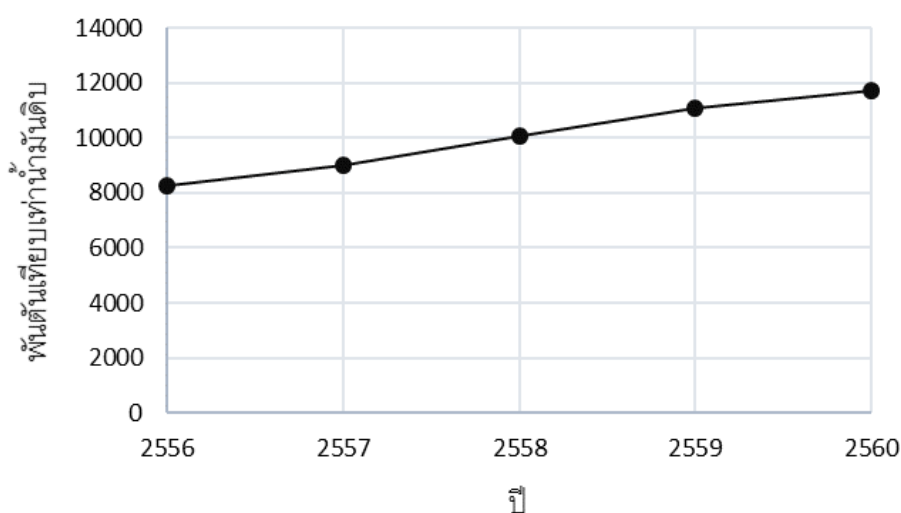


รูปที่ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างของลิกนิน [9]

### 2.1.3 ศักยภาพทางด้านพลังงานของชีวมวล

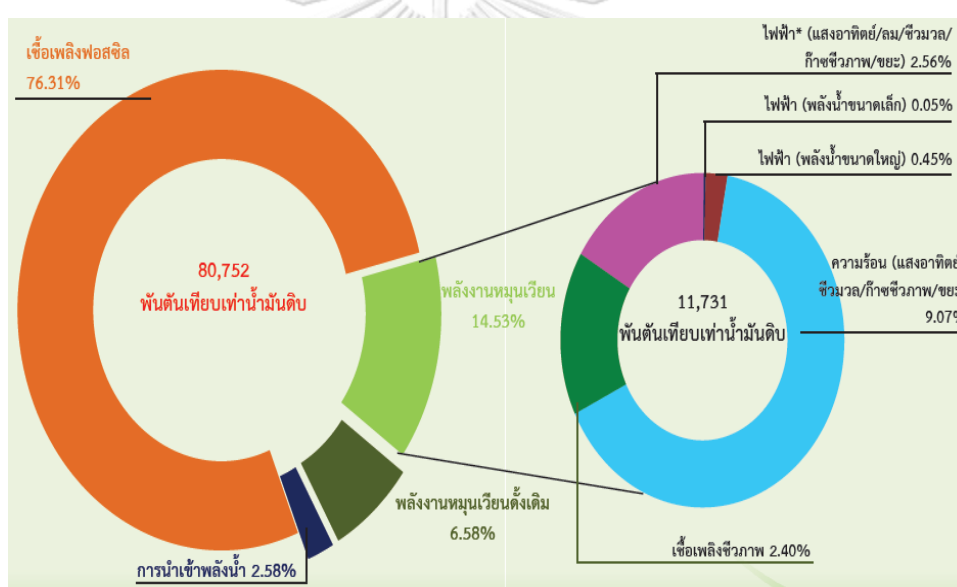
จากรายงานสถานะการณ์พลังงานทดแทนประจำปี 2560 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [10] พบว่าการใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศมีค่าลดลง และมีการประยุกต์ใช้งานรวมถึงการพัฒนาเชื้อเพลิงจากพลังงานทางเลือกมากยิ่งขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายสนับสนุนจากภาครัฐตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015) ซึ่งเป็นแผนพัฒนาที่มุ่งเน้นไปที่การส่งเสริมการผลิตพลังงานจากวัสดุพลังงานทดแทนได้อย่างเต็มศักยภาพ รวมถึงการกระจายการใช้พลังงานทดแทนไปทุกภาคส่วนของภูมิภาค พลังงานทดแทนที่กล่าวถึงในที่นี้ประกอบไปด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ ชีวมวล แก๊สชีวภาพ ชยะ และเชื้อเพลิงชีวภาพ โดยจะถูกใช้งานในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน และพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพ

รูปที่ 2.4 แสดงสถิติการใช้พลังงานทดแทนปี 2556 ถึง 2560 จะเห็นแนวโน้มที่ชัดเจนว่า การใช้พลังงานจากพลังงานทดแทนมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2560 มีการใช้พลังงานทดแทนทั้งสิ้น 11,731 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มสูงขึ้นจากปี 2559 ร้อยละ 6.2 และ การใช้พลังงานทดแทนคิดเป็นร้อยละ 14.53 จากพลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด ซึ่งจากการใช้งานที่เพิ่มขึ้นนี้ ส่งผลให้มีการนำเข้าพลังงานที่ลดลงเป็นมูลค่ากว่า 155,787.68 ล้านบาท อีกทั้งยังลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 35.98 ล้านตัน



รูปที่ 2.4 สถิติการใช้พลังงานทดแทนปี 2556 ถึง 2560 [10]

รูปที่ 2.5 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนขั้นสุดท้ายปี 2560 จะเห็นได้ว่าแหล่งพลังงานหลักที่ถูกใช้ยังคงเป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งมีค่าเท่ากับ 61,621.85 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 76.31 ของพลังงานที่ถูกใช้ทั้งหมด โดยพลังงานหมุนเวียนที่ถูกใช้รวมร้อยละ 21.11 ประกอบไปด้วยพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิมร้อยละ 6.58 ได้แก่ ฟืน ถ่าน แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้เป็นแหล่งความร้อนในครัวเรือน และพลังงานหมุนเวียนร้อยละ 14.53 หรือ 11,731 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ประกอบไปด้วยพลังงานจากไฟฟ้าร้อยละ 3.06 พลังงานจากความร้อนร้อยละ 9.07 และพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพร้อยละ 2.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า พลังงานหมุนเวียนที่ถูกใช้ในประเทศไทยจะถูกใช้ในรูปของพลังงานความร้อนมากที่สุดกว่าร้อยละ 62.4 รองลงมาจะเป็นพลังงานในรูปของเชื้อเพลิงชีวภาพและไฟฟ้าในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.5 สัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนขั้นสุดท้ายปี 2560 [10]

ตารางที่ 2.2 สถิติการใช้พลังงานทดแทนด้านต่างๆ ตั้งแต่ปี 2556 ถึง 2560 [10]

การใช้พลังงานทดแทน	ปริมาณ (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)					อัตราการ เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
	2556	2557	2558	2559	2560	2559- 2560
1. ไฟฟ้า <sup>1/2/</sup> (แสงอาทิตย์ ลม พลังน้ำขนาดเล็ก พลังน้ำขนาดใหญ่ ชีวมวล ชยะ และก๊าซชีวภาพ)	1,341	1,467	1,556	2,122	2,473	16.5
2. ความร้อน (แสงอาทิตย์ ชีวมวล ชยะ และก๊าซชีวภาพ)	5,279	5,775	6,579	7,182	7,322	1.9
3. เชื้อเพลิงชีวภาพ	1,612	1,783	1,942	1,747	1,936	10.8
- เอทานอล	707	874	879	684 <sup>3/</sup>	733	7.2
- ไบโอดีเซล	905	909	1,063	1,063	1,203	13.2
รวม	8,232	9,025	10,077	11,051	11,731	6.2

1/ รวมการผลิตไฟฟ้าจากระบบ

2/ เริ่มรวมพลังน้ำขนาดใหญ่ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2558

3/ มีการเปลี่ยนวิธีคำนวณค่าความร้อนจากน้ำมันเบนซินเป็นเอทานอล

ตารางที่ 2.2 แสดงสถิติการใช้พลังงานทดแทนด้านต่างๆ ตั้งแต่ปี 2556 ถึง 2560 จะเห็นได้ว่าปริมาณพลังงานที่ได้จากพลังงานไฟฟ้ามีอัตราการเติบโตสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานทดแทนชนิดอื่น มีค่าเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 16.5 เมื่อเปรียบเทียบกับปี 2559 และจากการสำรวจพบว่า กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมีปริมาณรวม 10,238 เมกะวัตต์ โดยเป็นผลจากการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 30.8 พลังงานความร้อนมีอัตราการเติบโตของพลังงานที่ต่ำที่สุด มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.9 เมื่อเปรียบเทียบกับปี 2559 โดยความร้อนที่ผลิตได้ทั้งหมด 7,322 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบนี้มีเป็นผลมาจากชีวมวลสูงถึงร้อยละ 90.3 และเมื่อพิจารณาถึงเงินลงทุนด้านพลังงานทดแทนจะพบว่าในปีพ.ศ.2560 มีเงินลงทุนจากทั้งภาครัฐและเอกชนคิดเป็นมูลค่า 13,614.7 ล้านบาท สืบเนื่องมาจากการผลักดันของรัฐบาลตามนโยบายสนับสนุนจากภาครัฐตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก โดยมีเงินลงทุนในชีวมวลสูงถึง 10,966.2 ล้านบาทหรือคิดเป็นร้อยละ 80.6 จากเงินลงทุนทั้งหมด ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีแนวโน้มการพัฒนาที่น่าสนใจ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความสำคัญของพลังงานจากชีวมวลต่อโครงสร้างพลังงานในอนาคต

จากข้อมูลศักยภาพเชิงพลังงานจากชีวมวลของแข็งปี 2560 พบว่าประเทศไทยมีกำลังการผลิตชีวมวลแข็งสูงถึง 38,367.86 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยมาจากพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นหลัก อาทิ อ้อย ข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ยางพารา สับปะรด พื้นที่การเพาะปลูกกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะให้ผลผลิตชีวมวลสูงสุดเท่ากับ 12,842.23 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบหรือคิดเป็นร้อยละ 33.47 ของผลผลิตทั้งหมด เมื่อพิจารณาถึงชนิดของชีวมวลจะเห็นได้ว่าอ้อยและข้าวเป็นชีวมวลที่มีปริมาณมากที่สุด กากอ้อย ยอด

และใบอ้อยมีผลผลิต 12,273.49 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบหรือคิดเป็นร้อยละ 32 ขณะที่แกลบ และ พางข้าวมีผลผลิต 14295.99 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบหรือคิดเป็นร้อยละ 37.26 นอกจากนี้ร้อยละ 30.74 จะเป็นชีวมวลจากพืชชนิดอื่น อาทิ ลำต้น ใบ และชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ทะลายปาล์ม น้ำมัน ตลอดจนสัตว์ประรด เป็นต้น

#### 2.1.4 ศักยภาพทางด้านพลังงานและปริมาณของอ้อยในประเทศไทย

อ้อยจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพทางด้านพลังงานสูงเมื่อเทียบกับชีวมวลประเภทอื่นๆ เนื่องจากของเสียที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปอ้อยเป็นน้ำตาลสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานได้ทั้งหมด พลังงานที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปชีวมวลจากอ้อย 1 ตัน เทียบเท่ากับพลังงานที่ได้จากน้ำมันดิบ 1 บาร์เรล ในกระบวนการผลิตน้ำตาล 1 ตันจะใช้พลังงานทั้งหมดประมาณ 25 ถึง 30 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ใช้ไอน้ำประมาณ 0.4 ตัน ผลผลิตน้ำตาลที่ได้จะประกอบด้วยน้ำตาลและกากอ้อยหรือชานอ้อยประมาณ 290 กิโลกรัม ซึ่งเทียบได้กับพลังงานไฟฟ้าประมาณ 100 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง [11]

ตารางที่ 2.3 พื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตอ้อยปีการผลิต 2559/60 [12]

ภูมิภาค	พื้นที่ เพาะปลูก (ไร่)	ปริมาณอ้อย (ตัน)	พื้นที่อ้อยส่ง เข้าโรงงาน (ไร่)	ปริมาณอ้อย ส่งเข้าหีบ (ตัน)	ผลผลิตเฉลี่ย (ตัน/ไร่)
เหนือ	2,571,431	24,687,554	2,541,017	24,394,770	9.6
กลาง	3,061,101	29,114,647	2,641,673	25,124,407	9.51
ตะวันออกเฉียงเหนือ	4,750,671	44,221,977	4,137,059	38,510,307	9.31
ตะวันออก	605,286	5,509,259	544,920	4,959,608	9.1
รวม	10,988,489	103,533,437	9,864,668	92,989,092	9.43

จากการดำเนินการสำรวจพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในปี 2559/60 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลของสำนักนโยบายอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย วิเคราะห์จากภาพถ่ายดาวเทียมและการสำรวจภาคสนาม พบว่าพื้นที่เพาะปลูกอ้อยทั้งหมด 10,988,489 ไร่ โดยเป็นพื้นที่เพาะปลูกของอ้อยส่งโรงงาน 9,864,042 ไร่ สามารถแบ่งออกเป็นรายภูมิภาคได้ดังตารางที่ 2.3 เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลสถิติพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตอ้อยกับปีการผลิต 2558/59 จะพบว่าพื้นที่การเพาะปลูกลดลง 24,350 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 0.22 เนื่องจากได้รับผลกระทบจากวิกฤตภัยแล้งหนักในปี 2559 จากปรากฏการณ์เอลนีโญ

### 2.1.5 สมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวล

ด้วยสมบัติและลักษณะบางประการของชีวมวล อาทิ ค่าความหนาแน่นบัลก์ต่ำ (Bulk density) ค่าความชื้นสูง ค่าความร้อนต่ำ ส่งผลให้การนำชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงไม่ใช่วิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ปัจจุบันจึงนิยมนำชีวมวลมาแปรสภาพให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทั้งเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส เพื่อให้ได้ค่าความร้อนที่สูงมากยิ่งขึ้นและเหมาะสมแก่การประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ชีวมวลแต่ละประเภทจะมีสมบัติทางเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลายๆปัจจัย สมบัติที่สำคัญในการนำมาพิจารณาในการแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิงได้แก่ ค่าความชื้น ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่นบัลก์ ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และสัดส่วนธาตุองค์ประกอบ [13]

2.1.5.1 ค่าความชื้น (Moisture content) คือค่าที่แสดงถึงปริมาณน้ำในวัสดุชีวมวล โดยทั่วไปวัสดุชีวมวลจะมีความชื้นอยู่ในปริมาณสูง ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานในการระเหยน้ำออกจากชีวมวล ความชื้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ความชื้นภายในหรือความชื้นสมดุล คือค่าความชื้นที่สมดุลกับความชื้นในอากาศ ความชื้นที่ผิวหรือความชื้นภายนอก คือค่าความชื้นที่เกินจากสมดุล ส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผิวและรูพรุนของวัสดุชีวมวล การบอกปริมาณความชื้นในชีวมวลนิยมแสดงในรูปของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณของสารทั้งหมด นิยมแสดงในรูปของฐานการคิดแบบเปียก (Wet basis) และฐานการคิดแบบแห้ง (Dry basis) โดยฐานการคิดแบบเปียกคือปริมาณน้ำต่อน้ำหนักของชีวมวลทั้งหมดโดยที่ยังไม่หักความชื้นออก ซึ่งความชื้นฐานการคิดแบบเปียกและแบบแห้ง มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.1

$$M_d = \frac{\left(\frac{M_w}{100}\right)}{1 - \left(\frac{M_w}{100}\right)} \times 100 \quad (2.1)$$

โดย  $M_w$  คือ ร้อยละความชื้นแบบฐานเปียก  
 $M_d$  คือ ร้อยละความชื้นแบบฐานแห้ง

2.1.5.2 ค่าความร้อน (Heating value) คือปริมาณความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (Complete combustion) ค่าความร้อนนิยมแสดงในรูปของค่าความร้อนสูง (High heating value: HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Low heating Value: LHV) โดยค่าความร้อนสูงหรือค่าความร้อนทั้งหมด (Gross heating value: GHV) คือค่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเผาไหม้เมื่อพิจารณาสถานะของน้ำในผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวที่อุณหภูมิอ้างอิง 25 องศา

เซลเซียส หมายความว่ารวมค่าความร้อนของการระเหยเป็นไอของน้ำ (Heat of vaporization) เข้าไปด้วย ซึ่งค่าความร้อนดังกล่าวสามารถวัดได้จากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter) หรือสามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบธาตุในชีวมวล โดยทั่วไปนิยมใช้สมการของดูลอง (Dulong equation) ในการคำนวณดังสมการที่ 2.2

$$\text{HHV} = 336 \times X_C + 1,418 \times X_H - 153 \times X_O - 0.72 \times X_O^2 + 94.1 \times X_S \quad (2.2)$$

โดย	$X_C$	คือ ร้อยละองค์ประกอบของคาร์บอน (ร้อยละโดยมวลฐานแห้ง)
	$X_H$	คือ ร้อยละองค์ประกอบของไฮโดรเจน (ร้อยละโดยมวลฐานแห้ง)
	$X_O$	คือ ร้อยละองค์ประกอบของออกซิเจน (ร้อยละโดยมวลฐานแห้ง)
	$X_S$	คือ ร้อยละองค์ประกอบของซัลเฟอร์ (ร้อยละโดยมวลฐานแห้ง)

ส่วนค่าความร้อนต่ำหรือค่าความร้อนสุทธิ (Net heating value: NHV) คือค่าความร้อนจากปฏิกิริยาเผาไหม้สมบูรณ์ที่พิจารณาสถานะของน้ำในผลิตภัณฑ์เป็นสถานะแก๊ส ในทางปฏิบัติการวัดค่าความร้อนต่ำเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก จึงนิยมคำนวณค่าความร้อนต่ำจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและสูงดังสมการที่ 2.3

$$\text{LHV} = \text{HHV} \times \left(\frac{1-W}{100}\right) - 2,447 \times \left(\frac{W}{100}\right) - 2,447 \times \left(\frac{H}{100}\right) \times 9.01 \times \left(\frac{1-W}{100}\right) \quad (2.3)$$

โดย	$W$	คือ ร้อยละความชื้น (ร้อยละโดยมวลฐานเปียก)
	$H$	คือ ร้อยละองค์ประกอบไฮโดรเจน (ร้อยละโดยมวลฐานแห้ง)

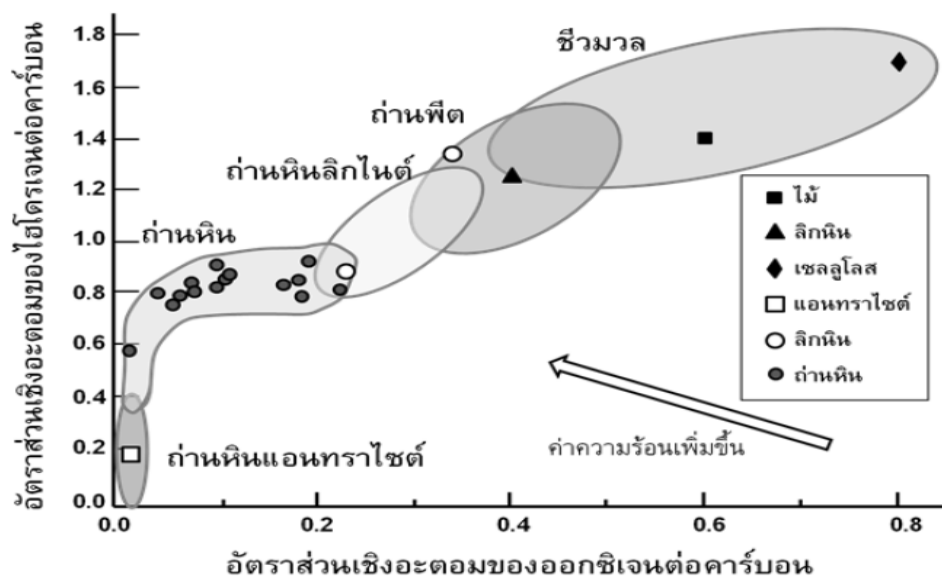
2.1.5.3 ค่าความหนาแน่นบัลก์คือ ปริมาณน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร เนื่องจากชีวมวลแต่ละชนิดจะมีรูพรุนและมีช่องว่างระหว่างอนุภาคหรือชิ้นวัสดุซึ่งเป็นที่อยู่ของอากาศไม่เท่ากัน ค่าความหนาแน่นบัลก์จึงขึ้นอยู่กับการจัดเก็บหรือลักษณะการอัดตัวของชีวมวล แตกต่างจากความหนาแน่นจริงของชีวมวลซึ่งคำนวณจากน้ำหนักจริงต่อปริมาตรจริงไม่รวมปริมาตรของอากาศ ความหนาแน่นบัลก์คำนวณได้จากน้ำหนักของชีวมวลทั้งหมดหารด้วยปริมาตรที่ชีวมวลครอบครองอยู่

2.1.5.4 ปริมาณเถ้า (Ash content) คือ ปริมาณสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในชีวมวล อาทิซิลิกา (Silica) อะลูมินา (Aluminium oxide) แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) เป็นต้น โดยทั่วไปเถ้าจะอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเมื่อผ่านกระบวนการแปรสภาพต่างๆ ซึ่งปริมาณเถ้าและองค์ประกอบของเถ้าเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาเลือกกระบวนการที่เหมาะสมกับชีวมวลแต่ละชนิด ชีวมวลที่มีองค์ประกอบต่างกันจะก่อให้เกิดเถ้าที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป จุดหลอมเหลวของเถ้าเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการดำเนินการที่อุณหภูมิสูงเพราะเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตตามมา อาทิ การอุดตันของท่อและเครื่องปฏิกรณ์ การเกิดสแลก (Slag) ซึ่งเป็นผลเสียต่อการถ่ายโอนความร้อนและการดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น

2.1.5.5 ปริมาณสารระเหย (Volatiles content) คือปริมาณไอระเหยหรือแก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 400 – 500 องศาเซลเซียส สารระเหยที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารระเหยที่ควบแน่นได้ (Condensable volatiles) และสารระเหยที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-condensable volatiles) ปริมาณสารระเหยที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ปริมาณความร้อนและอัตราการให้ความร้อนขณะเกิดปฏิกิริยา

2.1.5.6 สัดส่วนของธาตุองค์ประกอบ (Elemental composition) โดยทั่วไปชีวมวลจะประกอบด้วย คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์เป็นหลัก และมีองค์ประกอบของธาตุอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย นิยมแสดงสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบในรูปของร้อยละโดยน้ำหนักที่ไม่รวมปริมาณเถ้าและความชื้น ชีวมวลแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ที่แตกต่างกัน ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนทั้งสองแสดงดังกราฟของ Van Krevelen แสดงดังรูปที่ 2.6 ยิ่งปริมาณ H/C และ O/C มีค่าน้อย ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าของอัตราส่วนดังกล่าวจะแปรผันตรงกับอายุทางธรณีวิทยาของเชื้อเพลิง





รูปที่ 2.6 กราฟของ Van Krevelen [13]

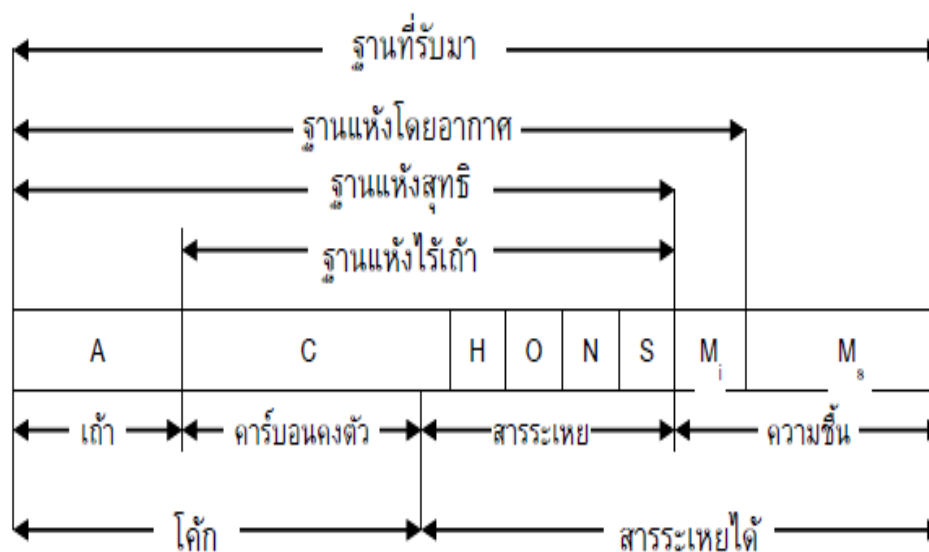
### 2.1.6 ฐานข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

การแสดงข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้นสามารถแสดงได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน โดยทั่วไปรูปแบบของฐานข้อมูลจะแสดงได้ 4 รูปแบบ [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.7

2.1.6.1 ฐานข้อมูลที่รับมา (As received basis) คือการแสดงข้อมูลองค์ประกอบตามสภาพของชีวมวลที่ได้รับมาโดยยังไม่ผ่านการทำให้แห้ง ดังนั้นจึงเป็นฐานที่แสดงองค์ประกอบทุกอย่างที่อยู่ในชีวมวล และง่ายต่อการแปลงเป็นฐานข้อมูลชนิดอื่น

2.1.6.2 ฐานแห้ง (Dry basis) คือการแสดงข้อมูลองค์ประกอบของชีวมวลหลังจากกำจัดความชื้นออกจากชีวมวล ฐานแห้งสามารถรายงานได้ 2 วิธีได้แก่ ฐานแห้งโดยอากาศ (Air-dry basis) และฐานแห้งสุทธิ (Total-dry basis) โดยฐานแห้งโดยอากาศสามารถคำนวณได้จากการที่ชีวมวลถูกปล่อยให้แห้งในอากาศ ทำให้ความชื้นที่ผิว (Surface moisture:  $M_s$ ) หหมดไปแต่ความชื้นภายใน (Inherent moisture:  $M_i$ ) ยังคงอยู่ ฐานแห้งสุทธิต่างคำนวณได้จากการที่ความชื้นถูกกำจัดออกจากชีวมวลจนหมด

2.1.6.3 ฐานแห้งไร้เถ้า (Dry and ash-free basis) คือการแสดงข้อมูลองค์ประกอบที่ไม่นำความชื้นและปริมาณเถ้ามาคำนวณ



รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบฐานข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิง [13]

## 2.2 กระบวนการแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงาน

จากที่กล่าวมาข้างต้น ด้วยสมบัติและลักษณะบางประการของชีวมวลทำให้การนำชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงไม่ใช่วิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ปัจจุบันจึงนิยมนำชีวมวลมาแปรสภาพให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทั้งเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส เพื่อให้ได้ค่าความร้อนที่สูงมากยิ่งขึ้นและเหมาะแก่การประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป โดยชีวมวลที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพแล้วสามารถนำไปผลิตเป็นพลังงานได้ จากรายงานสถานการณ์พลังงานทดแทนประจำปี 2560 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า โดยส่วนใหญ่ของชีวมวลจะถูกใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนผ่านเทคโนโลยีการแปรรูปพลังงาน (Energy conversion) ต่างๆ อาทิ การเผาไหม้ (Combustion) กังหันแก๊ส (Gas turbine) กังหันไอน้ำ (Steam turbine) หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electric generator) เป็นต้น กระบวนการในการแปรสภาพชีวมวลประกอบด้วย 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ การแปรสภาพทางกายภาพ (Physical conversion) การแปรสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) และการแปรสภาพทางชีวภาพ (Biological conversion) [13, 14]

## 2.2.1 การแปรสภาพทางกายภาพ

การแปรสภาพทางกายภาพเป็นการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของชีวมวลให้เหมาะสมต่อการใช้งานในการแปรสภาพในขั้นตอนต่อไป ประกอบด้วย การลดความชื้น การลดขนาด และการเพิ่มความหนาแน่นบด

### 2.2.1.1 การลดความชื้น

น้ำหรือความชื้นที่อยู่ภายในชีวมวลเป็นอุปสรรคอย่างมากในการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากน้ำเป็นสารประกอบที่ไม่ให้พลังงานเมื่อถูกเผาไหม้ อีกทั้งความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกเป็นพลังงานที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการลดความชื้นจัดเป็นการปรับปรุงสภาพขั้นต้น (Pretreatment process) อย่างหนึ่ง การกำจัดน้ำออกจากชีวมวลสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การแยกน้ำ (Dewatering) และการทำแห้ง (Drying)

การแยกน้ำเป็นกระบวนการที่แยกน้ำออกจากชีวมวลในรูปของของเหลว เหมาะกับการใช้งานกับชีวมวลที่มีปริมาณน้ำหรือความชื้นสูง อาทิ สาหร่ายหรือพืชน้ำ น้ำเสีย ขยะชุมชน เป็นต้น หลักการที่ใช้ในการแยกได้แก่การกรอง การตกตะกอน หรือแยกได้โดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น อาทิ การปั่นเหวี่ยง (Centrifuges) ไฮโดรไซклонแยกน้ำ (Hydro cyclones) เป็นต้น

การทำแห้งเป็นกระบวนการที่แยกน้ำออกจากชีวมวลในรูปของแก๊สหรือน้ำโดยอาศัยความร้อน จึงเป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับชีวมวลที่มีความชื้นต่ำหรือชีวมวลที่ผ่านกระบวนการแยกน้ำมาแล้วเพื่อลดพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออก ประกอบด้วยการทำแห้งด้วยอากาศ (Air drying) และการทำแห้งด้วยความร้อน (Thermal drying) การทำแห้งด้วยอากาศอาศัยอากาศความชื้นต่ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสเป็นตัวพาความชื้นออกจากชีวมวล เป็นกระบวนการที่ใช้ลดความชื้นได้เพียงบางส่วนเท่านั้นเนื่องจากพลังงานต่ำ ต่างจากการทำแห้งด้วยความร้อนที่ จะดำเนินการที่อุณหภูมิมากกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถกำจัดความชื้นออกจากชีวมวลได้ทั้งหมด แต่พลังงานรวมถึงต้นทุนการดำเนินการสูงกว่าการทำแห้งด้วยอากาศ จึงเหมาะกับชีวมวลที่มีความชื้นต่ำมากหรือชีวมวลที่ผ่านการทำแห้งด้วยอากาศมาแล้ว

### 2.2.1.2 การลดขนาด

ขนาดของชีวมวลมีความสำคัญอย่างมากต่อการแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงาน เนื่องจากขนาดที่แตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนมวลและความร้อน รวมถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ โดยทั่วไปแล้วการลดขนาดจะอาศัยหลักการของการบีบอัด (Compression) การกระทบ (Impact) และการตัด (Cutting) เพื่อให้วัสดุมีขนาดเล็กลง ขนาดของอนุภาคนิยมบอกในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter) เนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่ของชีวมวลมักไม่เป็นทรงกลม

### 2.2.1.3 การเพิ่มความหนาแน่นบัลก์

ความหนาแน่นบัลก์มีผลต่อการดำเนินการคำนวณการ ค่าใช้จ่าย รวมถึงประสิทธิภาพใช้เป็นเชื้อเพลิง กล่าวคือเมื่อชีวมวลมีความหนาแน่นบัลก์สูงขึ้น จะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ประหยัดพื้นที่การจัดเก็บ รวมถึงง่ายต่อการดำเนินการมากยิ่งขึ้น และเมื่อความหนาแน่นบัลก์สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric calorific value) เพิ่มขึ้น ใช้หลักการของการบีบอัดเป็นหลัก ซึ่งแบ่งได้เป็นการบีบอัดด้วยความดันสูง การบีบอัดด้วยความร้อน และการบีบอัดด้วยความดันต่ำโดยใช้ตัวประสาน (binder) โดยทั่วไปชีวมวลหลังผ่านกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นบัลก์จะอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์เม็ด (pellets) หรือผลิตภัณฑ์แท่ง (Briquettes)

## 2.2.2 การแปรสภาพทางชีวภาพ

การแปรสภาพทางชีวภาพคือการเปลี่ยนชีวมวลให้กลายเป็นพลังงานโดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับเอนไซม์ (Enzyme) หรือจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ข้อดีของกระบวนการนี้คือมีค่าใช้จ่ายต่ำเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ดำเนินการที่ภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิที่ต่ำ ความร้อนจากสิ่งแวดล้อมน้อย อีกทั้งยังดำเนินการง่าย ขั้นตอนน้อย จึงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก แต่ข้อเสียของกระบวนการดังกล่าวคือต้องใช้พื้นที่ในการดำเนินการสูง อัตราการสังเคราะห์พลังงานต่ำ เวลาในการดำเนินการสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการแปรสภาพทางเคมี ความร้อน อีกทั้งยังอาจเกิดปัญหาด้านการทำงานของเอนไซม์และจุลินทรีย์ได้ การแปรสภาพทางชีวภาพที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันได้แก่ การผลิตมีเทนชีวภาพ (Biomethanation) และการหมักเอทานอล (Ethanol fermentation)

### 2.2.3 การแปรสภาพเชิงเคมีความร้อน

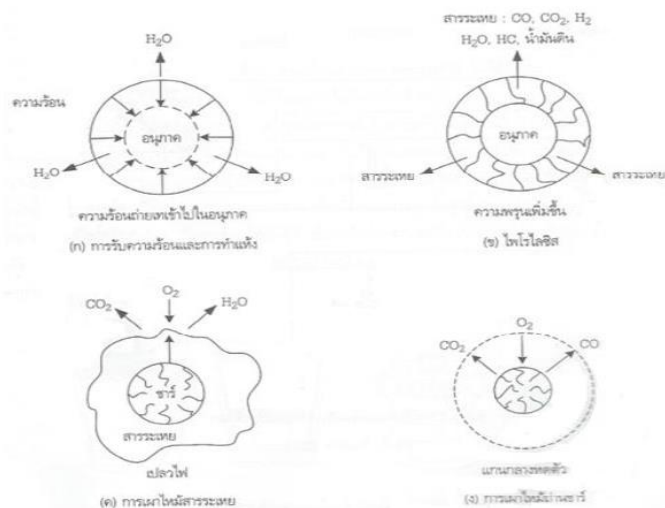
การแปรสภาพเชิงเคมีความร้อนคือกระบวนการที่อาศัยความร้อนและการเกิดปฏิกิริยาเคมีในการแปรสภาพชีวมวลให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงพลังงาน โดยสามารถแปรสภาพให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว หรือเชื้อเพลิงแก๊สตามแต่ละกระบวนการ ข้อดีของการแปรสภาพเชิงเคมีความร้อนคือได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็นใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารมูลค่าเพิ่ม อาทิ เอทานอล เมทานอล หรือสารปิโตรเคมีภัณฑ์ต่าง กระบวนการแปรสภาพเชิงเคมีความร้อนประกอบไปด้วย การเผาไหม้ (Combustion) การไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊ซิฟิเคชัน (Gasification) และลิกวิแฟกชัน (Liquefaction)

#### 2.2.3.1 การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิง หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและตัวออกซิไดซ์ (Oxidizers) หรือออกซิเจนในอากาศ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ เถ้า รวมถึงพลังงานที่คายออกมาเนื่องมาจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน นอกจากการใช้เป็นแหล่งความร้อนโดยตรง ความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย อาทิ นำไปผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านระบบกังหันไอน้ำหรือกังหันแก๊ส เป็นต้น

การเผาไหม้ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนย่อยได้แก่การทำแห้ง การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) หรือไพโรไลซิส การเผาไหม้สารระเหย และการเผาไหม้ของชาร์ แสดงดังรูปที่ 2.8 เริ่มจากเมื่อชีวมวลได้รับความร้อน ความชื้นที่ผิวและความชื้นสมดุลจะถูกระเหยออกจากชีวมวลก่อนในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 250 องศาเซลเซียส โดยชีวมวลที่ใช้ควรมีความชื้นต่ำ หากความชื้นสูงเกินกว่าร้อยละ 65 โดยมวลการเผาไหม้จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากความร้อนของการเผาไหม้ชีวมวลไม่เพียงพอต่อความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยความชื้นออก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 250 ถึง 500 องศาเซลเซียสจะเข้าสู่ขั้นตอนของการปลดปล่อยสารระเหย ความร้อนที่มากขึ้นส่งผลให้ชีวมวลสลายตัวเกิดเป็นสารระเหยที่ควบแน่นได้ (Condensable volatiles) หรือที่เรียกว่าทาร์ (Tar) สารระเหยที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-condensable volatile) หรือผลิตภัณฑ์แก๊ส และชาร์ (Char) หรือผลิตภัณฑ์ของแข็ง สารระเหยที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้กับออกซิเจนหรืออากาศต่อไป ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกใช้ในกระบวนการต่างๆ ในการเผาไหม้ เช่น การไพโรไลซิส การเผาไหม้ชาร์ เป็นต้น หลังจากผ่านขั้นตอนไพโรไลซิส ชาร์ที่เกิดขึ้นจะมีองค์ประกอบของคาร์บอนและสารระเหยที่หลงเหลืออยู่บางส่วนจะถูกเผาไหม้ การเผาไหม้ชาร์จะเป็นขั้นตอนที่เกิดได้ยากกว่าการเผาไหม้สารระเหย เนื่องมาจากการเผาไหม้ชาร์เป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous reaction) ระหว่างชาร์ซึ่งเป็นของแข็งกับตัวออกซิไดซ์ซึ่งเป็นแก๊ส ส่งผลให้ขั้นตอนของการเผาไหม้ชาร์มักเป็นขั้นกำหนด

อัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยการสูญเสียมวลในแต่ละขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของชีวมวล อาทิ ความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ [14]

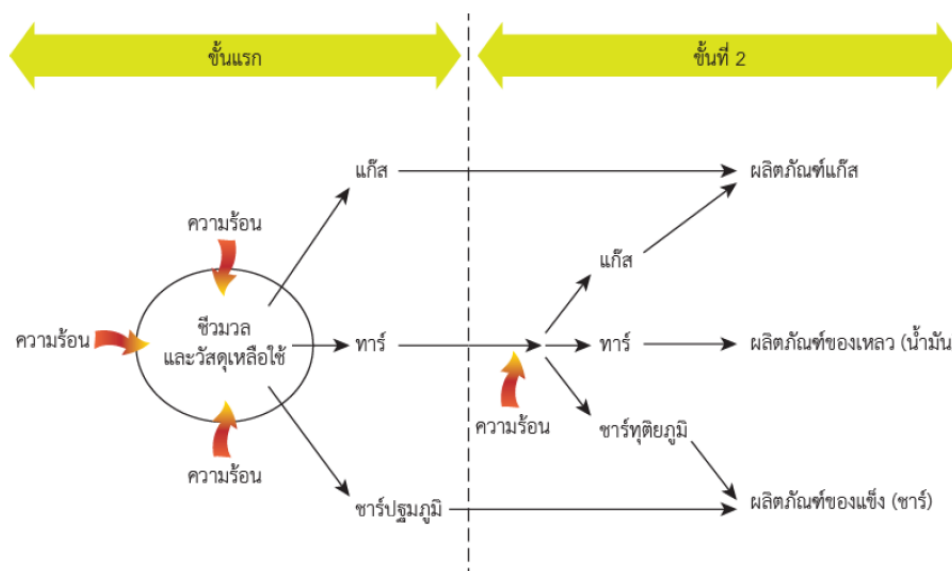
### 2.2.3.2 การไพโรไลซิส

ไพโรไลซิสเป็นกระบวนการแตกตัวเชิงเคมีด้วยความร้อน (Thermochemical decomposition) ในภาวะบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนหรือตัวออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนไพโรไลซิสมีความซับซ้อนมากมายหลายขั้นตอน มักเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible reaction) และต้องการพลังงานหรือความร้อนเพื่อใช้ในการสลายพันธะของสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีทั้งในรูปของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ไพโรไลซิสเปรียบเสมือนกระบวนการเริ่มต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการที่มีความซับซ้อนหรือเกิดปฏิกิริยากับสารร่วมปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ อาทิ การเผาไหม้ แก๊สฟิเคชัน หรือ ลิควิแฟกชัน

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในไพโรไลซิสมีมากมายหลายปฏิกิริยาและความซับซ้อนสูงยากต่อการอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและสารประกอบที่อยู่ภายในชีวมวลมีมากมายหลายชนิด ดังนั้นการเกิดไพโรไลซิสสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนอย่างง่าย แสดงดังรูปที่ 2.9

ขั้นที่ 1: เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนมากยิ่งขึ้น จะส่งผลให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบต่างๆ ออกเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส ทาร์และชาร์โดยชาร์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้เรียกว่าชาร์ปฐมภูมิ (Primary Char)

ขั้นที่ 2: เมื่อความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทาร์บางส่วนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะแตกตัวเพิ่มมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊ส และชาร์มากยิ่งขึ้น โดยชาร์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะถูกรับเรียกว่าชาร์ทุติยภูมิ



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเกิดไพโรไลซิสอย่างง่ายของชีวมวล [13]

ไพโรไลซิสสามารถแบ่งประเภทได้ตามภาวะที่ใช้ในการดำเนินการ โดยหลักแล้วจะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นเกณฑ์ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.4 แต่โดยทั่วไปนิยมแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

- ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis): คือกระบวนการในการทำถ่านหรือการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนอย่างช้าๆ ในภาวะออกซิเจนหรืออากาศจำกัด โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะดำเนินการที่อุณหภูมิประมาณ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะส่งผลต่อปริมาณถ่านที่ได้ หากใช้เวลาในการไพโรไลซิสมากจะทำให้ปริมาณของถ่านเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น แต่หากไม่ต้องการถ่านในปริมาณมาก จะใช้เวลาในการดำเนินการประมาณ 5 ถึง 30 นาที
- ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis): เป็นกระบวนการที่เน้นการผลิตน้ำมันชีวภาพ ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วในอัตราการให้ความร้อนมากถึง 1000 ถึง 10,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที อุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินงานจะอยู่ในช่วง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และต้องควบคุมให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยภายในเตาต่ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพประมาณร้อยละ 60 ถึง 70 ชาร์ร้อยละ 15 ถึง 25 และสารระเหยร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและภาวะที่ใช้ในการดำเนินการ

- แพลชไพโรไลซิส (Flash pyrolysis): ลักษณะการดำเนินการของแพลชไพโรไลซิสมีความคล้ายคลึงกับไพโรไลซิสแบบเร็ว แตกต่างกันในระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยต่ำมากๆ น้อยกว่า 1 วินาทีเพื่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวมากยิ่งขึ้น แพลชไพโรไลซิสจะทำให้ผลได้ (Yield) ของชาร์ลดต่ำลงและผลได้ของน้ำมันชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น โดยทั่วไปจะมีผลได้ของน้ำมันชีวภาพประมาณร้อยละ 70 ถึง 75 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.4 ภาวะที่ใช้ในการดำเนินการของแกซิฟิเคชันและผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้น [13]

ประเภทของไพโรไลซิส	เวลาที่เกิดปฏิกิริยา	อัตราการให้ความร้อน	อุณหภูมิ (°C)	ผลิตภัณฑ์หลัก
การทำถ่าน (Carbonation)	24 ชั่วโมง	ต่ำมาก	400	ชาร์หรือถ่าน
แบบช้า	5-30 นาที	ต่ำ	400-600	ชาร์ น้ำมัน แก๊ส
แบบเร็ว	< 2 วินาที	สูง	500	ไบโอออยล์ น้ำมัน
แพลช	< 1 วินาที	สูงมาก	500-600	น้ำมัน ไบโอออยล์ แก๊ส
ไฮโดรไพโรไลซิส	< 10 วินาที	สูง	ไม่เกิน 500	น้ำมัน ไบโอออยล์
ไฮดรัสไพโรไลซิส	5 – 30 นาที	ปานกลาง	ไม่เกิน 400	น้ำมัน ไบโอออยล์

### 2.2.3.3 แกซิฟิเคชัน

แกซิฟิเคชันเป็นกระบวนการย่อยสลายเชิงเคมีความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนหรือตัวออกซิไดซ์โดยที่สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการจะอยู่ในรูปของแข็งหรือของเหลวก็ได้ เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปแก๊สซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย อาทิ เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในหม้อไอน้ำ ใช้หรือสารตั้งต้นในการผลิตเคมีภัณฑ์ชนิดอื่น อาทิ เมทานอล เอทานอล เป็นต้น แกซิฟิเคชันจะไม่เปลี่ยนพลังงานเคมีของชีวมวลให้กลายเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมดเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่อยู่อย่างจำกัด แต่จะเปลี่ยนให้กลายเป็นพลังงานเคมีในรูปของเชื้อเพลิงแก๊สแทนเรียกว่าแก๊สสังเคราะห์ (Synthetic gas หรือ syngas) หรือโปรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas) บางส่วนที่ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจะถูกใช้ในปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดในแกซิฟิเคชัน โดยทั่วไปแก๊สสังเคราะห์จะประกอบไปด้วยแก๊ส 4 องค์ประกอบหลักได้แก่ ไฮโดรเจน (Hydrogen) คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน

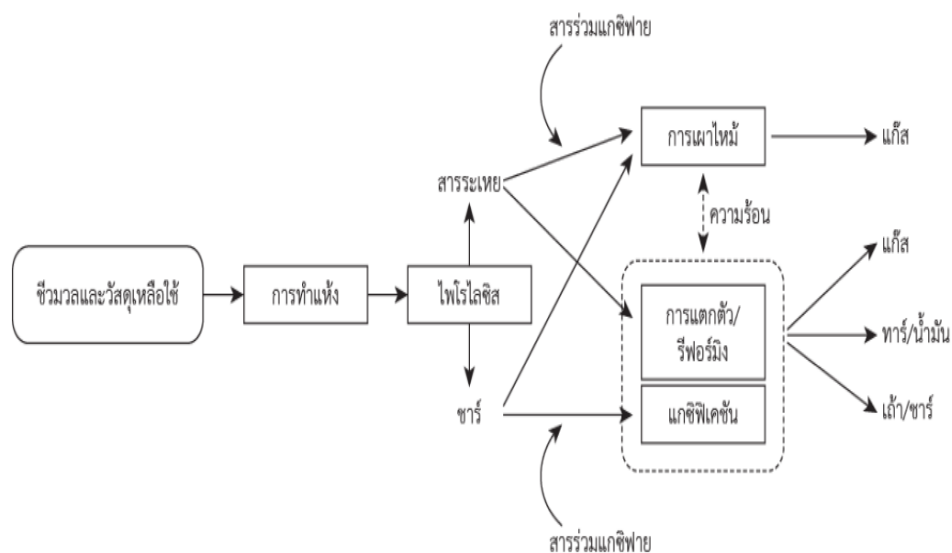


○ สารร่วมแกซิฟาย (Gasifying agents)

สารร่วมแกซิฟายหมายถึงสารที่เพิ่มเข้าไปในกระบวนการแกซิฟิเคชันเพื่อทำปฏิกิริยาต่างๆ รวมถึงสารเคมีที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ โดยทั่วไปสารร่วมแกซิฟายที่นิยมใช้ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน เป็นต้น การเลือกใช้สารร่วมแกซิฟายเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ รวมถึงค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ อาทิ การเลือกใช้น้ำเป็นสารร่วมแกซิฟายจะส่งผลให้ผลได้ของไฮโดรเจนเพิ่มสูงมากขึ้นจากปฏิกิริยาอวเทอร์-แก๊ส (Water-gas reaction) และส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้จะส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์มีค่าสูง เนื่องจากการเจือปนของไนโตรเจนต่ำ [15] การใช้อากาศเป็นสารร่วมแกซิฟายจะได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีค่าความร้อนต่ำประมาณ 3.5-11.5 เมกกาจูลต่อลูกบาศก์เมตรเนื่องมาจากมีองค์ประกอบของไนโตรเจนที่ติดมาจากอากาศในปริมาณที่มาก หรือการใช้ไฮโดรเจนเป็นสารร่วมแกซิฟายที่ความดันสูงและมีตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบการใช้งานจะส่งผลให้แก๊สสังเคราะห์มีค่าความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากมีองค์ประกอบของมีเทนมาก เป็นต้น

○ กลไกของแกซิฟิเคชัน

โดยทั่วไปแกซิฟิเคชันของชีวมวลถูกแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ การทำแห้ง (Drying) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) แกซิฟิเคชันของชาร์หรือรีดักชัน (Char gasification, reduction) และการเผาไหม้ของชาร์หรือออกซิเดชัน (Char combustion, oxidation) แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนในแกซิฟิเคชัน [13]

1. การทำแห้ง คือขั้นตอนการกำจัดความชื้นออกจากชีวมวล ในขั้นตอนนี้พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานโดยรวมของระบบลดลง โดยทั่วไปชีวมวลจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 5 ถึง 35 โดยน้ำหนัก ขั้นตอนอย่างง่ายของการทำแห้งแสดงดังสมการที่ 2.4

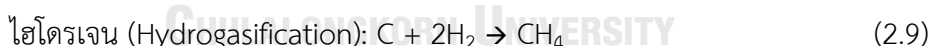
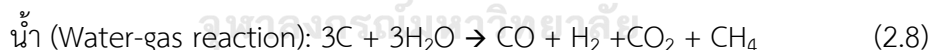
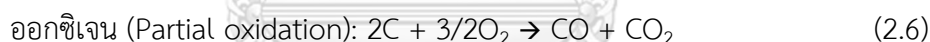


2. ไพโรไลซิส คือขั้นตอนการสลายตัวด้วยความร้อนในภาวะออกซิเจนหรืออากาศจำกัด พันธะเคมีของชีวมวลถูกทำลายด้วยความร้อน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบด้วยส่วนที่เป็นของแข็งหรือที่เรียกว่าชาร์และสารระเหยที่มีสถานะเป็นแก๊ส ซึ่งเมื่ออุณหภูมิลดลงจะมีบางส่วนควบแน่นเป็นของเหลวที่เรียกว่าทาร์ ขั้นตอนอย่างง่ายของการไพโรไลซิสแสดงดังสมการที่ 2.5

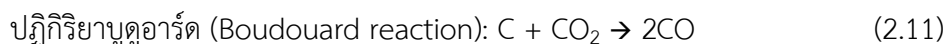


3. แกซิฟิเคชันของชาร์หรือรีดักชัน คือปฏิกิริยาระหว่างสารร่วมแกซิฟายกับชาร์และสารระเหยจากขั้นตอนไพโรไลซิส ซึ่งชาร์มีโครงสร้างซับซ้อนยากต่อการเขียนสูตรโครงสร้างและดุลสมการเคมี แต่ชาร์มีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นหลัก ดังนั้นจึงใช้คาร์บอนเป็นตัวแทนของชาร์เพื่อทำแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแกซิฟิเคชันดังนี้

- ปฏิกิริยาร่วมกับสารร่วมแกซิฟาย



- แกซิฟิเคชันของชาร์



ไฮโดรแกซิฟิเคชัน (Hydrogasification reaction):



ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation reaction):



ปฏิกิริยาชิฟต์ (Water-gas shift reaction):



ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming):



4. การเผาไหม้ของชาร์หรือออกซิเดชัน (Char combustion หรือ oxidation) ปฏิกิริยาส่วนใหญ่ในแกซิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน มีเพียงปฏิกิริยาบางปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของชาร์ประกอบด้วย

ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation reaction):



ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Complete combustion):

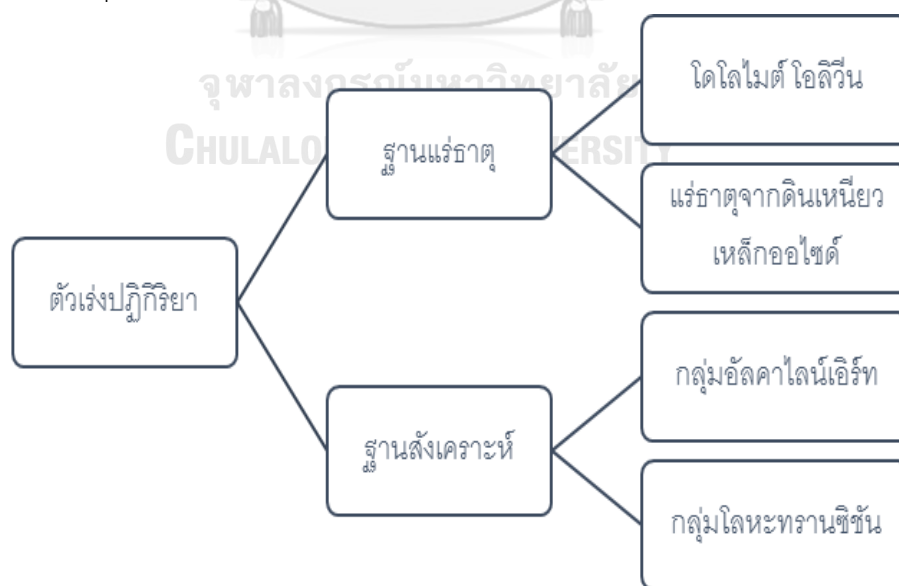


อุณหภูมิและความดันเป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินการของแกซิฟิเคชัน ปฏิกิริยาต่างๆจะเกิดขึ้นไม่ได้หากดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียสเนื่องมาจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่ของแกซิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดำเนินการมีค่าประมาณ 800 องศาเซลเซียสขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล หากอุณหภูมิกว่กระบวนการต่ำเกินไปจะส่งผลให้การถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาค (Phase) ของแก๊สและชีวมวลเกิดได้ช้า ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการ

### 2.3 แกซิฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic gasification)

แกซิฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ช่วงปีค.ศ. 1980 จุดเด่นของกระบวนการคือลดปริมาณทาร์และผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการให้น้อยลง เนื่องจากปัญหาหลักของแกซิฟิเคชันคือผลได้ของแก๊สต่ำ คุณภาพของแก๊สสังเคราะห์ต่ำหรือไม่เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน รวมถึงผลได้ของทาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นในปริมาณมาก ทาร์ที่เกิดขึ้นนอกจากจะส่งผลให้ผลได้ของแก๊สต่ำลงแล้ว ยังส่งผลเสียต่อการดำเนินการกระบวนการและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากทาร์ก่อให้เกิดการสะสมตามอุปกรณ์ การอุดตัน ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านการถ่ายโอนมวลและความร้อนตามมา คุณสมบัติที่ดีของตัวเร่งปฏิกิริยาคือมีราคาที่เหมาะสม ทนทานและเหมาะสมกับภาวะที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาเคมี สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้สูงขึ้น สามารถลดปริมาณการทาร์ รวมถึงมีมีความทนทานต่อการเกิดซินเทอริง (Sintering) และสามารถฟื้นฟูสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2]

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามการใช้งาน ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ (Primary catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาดาวนสตรีม (Downstream catalyst) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิถูกใช้เพื่อลดการสร้างทาร์รวมถึงกระตุ้นปฏิกิริยาการสลายตัวของทาร์หรือรีฟอร์มมิงของทาร์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ต้องการมากยิ่งขึ้น ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาดาวนสตรีมถูกใช้เพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาต่างๆในแกซิฟิเคชันเพื่อให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สมากยิ่งขึ้น อาทิ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยไอน้ำ แกซิฟิเคชันของซาร์ เป็นต้น หากแบ่งตามลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มแสดงดังรูปที่ 2.11 ได้แก่กลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาฐานแร่ธาตุจากธรรมชาติ (Mineral based catalyst) และกลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาฐานสังเคราะห์ (Synthesized catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มแรกจะเป็นแร่ธาตุต่างๆที่พบในธรรมชาติ อาทิ โดโลไมต์ (Dolomite) โอลิวีน (Olivine) หรือแร่ธาตุจากดินเหนียว (Clay minerals) เป็นต้น องค์ประกอบหลักในตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้จะประกอบไปด้วย ออกไซด์ของอะลูมิเนียม (Aluminium) แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) รวมถึงเหล็ก (III) ออกไซด์ (Iron (III) oxide;  $Fe_2O_3$ ) ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวมีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาต่างๆในแกซิฟิเคชัน กลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาฐานสังเคราะห์คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นมา ที่นิยมได้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานโลหะกลุ่มอัลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline earth metal) และตัวเร่งปฏิกิริยาฐานโลหะทรานซิชัน (Transition metal) อาทิ ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานนิกเกิล (Nickel) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้มีกัมตภาพ (Activity) ในการเร่งปฏิกิริยาสูง รวมถึงมีความสามารถในการลดปริมาณทาร์ที่ดี และสามารถปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมต่อการใช้งานได้อย่างยืดหยุ่น



รูปที่ 2.11 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ [2]

## 2.4 แก๊สซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับ (Sorption-enhanced gasification)

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่า คุณภาพของเชื้อเพลิงหรือองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแก๊สขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างอาทิ ชนิดของชีวมวล อุณหภูมิการดำเนินกระบวนการ หรือชนิดของสารร่วมแก๊สซิฟาย โดยทั่วไปองค์ประกอบของไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากแก๊สซิฟิเคชันจะอยู่ที่ร้อยละ 40 ถึง 50 โดยปริมาตร [16] ซึ่งถือว่ามืองค์ประกอบของไฮโดรเจนที่ต่ำ และไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างคุ้มค่าหรือไม่สามารถนำไปใช้งานกับกระบวนการอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่นการนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้งานกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline fuel cell) ซึ่งมีข้อจำกัดว่าต้องมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่า 10 ส่วนในล้านส่วนเป็นต้น นอกจากนี้ องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่มีปริมาณไฮโดรเจนต่ำยังต้องนำไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งสิ้นเปลืองทั้งพลังงาน เวลา และค่าใช้จ่ายมากยิ่งขึ้น เพื่อที่จะเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์ ตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> capture) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแก๊สซิฟิเคชันเรียกว่าแก๊สซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับ

### 2.4.1 ขั้นตอนพื้นฐานของแก๊สซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับ

แก๊สซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับจะมีปฏิกิริยาที่สำคัญอยู่ 2 ปฏิกิริยาได้แก่ ปฏิกิริยาซิฟต์หรือปฏิกิริยาที่ 2.14 และปฏิกิริยาดูดซับและคายซับของตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ [17, 18]

- ขั้นการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์: ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะทำหน้าที่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาต่างๆในแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับออกจากกระบวนการ จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาซิฟต์ ข้อดีอีกข้อหนึ่งของขั้นการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ความร้อนที่ถูกคายออกมาจะช่วยในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและลดการถ่ายโอนความร้อนจากเตาปฏิกรณ์สู่เบดของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst bed)
- ขั้นการเปลี่ยนแปลงสมดุลปฏิกิริยาอวเตออร์-แก๊สซิฟิเคชัน: เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบต่ำลงจากการดักจับของตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ สมดุลของปฏิกิริยาซิฟต์จะเลื่อนไปข้างหน้าส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงมากขึ้น ในขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์ลดต่ำลง ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอัตราส่วนนี้สามารถปรับค่าได้ตามปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ

กล่าวคือสามารถปรับได้จากปริมาณของตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้เหมาะกับการนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้งานต่อไป

#### 2.4.2 การประยุกต์ใช้งานของแก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น

- เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารมูลค่าเพิ่มชนิดอื่น: แกซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับเป็นกระบวนการที่มีความโดดเด่นเป็นอย่างมาก เนื่องจากความสามารถในการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ควบคุมอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไฮโดรเจนได้ ส่งผลให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย อาทิ กระบวนการผลิตมีเทนที่ต้องการแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไฮโดรเจนประมาณ 3 กระบวนการสังเคราะห์ฟิชเชอร์โทรปช์ (Fischer-Tropsch synthesis) หรือกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol synthesis) ที่ต้องการแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไฮโดรเจนประมาณ 2 เป็นต้น
- ใช้งานในโรงงานกลั่นน้ำมันดิบ: ไฮโดรเจนถูกใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหน่วยการแตกตัวด้วยไฮโดรเจน (Hydrocracking unit) เพื่อเปลี่ยนสารโมเลกุลหนักให้เป็นสารโมเลกุลเบาขึ้น หรือถูกใช้ในการกำจัดซัลเฟอร์ที่ประกอบอยู่ในน้ำมันดิบ เป็นต้น
- ใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก: อุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้พลังงานความร้อนมาก และปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในปริมาณมากเช่นกัน การใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจัดเป็นวิธีการในการลดการสร้างและการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม
- เชื้อเพลิงสำหรับพาหนะขนส่ง: ไฮโดรเจนถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจในการศึกษาและพัฒนาอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์เผาไหม้ชนิดอื่น นอกจากนั้นยังไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ประกอบด้วยความร้อนและน้ำ
- การประยุกต์ใช้งานอื่นๆ: แก๊สสังเคราะห์ยังสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย อาทิ ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแอมโมเนีย (Ammonia) ในอุตสาหกรรมปุ๋ย เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ไขมันหรือน้ำมันที่ไม่อิ่มตัวในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยากับออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

## 2.5 ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง (High temperature CO<sub>2</sub> sorbent materials)

ประสิทธิภาพการทำงานของตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะ ชนิด และกัมมันตภาพของตัวดูดซับ ทิศทางในการพัฒนาและวิจัยตัวดูดซับที่ใช้กับกระบวนการแกซีฟิเคชันที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับมุ่งเน้นที่ลักษณะของตัวดูดซับดังต่อไปนี้ [19]

- มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง เนื่องมาจากแกซีฟิเคชันต้องดำเนินการที่อุณหภูมิสูงประมาณ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส
- มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และมีจลนพลศาสตร์ (kinetics) ที่สูงมากเพียงพอ
- ง่ายต่อการคายซับ (Desorption) และมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง
- ราคาสมเหตุสมผล หาง่ายหรือสังเคราะห์ได้ง่าย

โดยทั่วไปแล้วตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในแกซีฟิเคชันจะประกอบไปด้วย 3 กลุ่มได้แก่ กลุ่มเซรามิกของโลหะอัลคาไลน์ (Ceramic alkaline-based sorbents) กลุ่มแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide-based sorbents) และกลุ่มอื่นๆ อาทิ ไฮโดรทัลไซต์ (Hydrotalcite) เป็นต้น

### 2.5.1 ตัวดูดซับกลุ่มแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide-based sorbents)

แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมและภาคการพัฒนาและวิจัย เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่สามารถหาได้ง่าย พบได้ในธรรมชาติในรูปของหินปูน (Limestone) แคลเซียมคาร์บอเนตและโดโลไมต์ (Dolomite) ราคาถูก และยังมีประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และมีจลนพลศาสตร์สูง [19, 20] ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่อแคลเซียมออกไซด์ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไปดังสมการที่ 2.17



จากสมการข้างต้น หากคำนวณตามทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometric) แล้ว แคลเซียมออกไซด์ 1 กรัมสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงถึง 0.786 กรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 78.6 โดยมวลของตัวดูดซับ

โดยทั่วไปกลไกการดูดซับเชิงเคมี (Chemisorption) ของปฏิกริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวและขั้นตอนการแพร่ของชั้นแคลเซียมคาร์บอเนต โดยการดูดซับจะเริ่มจากการที่คาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกริยากับแคลเซียมออกไซด์จนกลายเป็นวัฏภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตบริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interface) ปฏิกริยาจะดำเนินไปจนกว่าพื้นผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยชั้นของแคลเซียมคาร์บอเนตจนหมด ขั้นตอนแรก

นี้เป็นขั้นตอนที่ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมีและเป็นขั้นตอนที่เกิดได้รวดเร็วหรือมีจลจลนพลศาสตร์สูง หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนถัดไปคือขั้นตอนการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แกนกลาง (Core) ของตัวดูดซับซึ่งยังไม่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ และเป็นขั้นตอนที่เกิดได้ช้าหรือจลจลนพลศาสตร์ต่ำ นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกอาจส่งผลให้การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แกนกลางเกิดได้ยากขึ้นอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม การใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สซิฟิเคชันก็มีข้อจำกัด เนื่องมาจากการคายซับ (Desorption) ของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาที่ 2.17 เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ที่ต้องการพลังงานสูงและมักจะเกิดที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะดำเนินการที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า เนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) สูง ส่งผลให้ลักษณะ (Characteristic) ของตัวดูดซับเปลี่ยนไป ก่อให้เกิดการซินเทอริง (Sintering) ของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดจากการจับกลุ่มก้อน (Agglomeration) ของอนุภาคขนาดเล็ก การเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของรูพรุน รวมถึงการหดตัวของรูพรุน (Pore shrinkage) โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินการ ชนิดของสารตั้งต้น (Precursor) ที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับ และระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

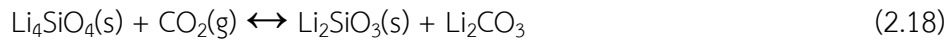
จากปัญหาดังกล่าวส่งผลให้การนำตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมเกิดปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพการใช้งานในระยะยาวหรือการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวดูดซับ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการฟื้นฟูสภาพของแคลเซียมออกไซด์ อีกปัญหาหนึ่ง ที่พบของการใช้งานคือ การเสถียรภาพของ (Reactivity) ของตัวดูดซับเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลเฟตภายในแก๊สสังเคราะห์ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate) แทนที่ปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

### 2.5.2 ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต (Lithium orthosilicate; $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ )

นอกจากตัวดูดซับกลุ่มแคลเซียมออกไซด์แล้ว ตัวดูดซับเซรามิกของโลหะอัลคาไลน์ (Alkaline ceramic sorbents) เป็นกลุ่มตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน อาทิ ลิเทียมอโทซิลิเกต โซเดียมเซอร์โคเนต (Sodium zirconate) เป็นต้น [20] ภายในกลุ่มตัวดูดซับเซรามิกของโลหะอัลคาไลน์ ลิเทียมอโทซิลิเกตเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องมาจากความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 750 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวดูดซับต่ำกว่าแคลเซียมออกไซด์ มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง รวมถึงมีความสามารถในการฟื้นฟูสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

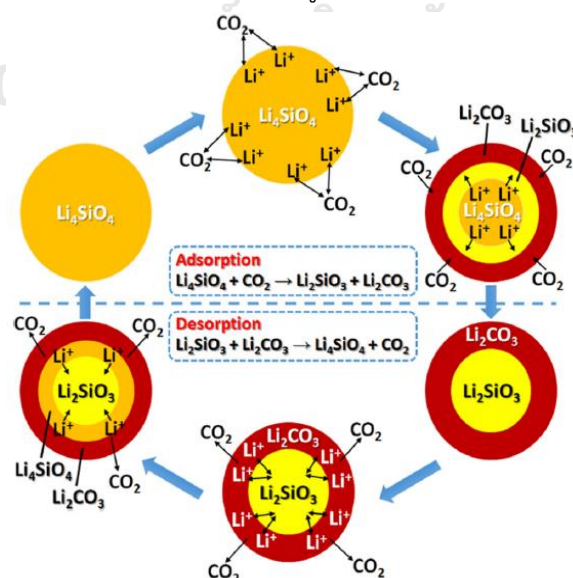


ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับแคลเซียมออกไซด์ [17] การดูดซับเชิงเคมีเกิดขึ้นตามสมการต่อไปนี้



จากสมการที่ 2.18 หากคำนวณตามทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometric) แล้ว ลิเทียมอโทซิลิเกต 1 กรัมสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 0.367 กรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 36.7 โดยมวลของตัวดูดซับ

กลไกการดูดซับเชิงเคมีของลิเทียมอโทซิลิเกตแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างลิเทียมอโทซิลิเกตกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวระหว่างวัฏภาค และขั้นตอนการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แกนกลางของตัวดูดซับ โดยการดูดซับจะเริ่มจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกตที่บริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาค เกิดเป็นวัฏภาคของลิเทียมเมตาซิลิเกต (Lithium metasilicate;  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ) และลิเทียมคาร์บอเนต (Lithium carbonate) เกิดขึ้นมา ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปจนกว่าบริเวณผิวของตัวดูดซับจะปกคลุมด้วยวัฏภาคของลิเทียมเมตาซิลิเกตและลิเทียมคาร์บอเนตทั้งหมด ขั้นตอนแรกนี้เป็นขั้นตอนที่ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมี เป็นขั้นตอนที่เกิดได้รวดเร็วหรือมีจลนพลศาสตร์สูง จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนถัดไปคือขั้นตอนของการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงไอออนของลิเทียม (Lithium ion;  $\text{Li}^+$ ) และไอออนของออกซิเจน (Oxygen ion;  $\text{O}^{2-}$ ) เพื่อทำปฏิกิริยากับลิเทียมอโทซิลิเกตภายในแกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ถูกกำหนดด้วยการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์และไอออนต่างๆ จึงเป็นขั้นตอนที่เกิดได้ช้าหรือเป็นขั้นตอนที่มีจลนพลศาสตร์ต่ำ แบบจำลองการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทซิลิเกตแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แบบจำลองการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทซิลิเกต [18]

โดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์ลิเทียมออกไซด์จะสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นของซิลิกา กับลิเทียมหลากหลายชนิด อาทิ ซิลิกาเจล (Silica gel) ฟูมซิลิกา (Fumed silica) ไดอะตอมไมต์ (Diatomite) ลิเทียมคาร์บอเนต ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (Lithium hydroxide) ลิเทียมไนเตรต (Lithium nitrate) เป็นต้น ภายใต้การสังเคราะห์แบบเปียกหรือแบบแห้ง แล้วตามด้วยการปรับปรุงด้วยความร้อน (Heat treatment) ที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้อาจเกิดการชินเทอริงของโครงสร้างไปพร้อมๆกับการเตรียมตัวดูดซับได้ ส่งผลให้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวและรูพรุนต่ำ

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 แกซีฟิเคชัน

Wei และคณะ [21] ศึกษาผลและกลไกการทำงานของแคลเซียมออกไซด์ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับของชีวมวล โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตต์ชนิดสองชั้น (Two-stage fixed-bed reactor) พบว่าแคลเซียมออกไซด์ไม่เพียงแต่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน โดยแคลเซียมออกไซด์กระตุ้นให้ปฏิกิริยาชิฟต์เลื่อนสมดุลไปข้างหน้า ส่งผลให้เกิดผลได้ของไฮโดรเจนในปริมาณมากขึ้นและยังช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารละลาย (Volatile cracking) และปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการแกซีฟิเคชัน พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารละลายและปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันเช่นเดียวกัน โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการอยู่ในช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันบรรยากาศ นอกจากนี้ยังศึกษาอัตราการป้อนเข้าของน้ำในรูปของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างน้ำต่อชีวมวล พบว่าเมื่ออัตราการป้อนเข้าของน้ำสูงขึ้นจะมีผลได้ของไฮโดรเจนมากยิ่งขึ้น

Chiodo และคณะ [22] ศึกษาผลและกลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ แมกนีเซียมออกไซด์ และนิกเกิล (Nickel) บนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตต์ (Fixed-bed reactor) โดยเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละตัวด้วยผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ประสิทธิภาพแกซีฟิเคชันของคาร์บอน (Carbon gasification efficiency; CGE) และประสิทธิภาพการสังเคราะห์ไฮโดรเจนจากแกซีฟิเคชัน (Hydrogen gasification efficiency; H<sub>2</sub>GE) พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาลงในกระบวนการ CGE และ H<sub>2</sub>GE มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกตัวเร่งปฏิกิริยา สันนิษฐานจากตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนในการเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของซาร์และทาร์ รวมไปถึงความเป็นเบส (Basicity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดการลดลงของไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก (Light hydrocarbon species) ผ่านการกระตุ้นปฏิกิริยาธิฟอร์มมิงด้วยไอน้ำหรือปฏิกิริยาที่ 2.15 และจากผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจะสรุปได้ว่าผลได้ของไฮโดรเจนจากตัวเร่ง

ปฏิกิริยาโตโลไมต์สูงกว่าแมกนีเซียมออกไซด์เล็กน้อย ในขณะที่ผลได้ไฮโดรเจนจากตัวเร่งปฏิกิริยานี้ เกือบตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์มีค่าต่ำที่สุด เนื่องมาจากความเป็นเบสที่ต่ำกว่ารวมถึงการเกิดการเกาะจับของคาร์บอน (Carbon formation) และซินเทอริงซึ่งส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวต่างๆ

### 2.6.2 ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Kim และคณะ [18] ศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลิเทียมอโทซิลิเกตแบบรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous) โดยใช้ลิเทียมไฮดรอกไซด์และซิลิกาฟวมเป็นสารตั้งต้นสังเคราะห์ด้วยวิธีการ โซลิด-สเตททรานฟอร์มเมชัน (Solid-state transformation) พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับลดลงจากการสังเคราะห์ปกติที่ 700 องศาเซลเซียสเป็น 600 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ซินเทอริงของตัวดูดซับต่ำลง โครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ และมีพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตแบบรูพรุนขนาดใหญ่ที่สังเคราะห์ขึ้นนี้มีอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน นอกจากนั้นเมื่อทำการทดลองการนำมาใช้ซ้ำของตัวดูดซับจะพบว่า ตัวดูดซับมีความสามารถในการใช้ซ้ำ 10 รอบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และความสามารถในการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ

Chen และคณะ [17] ศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลิเทียมอโทซิลิเกตที่ทำการเจือ (Doping) แคลเซียมลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ลิเทียมคาร์บอเนต แคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาออกไซด์เป็นสารตั้งต้น สังเคราะห์ด้วยวิธีการโซลิด-สเตททรานฟอร์มเมชันพบว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 0.064 เป็น 0.314 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อทำการเจือแคลเซียมลงไป 32 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และตัวดูดซับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จึงเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นยังทำการทดสอบการใช้งานซ้ำกับตัวดูดซับที่เจือแคลเซียมลงไป 6 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นจำนวน 15 ครั้ง พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จาก 35.1 เป็น 26 เปอร์เซ็นต์โดยมวล สรุปได้ว่าตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำที่ดี เนื่องจากแคลเซียมมีส่วนช่วยในการลดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของตัวดูดซับ

Wang และคณะ [23] ศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลิเทียมอโทซิลิเกต ที่ทำการเจือธาตุโลหะหลายชนิดลงไปได้แก่ โพแทสเซียม (Potassium) แมกนีเซียม (Magnesium) โครเมียม (Chromium) และซีเรียม (Cerium) สังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซล-เจล (Sol-gel method) พบว่าธาตุทุกตัวที่ทำการเจือลงไปจะส่งผลให้การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดียิ่งขึ้นเพิ่มขึ้น เมื่อเจือ การเจือซีเรียมลงไปมีส่วนช่วยยับยั้งการจับกลุ่มก้อนของตัวดูดซับ เกิดเป็นโครงสร้างคล้ายโฟมที่มี ขนาดอนุภาคเล็ก ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ และจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของการดูดซับ สูงยิ่งขึ้น และยังสามารถใช้ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ซ้ำได้ถึง 10 รอบที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



## บทที่ 3

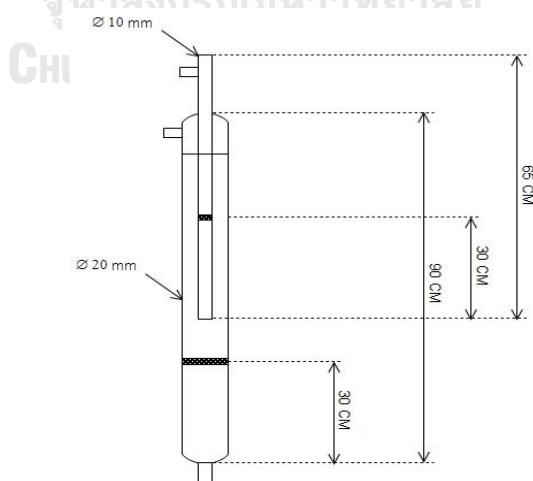
### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

##### 3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษาแกซิฟิเคชัน

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยของชีวมวล (Devolatile temperature) และศึกษาผลของอุณหภูมิแกซิฟิเคชัน (Gasification temperature) ของแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น (2-stage fixed bed reactor) จึงถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อแยกส่วนปลดปล่อยสารระเหยของชีวมวล และส่วนของแกซิฟิเคชันออกจากกัน

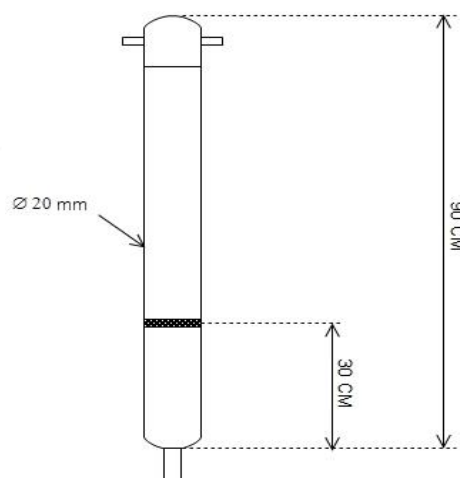
เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยท่อควอทซ์ 2 ขนาด ดังรูปที่ 3.1 ท่อควอทซ์ขนาดเล็กเป็นท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ยาว 65 เซนติเมตร ปลายท่อด้านบนประกอบด้วยปลายเปิด 2 ทาง ปลายเปิดทางด้านข้างมีไว้สำหรับป้อนแก๊สตัวพา (Carrier gas) และปลายเปิดทางด้านบนมีไว้สำหรับป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ที่ความยาว 30 เซนติเมตรจากปลายเปิดด้านล่างจะมีจุดคอคดของท่อควอทซ์ เพื่อเป็นที่รองรับชีวมวลที่ป้อนเข้ามาและเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่บริเวณนี้ ท่อส่วนที่สองคือท่อขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ความยาวของท่อ 90 เซนติเมตร ด้านบนของท่อจะมีปลายเปิด 1 ทางสำหรับป้อนไอน้ำเข้าสู่กระบวนการ ที่ความยาว 30 เซนติเมตรที่ปลายท่อด้านล่างจะมีจุดคอคดของท่อควอทซ์ เพื่อเป็นที่รองรับตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันที่บริเวณนี้



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น

### 3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) ประกอบด้วยท่อควอทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ยาว 65 เซนติเมตร ด้านบนของท่อประกอบด้วยปลายเปิด 2 ทาง ปลายเปิดด้านหนึ่งเป็นทางป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ ปลายเปิดอีกด้านหนึ่งเป็นทางป้อนเข้าของแก๊สตัวพาหรืออาร์กอน ที่ความยาว 30 เซนติเมตรจากปลายด้านล่างจะมีจุดคอดของท่อควอทซ์ เพื่อเป็นที่รองรับตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

## 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมใบอ้อย

- เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบและละเอียด
- เครื่องแยกขนาดอนุภาค (Sieve shaker)
- ตะแกรงร่อน (Sieve tray) ขนาด 150 และ 250 ไมครอน

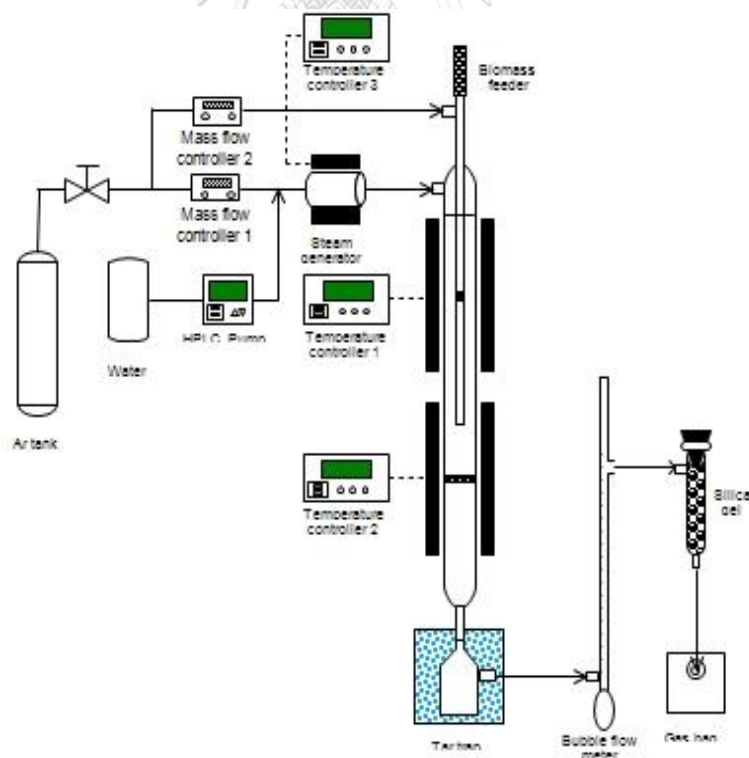
### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา

- ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (Lithium hydroxide)
- ฟูมซิลิกา (Fumed silica)
- เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร
- ตู้อบแห้งสาร (Drying)
- เตาเผา (Calcination furnace)
- โกร่งบดสาร (Pestle and mortar)

### 3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น

รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น ซึ่งมี ส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

- อาร์กอนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร
- อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller)
- ปั๊มน้ำ (HPLC pump)
- เครื่องผลิตไอน้ำ (Steam generator)
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple)
- เตาเผาชนิดท่อ (Tube furnace)
- เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น
- อุปกรณ์ดักจับทาร์ (Tar trap)
- อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สชนิดฟองแก๊ส (Bubble flowmeter)
- ซิลิกาเจล (Silica gel)
- ถุงเก็บแก๊สตัวอย่างขนาด 1 ลิตร (Gas bag)

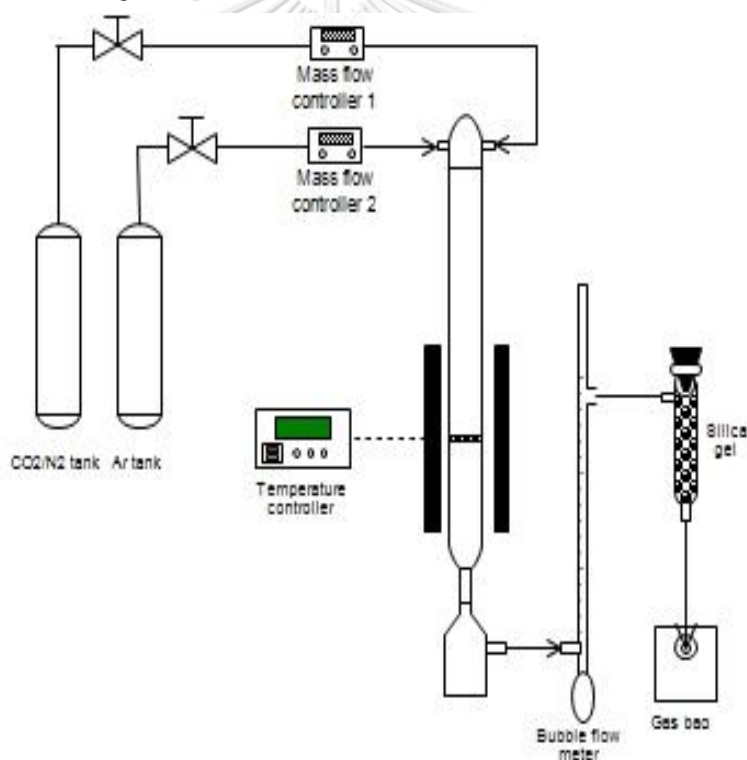


รูปที่ 3.3 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น

### 3.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

รูปที่ 3.4 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

- อาร์กอนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร
- คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 50 โดยปริมาตรในไนโตรเจน
- อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller)
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- เตาเผาชนิดท่อ (Tube furnace)
- เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
- อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สชนิดฟองแก๊ส (Bubble flowmeter)
- ซิลิกาเจล (Silica gel)



รูปที่ 3.4 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง



### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมซีวมวล

นำใบอ้อยไปบดด้วยเครื่องบดชนิดหยาบและชนิดละเอียดตามลำดับ จากนั้นนำซีวมวลซีวมวลที่ผ่านการบดไปแยกขนาดด้วยเครื่องแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนหมายเลข 60 และ 100 ซึ่งมีขนาด 150 และ 250 ไมโครเมตรตามลำดับ ใบอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 150 ถึง 250 ไมโครเมตร

#### 3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต

ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตถูกเตรียมด้วยวิธีโซลิด-สเตททรานพอร์เมชันโดยสารตั้งต้น (Precursor) ที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (Lithium hydroxide) และฟุ้งซิลิกา (Fumed silica) และใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับมีดังต่อไปนี้

1. ชั่งลิเทียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 1.754 กรัม ฟุ้งซิลิกาปริมาณ 1 กรัมและเอทานอล 10 มิลลิลิตรผสมลงในโถรงบดสาร โดยอัตราส่วนโดยโมลของลิเทียมไฮดรอกไซด์ต่อฟุ้งซิลิกาเท่ากับ 4.4 ต่อ 1 เพื่อให้ปริมาณไอออนของลิเทียมเพียงพอต่อการสังเคราะห์สารประกอบลิเทียมอโทซิลิเกต และร้อยละ 10 ของปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้จากปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อชดเชยลิเทียมที่ระเหยออกระหว่างการเตรียมตัวดูดซับ
2. บดของผสมเป็นเวลา 30 นาที ผลึกภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลวข้น (Slurry)
3. อบแห้งของเหลวข้นที่ได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำของแข็งที่ได้ไปเผา (Calcination) ที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 ชั่วโมง ในเตาเผาที่มีอากาศไหลผ่าน และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนด ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้จะเขียนย่อในรูป LHX โดย X แทนอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับ
5. หลังจากอุณหภูมิของเตาเผาลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นำผลึกภัณฑ์ที่ได้ออกจากเตาเผาและเก็บในเดซิเคเตอร์ (Desiccator) เพื่อป้องกันความชื้น

### 3.3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ก่อนที่จะใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเผา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นและสิ่งเจือปน (Impurities) ออกไป
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาลิเทียมอโทซิลิเกต-แคลเซียมออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาลิเทียมอโทซิลิเกต-แมกนีเซียมออกไซด์เตรียมได้จากวิธีการผสมทางกายภาพ (Physical mixing) ด้วยการบด (Mechanically ground) ในโถรงบดสารเป็นเวลา 10 นาที

ปริมาณแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ที่เพิ่มเข้าไปในตัวดูดซับจะมีอัตราส่วนเท่ากับร้อยละ 25 50 และ 75 โดยมวล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเขียนย่อในรูป LHCAOX หรือ LHMGOX โดย X แทนอัตราส่วนโดยมวลของแคลเซียมออกไซด์หรือแมกนีเซียมออกไซด์ที่เพิ่มเข้าไป อาทิ LHCAO25 หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25 1 กรัมมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ 0.25 กรัมเป็นต้น หลังจากนั้นจะเก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ในเดซิเคเตอร์ (Desiccator) เพื่อป้องกันความชื้น

### 3.3.4 ขั้นตอนการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ

1. ควอทซ์วูลล์ (Quartz wools) ปริมาณ 0.1 กรัมถูกบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง บริเวณจุดคอดของเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นบรรจุตัวดูดซับปริมาณ 0.5 กรัมลงไปหรือบรรจุอะลูมินาชนิดกลม (Alumina ball) 0.5 กรัมลงไปในกรณีศึกษาภาวะไม่มีตัวดูดซับ
2. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับเตาเผาชนิดท่อตามรูปที่ 3.2 โดยที่ระยะของจุดคอดอยู่บริเวณกึ่งกลางของเตาเผา
3. ป้อนอาร์กอนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที วัดอัตราการไหลของแก๊สออกด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดฟองแก๊สเพื่อตรวจสอบการรั่ว
4. เปิดเตาเผา โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับที่ 700 องศาเซลเซียส จับเวลา 30 นาทีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึงอุณหภูมิที่กำหนด เพื่อไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์และกำจัดความชื้นและสิ่งเจือปนออกจากตัวดูดซับ
5. เมื่อครบ 30 นาที ป้อนคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที
6. เก็บแก๊สตัวอย่างทุก 3 นาทีโดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 1 ลิตรเป็นเวลา 30 นาที นำแก๊สตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี
7. เมื่อครบ 30 นาที ปิดเตาเผาและปิดแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ นำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากเตาเผาเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส

8. เก็บตัวดูดซับหลังการใช้งานในเดซิเคเตอร์ (Desiccator) เพื่อป้องกันความชื้น ก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะ (Characteristics) ต่างๆต่อไป

### 3.3.5 ขั้นตอนการทดลองแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ

1. ควอทซ์วูลล์ปริมาณ 0.1 กรัมถูกบรรจุลงในท่อควอทซ์ขนาดใหญ่บริเวณจุดคอดของเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นบรรจุตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1 กรัมลงไป หรือบรรจุอะลูมินาชนิดกลม (Alumina ball) 1 กรัมลงไปในกรณีศึกษาภาวะไม่มีตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ควอทซ์วูลล์ปริมาณ 0.05 กรัมถูกบรรจุลงในท่อควอทซ์ขนาดเล็กบริเวณจุดคอดของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อแยกซาร์ที่เกิดจากไฟโรไลซิสออกจากตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา ซาร์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองจะติดอยู่ที่บริเวณนี้
3. เตรียมไบอ้อยปริมาณ 0.2 กรัมบรรจุลงในท่อซิลิโคน (Silicone tube) และติดท่อซิลิโคนกับปลายเปิดด้านบนสุดของท่อควอทซ์ขนาดเล็ก คลิปหนีบโลหะ (Metal binder) ถูกใช้ในการป้องกันการร่วลงของซีมวอลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ และถูกปลดออกเมื่อต้องการเริ่มการทดลอง
4. ประกอบท่อควอทซ์ทั้งสองขนาดเข้าด้วยกัน และติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับเตาเผาชนิดท่ออุปกรณ์ดักจับซาร์ และสายป้อนเข้าอาร์กอนดังรูปที่ 3.1
5. ป้อนอาร์กอนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที วัดอัตราการไหลของแก๊สขาออกด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดฟองแก๊สเพื่อตรวจสอบการรั่ว
6. เปิดเตาเผาทั้ง 2 เตาพร้อมกัน โดยเตาด้านบนซึ่งเป็นส่วนที่เกิดไฟโรไลซิสจะถูกตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 700 องศาเซลเซียสในทุกการทดลอง เตาเผาด้านล่างจะเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาแกซีพีเคชันของไอระเหยกับสารรวมแกซีฟาย และปฏิกิริยาของไอระเหยกับตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส
7. จับเวลา 30 นาทีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึงที่กำหนดเพื่อไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์และกำจัดความชื้นและสิ่งเจือปนออกจากตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา
8. เมื่อครบ 30 นาที ป้อนไอน้ำเข้าสู่ระบบโดยอัตราการป้อนของไอน้ำมีค่าเท่ากับ 0.1 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้อาร์กอนเป็นแก๊สตัวพาที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที จับเวลา 10 นาทีเพื่อให้ไอน้ำกระจายตัวทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์
9. เมื่อครบ 10 นาที ปลดคลิปหนีบโลหะออกเพื่อป้อนไบอ้อยเข้าสู่ระบบ เริ่มจับเวลาและเก็บแก๊สตัวอย่างทันที

10. เก็บแก๊สตัวอย่างทุกๆ 5 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 1 ลิตรเป็นเวลา 30 นาที นำแก๊สตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ทางองค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี
11. เมื่อครบ 30 นาทีปิดเตาเผา ปิดแก๊ส และปิดไอน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบ นำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากเตาเผาเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส
12. เก็บตัวอย่างซาร์ที่ติดอยู่บริเวณจุดคอดของท่อควอทซ์ขนาดเล็กเพื่อวัดปริมาณซาร์ที่เกิดขึ้น
13. เก็บตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการใช้งานในเดซิเคเตอร์ (Desiccator) เพื่อป้องกันความชื้น ก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะต่างๆต่อไป

### 3.3.6 ขั้นตอนการทดลองประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25

1. ทำการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25 ตามขั้นตอนที่ 3.3.4 โดยชั่งน้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic balance) ก่อนและหลังการทดลอง เพื่อวัดมวลที่เปลี่ยนไปเมื่อเกิดปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
2. ทำการคายซับ (Desorption) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากคายซับแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาจะเขียนย่อในรูป LHCAO25Cx โดย x แทนจำนวนรอบของการคายซับ
3. ทำการทดลองตามข้อที่ 1 และ 2 จนครบ 7 รอบการทดลอง

## 3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 3.4.1 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography; GC)

แก๊สโครมาโทกราฟีถูกใช้สำหรับระบุองค์ประกอบและปริมาณของแก๊สต่างๆที่เกิดขึ้นจากแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับและการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ รุ่นที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ Shimadzu GC-2014 โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สตัวอย่าง

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

#### 3.4.2 เอกซ์เรย์ดิฟแฟลกชันสเปคโตรสโคปี (X-ray diffraction spectroscopy; XRD)

เทคนิค XRD ถูกใช้สำหรับระบุวัฏภาค (Phase) ที่เกิดขึ้นในตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งก่อนและหลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สซิฟเคชันด้วยไอน้ำ รุ่นที่ใช้คือ Philips X'pert diffractometer โดยใช้รังสีคอปเปอร์ (Copper) และอัลฟาโพแทสเซียม (K) ความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตรที่ถูกสร้างจากความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ด้วยกระแส 20 ไมโครแอมแปร์ อัตราการวิเคราะห์เท่ากับ  $12^\circ (2\theta)$  ต่อนาที และเก็บข้อมูลดิฟแฟรกโตแกรมจาก  $15^\circ (2\theta)$  ถึง  $65^\circ (2\theta)$

#### 3.4.3 ไนโตรเจนฟิซิชอร์ปชันเมเชอร์เมนต์ (Nitrogen physisorption measurement; BET)

เทคนิค BET ถูกใช้สำหรับวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุนของตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา รุ่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ASAP 2020 Micromeritics Instrument Corporation ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ  $-196$  องศาเซลเซียสในไนโตรเจนเหลวหลังจากทำการกำจัดแก๊ส (Degassing) ที่อุณหภูมิ  $300$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

#### 3.4.4 สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Scanning electron microscopy; SEM)

เทคนิค SEM ถูกใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (Morphology) ของตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา รุ่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ JSM-IT500HR ของ JEOL InTouchScope™ กำลังขยายมีค่าเท่ากับ 20,000 เท่าตัว

#### 3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติของไบอ้อย

ไบอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะถูกวิเคราะห์ด้วย 2 เทคนิคได้แก่ การวิเคราะห์แบบปริมาณ (Proximate analysis) และวิเคราะห์แบบแยกธาตุองค์ประกอบ (Ultimate analysis) การวิเคราะห์แบบปริมาณจะวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณความชื้น ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุองค์ประกอบจะวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ CHN analyzer รุ่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ CHN-2000 ของ Leco โดยองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้คือคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ส่วนองค์ประกอบของออกซิเจนเกิดจากการตุลมวลสารบนสมมติฐานว่าปริมาณที่เหลือทั้งหมดของผลวิเคราะห์คือปริมาณของออกซิเจน

### 3.4.6 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับวิเคราะห์ได้จากกราฟเส้นโค้งเบรคทรู (Breakthrough curve analysis) ของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปรากฏในถุงเก็บแก๊สทั้ง 10 ถุง กราฟเส้นโค้งเบรคทรูเป็นกราฟที่พลอตระหว่างปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยมิลลิโมลต่อกรัม ใบบ่อยต่อระยะเวลา ดังนั้นพื้นที่เหนือกราฟเส้นโค้งเบรคทรูแทนปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ ปริมาณที่ถูกดูดซับคำนวณได้จากการทดลองที่มีตัวดูดซับหักลบกับปริมาณจากการทดลองที่ไม่มีตัวดูดซับ (Blank test) โดยพื้นที่เหนือกราฟเส้นโค้งเบรคทรูสามารถคำนวณได้จากโปรแกรม OriginLab

### 3.5 ตัวแปรที่ศึกษา

ในการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สซิฟิเคชันของใบบ่อยด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับโดยใช้  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  มีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวดูดซับ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  ได้แก่ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส
- อัตราส่วนผสมร้อยละโดยมวลของ MgO ใน  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  ได้แก่ร้อยละ 25 50 และ 75
- อัตราส่วนผสมร้อยละโดยมวลของ CaO ใน  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  ได้แก่ร้อยละ 25 50 และ 75
- อุณหภูมิแก๊สซิฟิเคชัน ได้แก่ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวแปรที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต ผลเชิงเร่งปฏิกิริยารวมถึงผลเสริมกัน (Synergistic effect) ของ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  ต่อแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย อุณหภูมิแกซีฟิเคชันที่เหมาะสมต่อการดำเนินการแกซีฟิเคชันของไบอ้อยด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ และการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกเป็น 7 ส่วนดังต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไบอ้อย
2. ผลของการสังเคราะห์และความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต
3. ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของแมกนีเซียมออกไซด์และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส
4. ผลของอุณหภูมิแกซีฟิเคชัน อัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ ต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย
5. ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส
6. ผลของอุณหภูมิแกซีฟิเคชัน อัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ ต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย
7. ประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อย

จากความสำคัญทางเศรษฐกิจและปริมาณใบอ้อยที่มากเพียงพอต่อการนำมาประยุกต์ใช้เป็นพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ใบอ้อยจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณบนฐานข้อมูลที่ได้รับมาของใบอ้อย (Proximate analysis, as received basis) พบว่าใบอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยมีองค์ประกอบของสารระเหยที่สูงมากถึงร้อยละ 69.5 โดยน้ำหนักและมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและเถ้าต่ำเพียงร้อยละ 12.9 และ 7.6 โดยน้ำหนักตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมต่อการนำใบอ้อยมาใช้ศึกษาแกซีฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้มีเพียงสารระเหยที่เกิดจากไพโรไลซิสในเตาปฏิริยาชั้นแรกเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ชั้นที่สอง ผลิตภัณฑ์ชาร์และเถ้าที่เกิดขึ้นจะติดอยู่บริเวณรอยคอดในเครื่องปฏิกรณ์ชั้นแรก ชีวมวลที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้จึงควรมีปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวต่ำ เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุองค์ประกอบบนฐานแห้งไร้เถ้า (Ultimate analysis, Dry and ash-free basis) พบว่าองค์ประกอบหลักของใบอ้อยได้แก่คาร์บอนร้อยละ 51.8 โดยมวล และองค์ประกอบของออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน เท่ากับร้อยละ 38 9.3 และ 0.9 โดยมวลตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณบนฐานข้อมูลที่ได้รับมาของใบอ้อย (Proximate analysis, as received basis)

องค์ประกอบ (Compositions)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%)
ความชื้น (Moisture content)	10.0
เถ้า (Ash)	7.6
สารระเหย (Volatile)	69.5
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	12.9

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุองค์ประกอบบนฐานแห้งไร้เถ้า (Ultimate analysis, Dry and ash-free basis)

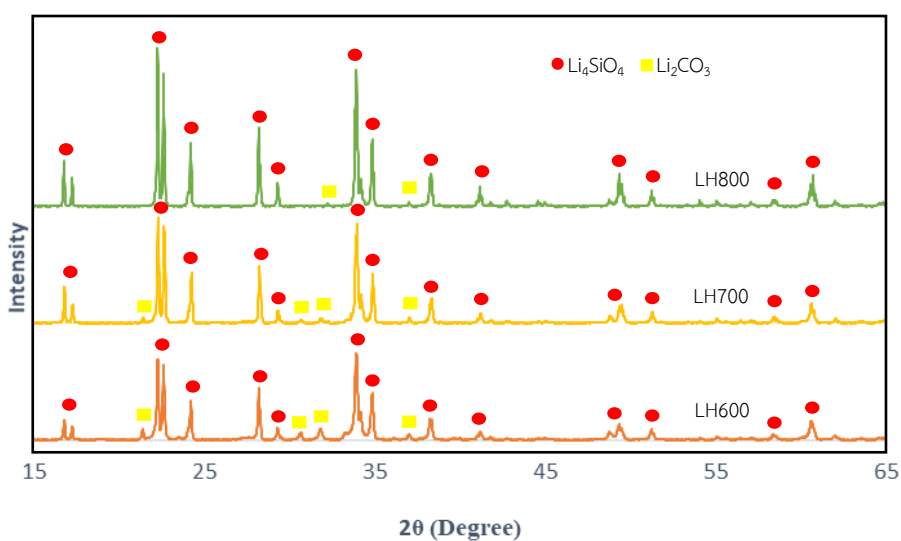
องค์ประกอบ (Compositions)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%)
คาร์บอน (Carbon)	51.8
ไฮโดรเจน (Hydrogen)	9.3
ไนโตรเจน (Nitrogen)	0.9
ออกซิเจน (Oxygen)	38



## 4.2 ผลของการสังเคราะห์และความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต

### 4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้

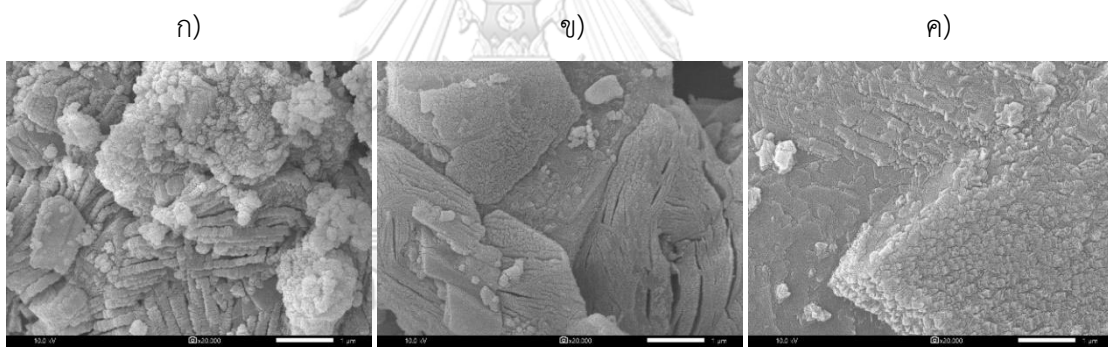
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลิด-สเตทพอรานฟอร์มชันโดยใช้ลิเทียมไฮดรอกไซด์และฟลูมซิลิกาเป็นสารตั้งต้นที่อุณหภูมิการเผาเท่ากับ 600 (LH600) 700 (LH700) และ 800 (LH800) องศาเซลเซียส ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อระบุวัฏภาคที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LH600 LH700 และ LH800

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า ทุกอุณหภูมิการเผาในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับจะปรากฏพีคความเข้ม (Intensity peak) ของวัฏภาคลิเทียมอโทซิลิเกต (Lithium orthosilicate:  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์สามารถสังเคราะห์ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ลิเทียมไฮดรอกไซด์จะเริ่มสลายตัวกลายเป็นวัฏภาคกัมมันต์ (Reactive phase) หรือวัฏภาคของลิเทียมออกไซด์ (Lithium oxide;  $\text{Li}_2\text{O}$ ) เพื่อทำปฏิกิริยากับซิลิกาออกไซด์ (Silica oxide;  $\text{SiO}_2$ ) [18] แต่จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาต่ำจะส่งผลให้เกิดวัฏภาคของลิเทียมคาร์บอเนต (Lithium carbonate:  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) ในความเข้มที่เด่นชัดกว่า กล่าวคือความบริสุทธิ์ของลิเทียมอโทซิลิเกตที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าต่ำกว่าการเผาที่อุณหภูมิสูง และจะสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิการเผาต่ำจะมีความกว้างของพีคความเข้มที่สูงกว่าที่อุณหภูมิการเผาสูง บ่งบอกได้ว่าที่อุณหภูมิการเผาต่ำจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ต่ำกว่าการเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ LH600 LH700 และ LH800 ที่คำนวณได้จากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) มีค่าเท่ากับ 663 810.9 และ 938.3 อังสตรอม

(Angstrom) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอนุภาคที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ผลึกของวัสดุภาคกัมมันต์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น การเพิ่มขึ้นของขนาดผลึกเฉลี่ยนี้อาจส่งผลต่อการรวมกลุ่มของขนาดอนุภาค (Particle size) ที่ใหญ่ขึ้น และส่งผลต่อความสามารถและอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากพื้นผิวกัมมันต์มีค่าลดต่ำลง [24] ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตที่เตรียมด้วยอนุภาคนาโน 600 700 และ 800 องศาเซลเซียสด้วยเทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.2 พบว่า พื้นผิวของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตที่อนุภาคนาโนเตรียมสูงจะมีลักษณะพื้นผิวที่ราบเรียบกว่าตัวดูดซับที่เตรียมที่อนุภาคนาโนต่ำกว่า จะสังเกตได้ว่าลักษณะพื้นผิวของลิเทียมอโทซิลิเกตที่อนุภาคนาโน 600 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.2ก. จะมีลักษณะพื้นผิวเป็นริ้ว ไม่มีรูพรุน และคล้ายตัวกาวลิเทียมอโทซิลิเกตที่เตรียมที่อนุภาคนาโน 700 และ 800 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวของลิเทียมอโทซิลิเกตที่อนุภาคนาโน 800 องศาเซลเซียสจะพบว่าพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะการจัดเรียงตัวที่ราบเรียบและอัดแน่นกว่าอนุภาคนาโนเตรียมอื่นๆ ลักษณะสัญญาณเช่นนี้อาจส่งผลต่อขั้นตอนการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แกนกลางของตัวดูดซับและส่งผลต่ออัตราการดูดซับรวมไปถึงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถดูดซับได้ [23]



รูปที่ 4.2 ลักษณะสัญญาณของตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เตรียมที่อนุภาคนาโนเท่ากับ ก) 600 องศาเซลเซียส ข) 700 องศาเซลเซียส และ ค) 800 องศาเซลเซียส

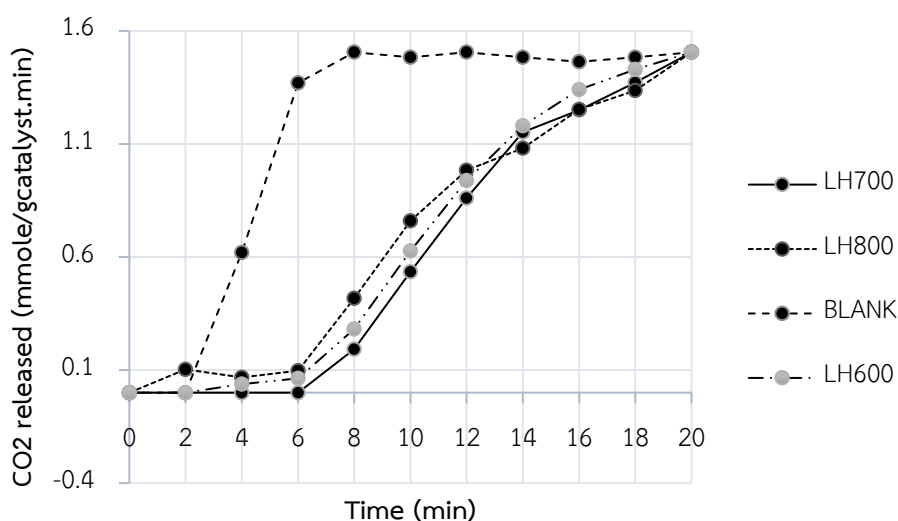
ตารางที่ 4.3 พื้นผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของ LH600 LH700 และ LH800 ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

ชนิดตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)
LH600	9.5044	0.015084	63.4841
LH700	5.9881	0.006326	42.2566
LH800	4.2832	0.002121	19.8038

ตารางที่ 4.3 แสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของ LH600 LH700 และ LH800 ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET พบว่าผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สัณฐานของตัวดูดซับด้วยเทคนิค SEM ที่อุณหภูมิการเตรียมตัวดูดซับ 600 องศาเซลเซียสจะมีพื้นที่ผิวสูงที่สุดเท่ากับ 9.5044 ตารางเมตรต่อกรัม และโครงสร้างของรูพรุนจะมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous structure) เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร [25] เมื่ออุณหภูมิในการเตรียมตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 600 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนมีค่าลดลง และรูพรุนจะมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous structure)

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

รูปที่ 4.3 แสดงกราฟเส้นโค้งเบรคทรูของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยของ LH600 LH700 LH800 และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) โดยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับได้คำนวณได้จากพื้นที่เหนือกราฟของเส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับหักลบกับพื้นที่เหนือกราฟเส้นโค้งเบรคทรูของการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา [26] ซึ่งคำนวณได้จากโปรแกรม OriginLab

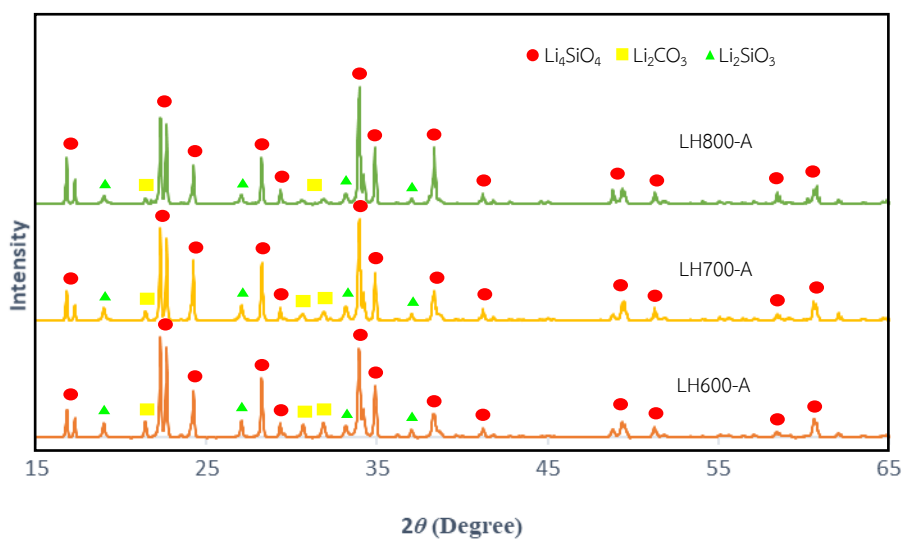


รูปที่ 4.3 กราฟเส้นโค้งเบรคทรูของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยของ LH600 LH700 LH800 และ Blank

ตารางที่ 4.4 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับของ LH600 LH700 และ LH800

ตัวดูดซับ	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ	
	(มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)	(มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ)
LH600	462.13	10.04
LH700	509.45	11.11
LH800	444.38	9.64

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับของ LH600 LH700 และ LH800 ที่คำนวณได้จากกราฟเส้นโค้งเบรคทรูของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อย พบว่า LH700 มีแนวโน้มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงที่สุดเท่ากับ 509.45 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ จะเห็นว่าลิเทียมอโทซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์ สันนิษฐานได้ว่าเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัฏภาคอื่นในกระบวนการอาทิ ปฏิกิริยาระหว่างลิเทียมเมตาซิลิเกตและคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น [24] ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบของตัวดูดซับ LH600 LH700 และ LH800 หลังการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดังรูปที่ 4.4 พบว่าสัดส่วนของความเข้มของพีคิลิเทียมคาร์บอเนตต่อความเข้มของพีคิลิเทียมอโทซิลิเกตมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยลิเทียมคาร์บอเนตเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทซิลิเกตแล้วเกิดเป็นวัฏภาคของลิเทียมเมตาซิลิเกต (Lithium metasilicate:  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ) และลิเทียมคาร์บอเนตดังสมการที่ 2.19 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผาในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับส่งผลต่อโครงสร้างและประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์



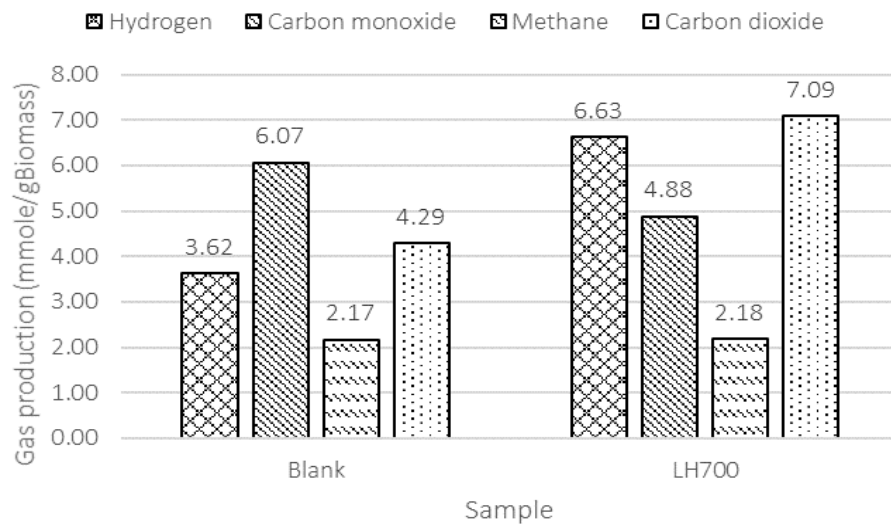
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของตัวดูดซับ LH600 LH700 และ LH800 หลังการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

#### 4.2.3 ผลของ LH700 ต่อแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

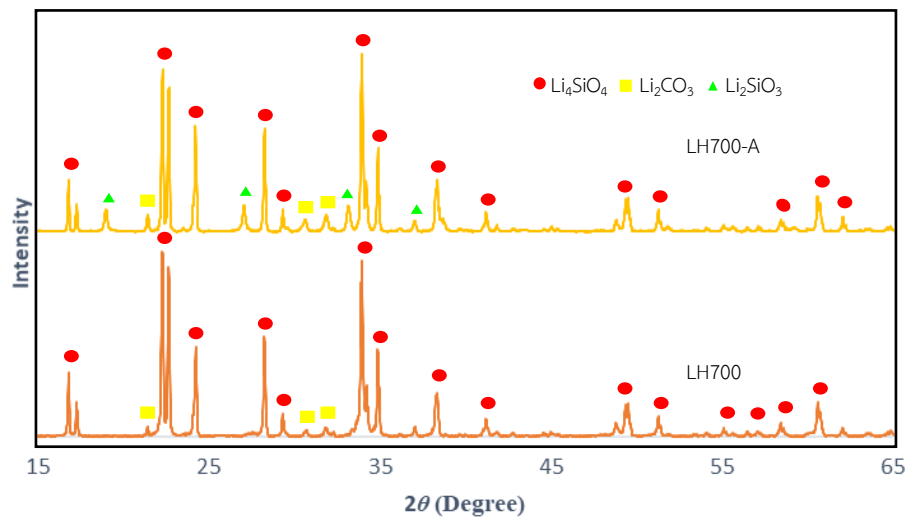
รูปที่ 4.5 แสดงผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ LH700 และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้ลิเทียมออกโทซิลิเกตในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยจะส่งผลให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาผลได้ของแก๊สสังเคราะห์จะพบว่าผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LH700 มีค่าเท่ากับ 20.78 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย มีค่าเพิ่มขึ้น 4.64 มิลลิโมลเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มขึ้นของผลได้ของผลิตภัณฑ์นี้สามารถสันนิษฐานได้จากคุณสมบัติความเป็นเบส (Basicity) ของ LH700 ซึ่งส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) อาทิปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก (Steam reforming of light hydrocarbons) [21, 22, 25, 27, 28] ส่งผลให้ปริมาณของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของมีเทนที่แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขึ้นของผลได้ขององค์ประกอบอื่นๆ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ LH700 มีผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารระเหยจากขั้นตอนไพโรไลซิส ส่งผลให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

ประเด็นที่น่าสนใจของการเพิ่ม LH700 ลงในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำคืออิทธิพลของ LH700 ที่มีต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส เมื่อทำการเปรียบเทียบกับทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะเห็นว่าผลได้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น 3.01 และ 2.8 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ ผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง 1.19 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย ขณะที่ผลได้ของมีเทนแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง การเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์สามารถอธิบายได้จาก 2 สาเหตุหลัก สาเหตุแรกคือผลเชิงเร่งปฏิกิริยาเคมี และสาเหตุที่สองคือการเพิ่มขึ้นจากสมดุลที่เปลี่ยนไปของปฏิกิริยาชิฟต์ตามสมการที่ 2.14 ซึ่งเกิดขึ้นจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LH700 ตามสมการที่ 2.18 [18, 29] เกิดการเลื่อนไปข้างหน้าของสมดุลของปฏิกิริยาชิฟต์ ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้นขณะที่ผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง และจากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มสูงขึ้นมีค่าสูงกว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้น สาเหตุหนึ่งคือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนถูก LH700 ดูดซับไว้ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า LH700 มีส่วนช่วยเพิ่ม (Enhanced) ปริมาณผลได้ของไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LH700 สามารถยืนยันได้ด้วยผลวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LH700 และ LH700-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส พบว่า LH700 หลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (LH700-A) ปรากฏพิกความเข้มของลิเทียมเมตาซิลิเกตและลิเทียมคาร์บอเนต แต่จะเห็นว่าพิกของลิเทียมอโทซิลิเกตปรากฏในสัดส่วนความเข้มที่สูง แสดงถึงการปรากฏของวัฏภาคลิเทียมอโทซิลิเกตในปริมาณมาก อาจเป็นผลมาจากภาวะที่ใช้ในการดำเนินการยังไม่เหมาะกับการดูดซับของ LH700 ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.5 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ LH700 และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

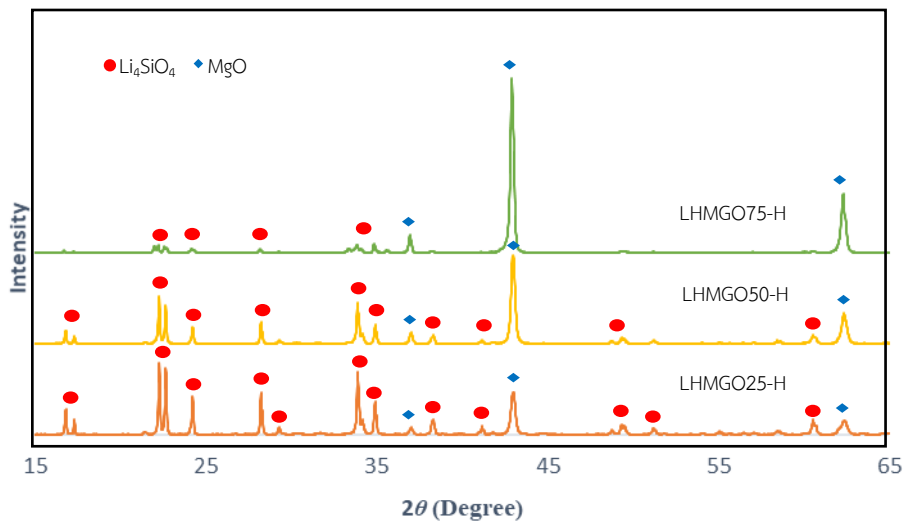


รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์หัตถุภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LH700 และ LH700-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

### 4.3 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของแมกนีเซียมออกไซด์และ $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

#### 4.3.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$

LHMGO ถูกสังเคราะห์โดยใช้วิธีผสมทางกายภาพ (Physical mixing) ระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์และตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตด้วยวิธีการบด (Mechanically ground) และผ่านการปรับสภาพ (Pretreatment) ด้วยอุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินการในบรรยากาศของอาร์กอน เป็นเวลา 30 นาที ก่อนเริ่มดำเนินการทดลอง ตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO25 LHMGO50 และ LHMGO75 ถูกวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของตัวดูดซับ LHMGO25 LHMGO50 และ LHMGO75 หลังการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะเห็นได้ว่าสัดส่วนพีคความเข้มของแมกนีเซียมออกไซด์ต่อพีคความเข้มของลิเทียมอโทซิลิเกตมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น และตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการปรับสภาพด้วยความร้อนไม่มีการปรากฏของวัฏภาคสารประกอบใหม่ขึ้นมา แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกันและยังคงอยู่ในวัฏภาคของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์เช่นเดิม



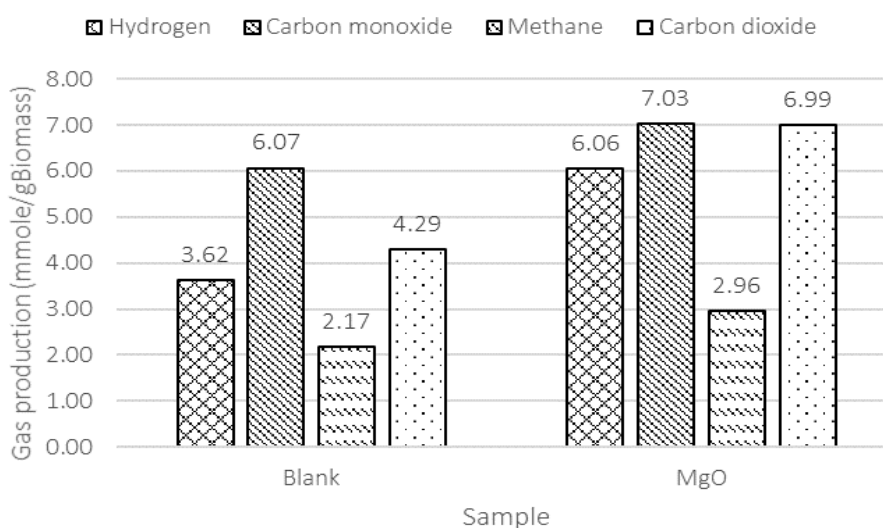
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของตัวดูดซับ LHMGO25 LHMGO50 และ LHMGO75 หลังการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



#### 4.3.2 ผลของแมกนีเซียมออกไซด์ต่อแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย

รูปที่ 4.8 แสดงผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลองแมกนีเซียมออกไซด์และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแก๊สฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลองแมกนีเซียมออกไซด์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกับการทดลองลิเทียมอโทซิลิเกต กล่าวคือผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆองค์ประกอบ ผลได้ของไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้น 2.44 2.7 0.96 และ 0.79 มิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อยตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่าสิ่งที่แตกต่างจากการทดลองลิเทียมอโทซิลิเกตคือปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์ไม่เกิดปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์หรือปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันดังสมการที่ 4.1 เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวจะมีสภาพอ่อนไหวต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิในช่วง 300 ถึง 450 องศาเซลเซียส และเกิดการคายซับได้ง่ายที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส [20, 30] ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาฟิเคชันมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าการทดลองลิเทียมอโทซิลิเกต จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มาจากผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของแมกนีเซียมออกไซด์เพียงอย่างเดียว

ปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแมกนีเซียมออกไซด์ :



รูปที่ 4.8 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของแมกนีเซียมออกไซด์และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแก๊สฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

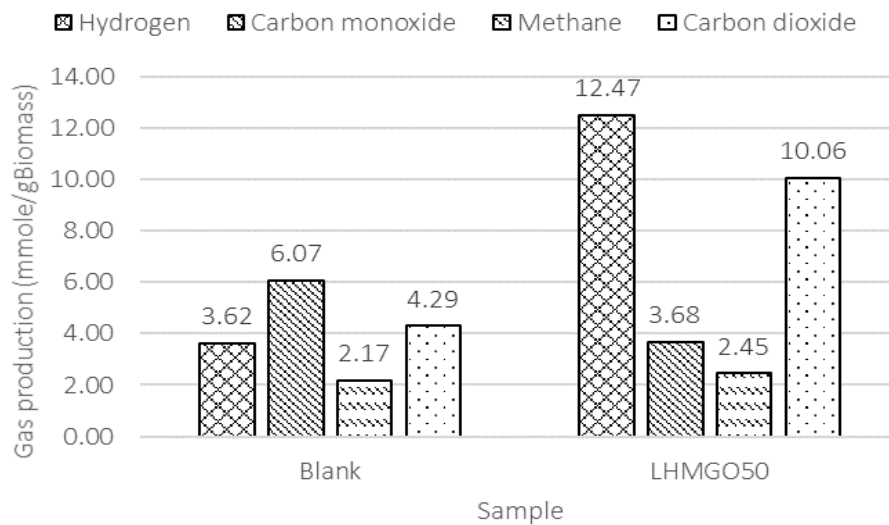
#### 4.3.3 ผลของ LHMGO50 ต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

รูปที่ 4.9 แสดงผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ LHMGO50 และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่า LHMGO50 มีผลอย่างมากต่อผลได้และองค์ประกอบภายในของผลิตภัณฑ์แก๊ส ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในการทดลองที่มี LHMGO50 มีค่าสูงถึง 28.66 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย เพิ่มสูงขึ้นถึง 12.52 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มขึ้นอย่างมากของผลิตภัณฑ์แก๊สนี้สามารถสันนิษฐานได้จากผลเชิงเร่งปฏิกิริยาเคมีที่เสริมกันของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ที่สูงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์และ LH700 มีคุณสมบัติเป็นเบสจึงมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันและดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ต่างๆ ที่เกิดในแกซิฟิเคชันได้ดียิ่งขึ้น [22, 25] ซึ่งข้อสันนิษฐานนี้สามารถยืนยันได้จากปริมาณความเข้มข้นของมีเทนที่ลดลงในการทดลอง LHMGO50 เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและการทดลองที่มี LHMGO50 มีค่าความเข้มข้นของมีเทนเท่ากับร้อยละ 13.44 โดยปริมาตร และร้อยละ 8.55 โดยปริมาตรตามลำดับ

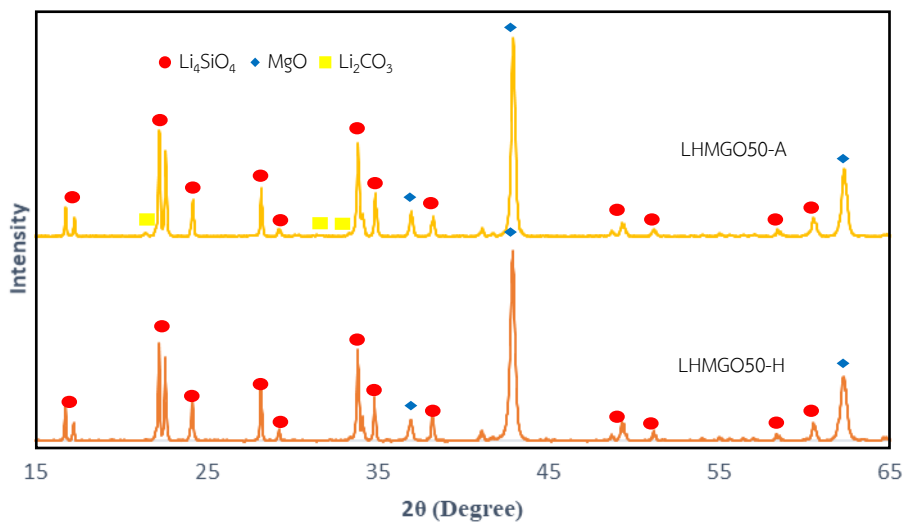
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง LHMGO50 กับการทดลองแมกนีเซียมออกไซด์จะเห็นได้ว่า ผลได้ของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น 6.41 และ 3.07 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ ขณะที่ผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนมีค่าลดลง 3.35 และ 0.51 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของผลได้ของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลอง LHCAO50 มีค่าเพิ่มสูงกว่าการทดลอง LH700 มาก อาจเป็นผลมาจากผลของการเสริมกันต่อการเร่งปฏิกิริยาของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ อีกหนึ่งสาเหตุคือการเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออกโทซิลิเกตหรือปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (Carbonation) ของลิเทียมออกโทซิลิเกตตามสมการที่ 2.18 ที่เพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น สันนิษฐานได้จากปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดต่ำลงกว่าการทดลอง LH700 และปริมาณผลต่างของผลได้ที่เพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาชิฟต์เลื่อนไปข้างหน้า ทำให้ปริมาณไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าต่ำลงเนื่องจากถูกใช้ในปฏิกิริยาชิฟต์ [18, 29] การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นคาดได้ว่าเป็นผลมาจากปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มสูงมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

แต่จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ปริมาณไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้น มีค่ามากกว่าปริมาณที่ลดลงของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นอย่างมาก อีกข้อสังเกตหนึ่งคือปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปรากฏในผลิตภัณฑ์แก๊สมีความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 35.11 โดยปริมาตร ซึ่งมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 26.56 โดยปริมาตร แสดงให้เห็นว่าปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากผลเร่ง

ปฏิกิริยาของ LHMGO50 มากกว่าการทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ช่วยเพิ่มผลได้ของไฮโดรเจนผ่านทางปฏิกิริยาซิฟต์ ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50 หลังปรับสภาพ (LHMGO50-H) และ LHMGO50-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.10 สามารถใช้ยืนยันการอธิบายดังกล่าวได้ จะเห็นได้ว่าวัฏภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50 มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50 หลังการปรับสภาพ กล่าวคือมีพีคความเข้มของลิเทียมคาร์บอเนตปรากฏอยู่ในความเข้มที่ต่ำมาก



รูปที่ 4.9 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ LHMGO50 และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50 หลังปรับสภาพ (LHMGO50-H) และ LHMGO50-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

#### 4.4 ผลของอุณหภูมิแกซีฟิเคชัน อัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

4.4.1 ผลของอัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

อัตราส่วนผสมระหว่าง LH700 และแมกนีเซียมออกไซด์ถูกนำมาศึกษาในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยเพื่อศึกษาผลของการทำงานร่วมกัน (Synergistic) และอิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อผลได้และองค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส แมกนีเซียมออกไซด์ถูกผสมกับ LH700 ด้วยวิธีการผสมทางกายภาพหรือการบดด้วยมือเป็นเวลา 30 นาทีด้วยอัตราส่วนผสมร้อยละ 25 50 และ 75 โดยมวล

ตารางที่ 4.5 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา LH700 LHMGO25 LHMGO50 LHMGO75 และแมกนีเซียมออกไซด์ต่อแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยในหน่วยมิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย

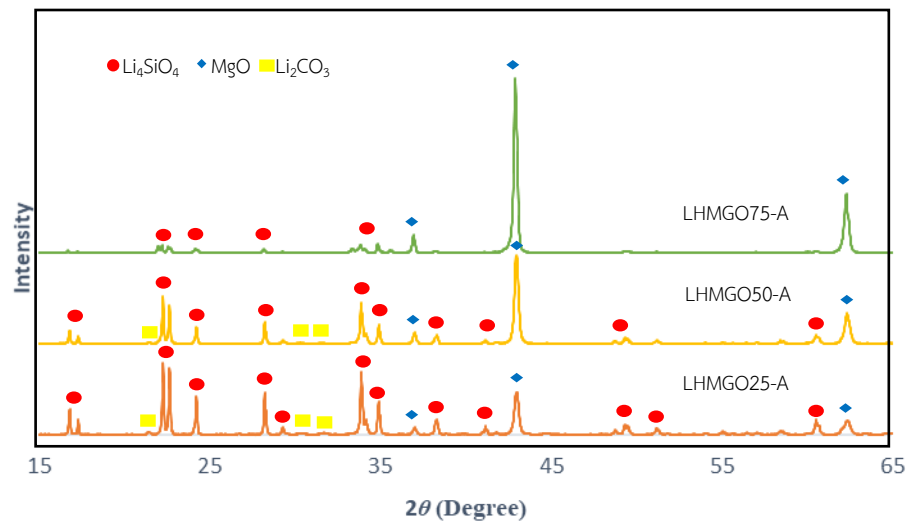
องค์ประกอบ	LH700	LHMGO25	LHMGO50	LHMGO75	MgO
ไฮโดรเจน	6.63	10.21	12.47	9.43	6.06
คาร์บอนมอนอกไซด์	4.88	4.19	3.68	5.21	7.03
มีเทน	2.18	2.55	2.45	2.37	2.96
คาร์บอนไดออกไซด์	7.09	7.60	10.06	7.47	6.99
รวม	20.78	24.55	28.66	24.48	23.04

ตารางที่ 4.5 แสดงผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา LH700 LHMGO25 LHMGO50 LHMGO75 และแมกนีเซียมออกไซด์ต่อแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยในหน่วยมิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย จะเห็นได้ว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมจากการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 อัตราส่วนผสมมีค่าสูงกว่าการทดลอง LH700 หรือแมกนีเซียมออกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น มีค่าสูงสุดที่ปริมาณแมกนีเซียมเท่ากับร้อยละ 50 โดยมวล ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าที่อัตราส่วนผสมของแมกนีเซียมออกไซด์เท่ากับร้อยละ 50 โดยมวลมีปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกตที่พอเหมาะต่อผลเชิงเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงมากขึ้น และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นก่อให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทซิลิเกตที่สูงมากยิ่งขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลอง LHMGO25 และ LHMGO50 พบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมของการทดลอง LHMGO25 มีค่าต่ำกว่าการทดลอง LHMGO50 4.11 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย เนื่องจาก LHMGO25 มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ที่น้อยกว่าส่งผลให้ความสามารถเชิงเร่งปฏิกิริยาต่ำลง และจะเห็นได้ว่าปริมาณผลได้คาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลอง LHMGO25 น้อยกว่าการทดลอง LHMGO50 2.46 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยเนื่องจาก LHMGO25 มีปริมาณ LH700 ภายในตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า ส่งผลให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า ข้อเสนอพื้นฐานดังกล่าวสามารถยืนยันได้ด้วยผลวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHMGO25 และ LHMGO50 หลังแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าสัดส่วนความเข้มของพีคที่เทียบคาร์บอนต่อลิเทียมออกโทซิลิเกตใน LHMGO25 มีค่าสูงกว่า LHMGO50 แสดงถึงปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าในตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO25 และอีกหลักฐานหนึ่งคือปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลอง LHMGO50 มีค่าสูงกว่า LHMGO25 โดยในการทดลอง LHMGO25 และ LHMGO50 มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 30.96 และ 35.11 โดยปริมาตรตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณผลได้ไฮโดรเจนจากการทดลองของ LHMGO25 และ LHMGO50 พบว่าการทดลอง LHMGO50 มีค่ามากกว่าการทดลอง LHMGO25 2.26 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย ซึ่งคาดได้ว่าเป็นผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น และจะสังเกตได้ว่าปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มสูงขึ้นมีค่ามากกว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดลงเป็นอย่างมาก จะเห็นได้ว่าปริมาณมีเทนในการทดลอง LHCAO50 มีค่าลดลง 0.1 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง LHCAO25 แสดงให้เห็นถึงผลจากการเร่งปฏิกิริยามากกว่าผลจากการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาซิฟต์ นอกจากนี้ ปริมาณมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LHMGO50 มีปริมาณและความเข้มข้นต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง LHMGO25 โดยในการทดลอง LHMGO25 และ LHMGO50 มีความเข้มข้นของมีเทนเท่ากับร้อยละ 10.39 และ 8.54 โดยปริมาตรตามลำดับ เป็นผลมาจากปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ที่มากขึ้นในตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของมีเทน หรือปฏิกิริยาที่ 2.15 ได้มากยิ่งขึ้น [21, 22, 25, 27, 28]

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของ LHMGO50 และ LHMGO75 จะพบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลมาจากปริมาณไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลอง LHMGO75 ลดลง 3.04 และ 2.59 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง LHMGO50 การลดลงของทั้งสององค์ประกอบนี้อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาซิฟต์ที่ลดลงเนื่องจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์หรือปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของลิเทียมออกโทซิลิเกตตามสมการที่ 2.18 [18, 29] เกิดได้น้อยลงเพราะปริมาณลิเทียมออกโทซิลิเกตในตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงและอาจจะเกิดจากปริมาณลิเทียมออกโทซิลิเกตที่

อยู่ภายในตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณไม่เพียงพอต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันสมมติฐานดังกล่าวได้จากปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นสูงถึง 1.53 มิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อยในการทดลอง LHMGO75 เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลอง LHMGO50 และจากผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHMGO50-A และ LHMGO75-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าสัดส่วนความเข้มข้นของพีคความเข้มข้นของลิเทียมออกโทซิลิเกตต่อแมกนีเซียมออกไซด์ของ LHMGO75 มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับการทดลอง LHMGO50 และแทบจะไม่มีการปรากฏของพีคความเข้มข้นของลิเทียมคาร์บอนเนตในตัวเร่งปฏิกิริยาหลังแกซีฟิเคชัน แสดงให้เห็นถึงปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงของ LHCAO75 จึงสามารถสรุปได้ว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สของ LHMGO75 ได้รับอิทธิพลจากการเร่งปฏิกิริยามากกว่าอิทธิพลของการเพิ่มของไฮโดรเจนจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHMGO25-A LHMGO50-A และ LHMGO75-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

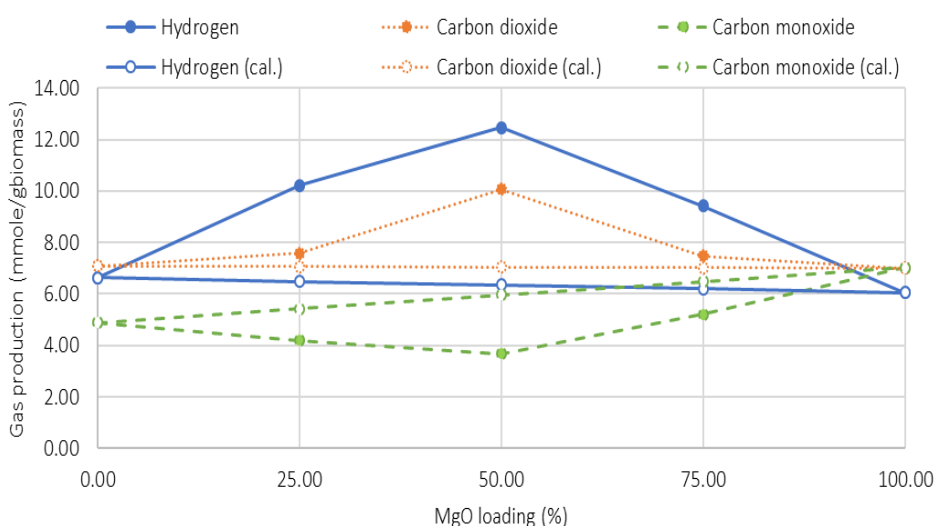
จากรูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมจากการทดลองและผลได้จากการทำนายด้วยสมการที่ 4.2 [26, 31] ซึ่งเป็นสมการประมาณการผลได้ที่ควรจะเกิดขึ้นในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลเสริมกันของ LH700 และแมกนีเซียมออกไซด์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าไฮโดรเจนที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่าค่าทำนายทุกอัตราส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงให้เห็นถึงการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพของ LH700 และแมกนีเซียมออกไซด์ในการกระตุ้นการผลิตไฮโดรเจนจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองทุกอัตราส่วนผสมมีค่าสูงกว่าค่าทำนาย แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลเชิงเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าอิทธิพลจากการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาซิปต์จากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO และเป็นหลักฐานยืนยัน

ได้ว่า LH700 และแมกนีเซียมออกไซด์มีคุณสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ในแกซีฟิเคชันได้ดียิ่งขึ้นเมื่อใช้งานร่วมกัน ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทำนายทุกอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาในสัดส่วนที่สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือค่าผลต่างของค่าจากการทดลองและค่าทำนายของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์สูง ค่าผลต่างของคาร์บอนมอนอกไซด์ก็มีแนวโน้มสูงเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นถึงผลเสริมกันของลิเทียมออกไซด์ลิเกดและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อการเพิ่มขึ้นของการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาซิฟต์

สมการทำนายผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สขององค์ประกอบต่างๆ :

$$Y_{\text{cal}} = X_{\text{LH700}} \times Y_{\text{LH700}} + (1 - X_{\text{LH700}}) \times Y_{\text{MgO}} \quad (4.2)$$

โดย  $Y_{\text{cal}}$  คือค่าผลได้ทำนาย  $X_{\text{LH700}}$  คือค่าอัตราส่วนโดยมวลของ LH700  $Y_{\text{LH700}}$  คือผลได้ของการทดลอง LH700 และ  $Y_{\text{MgO}}$  คือผลได้ของการทดลอง MgO



รูปที่ 4.12 ผลได้ของไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลอง (จุดทึบ) และผลได้จากการทำนาย (จุดโปร่ง)

#### 4.4.2 ผลของอุณหภูมิแกซีฟิเคชันต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

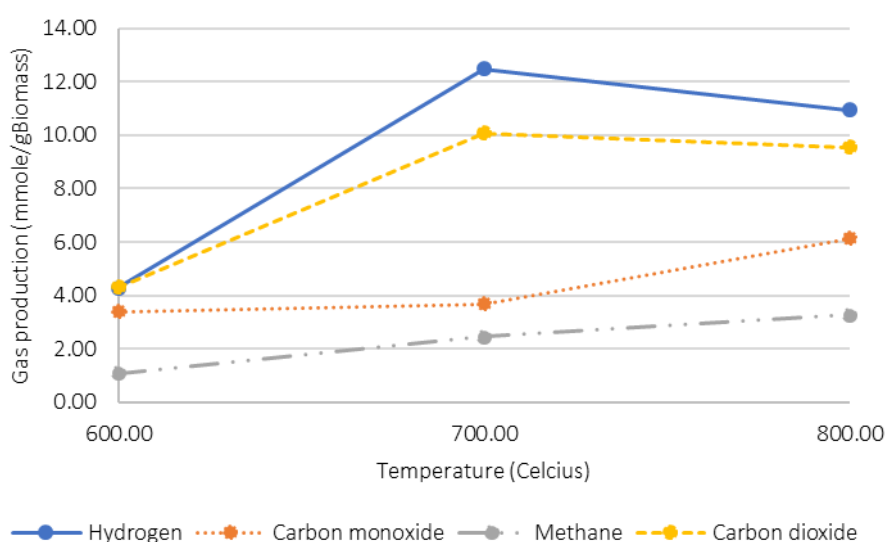
อุณหภูมิแกซีฟิเคชันถูกนำมาศึกษาในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยการดูดซับโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพเชิงเร่งปฏิกิริยาของ LHMGO50 รวมถึงศึกษาหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดำเนินกระบวนการ อุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.13 แสดงผลกระทบบของอุณหภูมิแกซิฟิเคชันต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ แก๊สจากแกซิฟิเคชันของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับโคบอลต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50 จะเห็นปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิแกซิฟิเคชันเพิ่มสูงขึ้น โดยผลิตภัณฑ์แก๊สรวมของการทดลองที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 600 700 และ 800 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 13.08 28.66 และ 29.89 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ แนวโน้มการเพิ่มสูงขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิมีผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส (Pyrolytic volatiles cracking) หรือเรียกได้ว่าปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) รวมถึงอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาฟอรัมมิงด้วยไอน้ำ และแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของสารระเหยที่ควบแน่นได้ เนื่องจากปฏิกิริยาทั้งสองเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) ส่งผลให้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น [21, 32, 33]

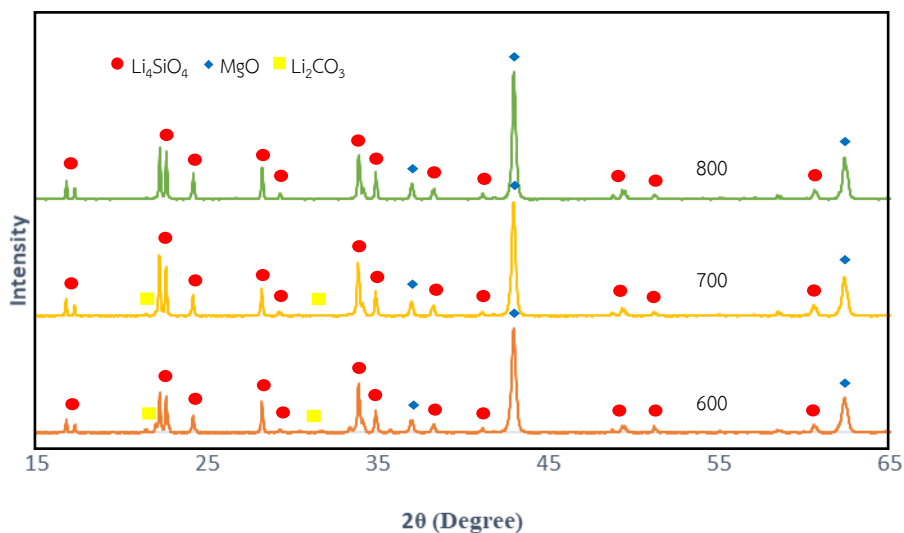
เมื่อทำการเปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลองที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สทุกองค์ประกอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลได้ของไฮโดรเจนมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดถึง 8.18 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย อธิบายได้ว่าปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มสูงขึ้นมาจากการแตกตัวด้วยความร้อนและผลเชิงเร่งปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันต่างๆที่มากยิ่งขึ้น สามารถยืนยันได้ด้วยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ปริมาณผลได้คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 5.75 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย จะเห็นว่าคาร์บอนไดออกไซด์มีการเพิ่มขึ้นที่น้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจน คาดได้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการจะถูกดูดซับด้วย LH700 ได้มากยิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิส่งผลต่ออัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออลิโทซิลิเกต [24] และส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาชิฟต์เลื่อนไปข้างหน้า ทำให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นเพียง 0.3 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบอื่นๆในผลิตภัณฑ์แก๊ส และจากผลวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50 หลังแกซิฟิเคชันดังรูปที่ 4.14 พบว่ามีการปรากฏของวัฏภาคลิเทียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออลิโทซิลิเกต แต่จะสังเกตเห็นว่าสัดส่วนความเข้มข้นของฟิสิกส์ลิเทียมคาร์บอเนตต่อลิเทียมออลิโทซิลิเกตมีค่าน้อยมาก จึงสรุปได้ว่าสาเหตุหลักของการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนจากการเพิ่มอุณหภูมิแกซิฟิเคชันในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียสคือการแตกตัวด้วยความร้อน และผลเชิงเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มสูงขึ้น



เมื่อทำการเปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลองที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าปริมาณผลได้และความเข้มข้นของมีเทนยังเพิ่มสูงขึ้น 0.83 มิลลิโมลต่อกรัมไบโอส้อย แต่จากแนวโน้มของผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณผลได้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนของการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสมีค่าลดต่ำลง 0.51 และ 1.53 มิลลิโมลต่อกรัมไบโอส้อยตามลำดับเมื่อ และคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น 2.45 มิลลิโมลต่อกรัมไบโอส้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาซิฟต์ เนื่องจากปฏิกิริยาซิฟต์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน [33] เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลต่อผลได้ของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก๊ส นอกจากนั้นยังกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลเสียต่อปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทซิลิเกต เนื่องจากในทางเทอร์โมไดนามิกส์ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของลิเทียมอโทซิลิเกตเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาซิฟต์ [29] เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนเนชัน (Decarbonation) หรือปฏิกิริยาการผันกลับของคาร์บอนเนชันของลิเทียมอโทซิลิเกตมีค่ามากกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน [18, 29] สามารถยืนยันได้ด้วยผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังแกซีฟิเคชันดังรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าพีคความเข้มของลิเทียมคาร์บอนเนตในตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสมีความเข้มที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการทดลองอื่น



รูปที่ 4.13 ผลกระทบของอุณหภูมิแกซีฟิเคชันต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันของไบโอส้อยที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับโคบอลต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LHMGO50



รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHMGO50-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส

#### 4.5 ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์และ $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สใน แกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

##### 4.5.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO

รูปที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 LHCAO25-H และ LHCAO25-A ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส พบว่าวัฏภาคองค์ประกอบของ LHCAO25 ที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วยลิเทียมออกโทซิลิเกตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่พบเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของแคลเซียมออกไซด์หรือปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับความชื้นในอากาศดังสมการที่ 4.3 เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์เป็นโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทออกไซด์ (Alkaline earth oxide) ซึ่งมีคุณสมบัติไวต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ ส่งผลให้แคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มเข้าไปใน LHCAO25 จะดูดความชื้นเข้าไประหว่างขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [21]

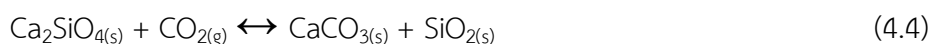
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ :



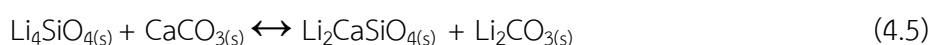
เมื่อ LHCAO25 ผ่านการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสในบรรยากาศของอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อกำจัดความชื้นและสิ่งปนเปื้อนในตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป (LHCAO25-H) จะพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของ LHCAO25 เกิดขึ้น กล่าวคือวัฏภาคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปวัฏภาคแคลเซียมออกไซด์จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) หรือปฏิกิริยาผันกลับของปฏิกิริยาที่ 4.3 เกิดเป็นวัฏภาคของแคลเซียมออกไซด์ขึ้นมา และจากผลการวิเคราะห์จะสังเกตได้ว่าแคลเซียมบางส่วนจะเกิดปฏิกิริยากับลิเทียมออกโทซิลิเกต เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate;  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) ขึ้นจากความร้อนที่ใช้ในการปรับสภาพ แคลเซียมซิลิเกตที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาและการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราสูงที่ช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียสและยังมีคุณลักษณะเด่นในด้านของประสิทธิภาพและการรักษาสภาพโครงสร้างหลังจากการนำกลับมาใช้ซ้ำอีกด้วย [34]

จากผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบของ LHCAO25 หลังจากถูกใช้ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยดังรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า ไม่มีการปรากฏของพีคความเข้มของแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ และปรากฏพีคความเข้มของลิเทียมแคลเซียมซิลิเกต (Lithium calcium silicate;  $\text{Li}_2\text{CaSiO}_4$ ) ขึ้นมาในความเข้มที่เด่นชัด นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าสัดส่วนความเข้มของพีคลิเทียมคาร์บอนเนตต่อความเข้มของพีคลิเทียมออกโทซิลิเกตมีค่าสูงชันมาก แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแคลเซียมออกโทซิลิเกตไปสู่วัฏภาคของลิเทียมแคลเซียมซิลิเกต และลิเทียมคาร์บอนเนตหลังจากการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 สามารถสันนิษฐานได้ดังนี้ [17] แคลเซียมซิลิเกตเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์หรือปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและเกิดผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมคาร์บอนเนตและซิลิกาออกไซด์ขึ้นดังสมการที่ 4.4

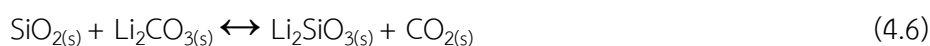
ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของแคลเซียมออกโทซิลิเกต:



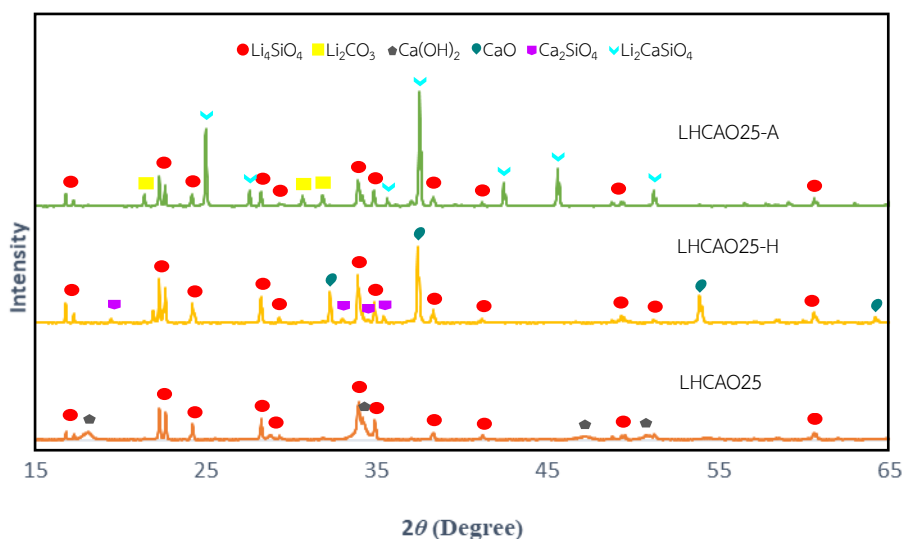
ในขณะเดียวกันลิเทียมออกโทซิลิเกตก็เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันกับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นสารประกอบของลิเทียมคาร์บอนเนตและลิเทียมเมตาซิลิเกตดังสมการที่ 2.18 นอกจากนี้ยังเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของแคลเซียมออกไซด์ดังสมการที่ 2.17 จากนั้นแคลเซียมคาร์บอนเนตที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับลิเทียมออกโทซิลิเกตที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ 4.5 เกิดเป็นสารประกอบของลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตและลิเทียมคาร์บอนเนต



แต่จะเห็นได้ว่า ซิลิกาออกไซด์ที่คาดว่าเกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ แคลเซียมซิลิเกตไม่ปรากฏพีคของความเข้มในผลการวิเคราะห์รังสีเอกซ์ สามารถอธิบายได้ว่าซิลิกาออกไซด์ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับลิเทียมคาร์บอเนตที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ 2.19 และ 4.5 ดังสมการที่ 4.6 เกิดเป็นสารประกอบของลิเทียมเมตาซิลิเกตและคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นมาแทน



จากกลไกการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 สามารถกล่าวได้ว่าแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยไปสู่ลิเทียมอโทซิลิเกต โดยอาศัยแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 มีค่าเพิ่มขึ้น [17]



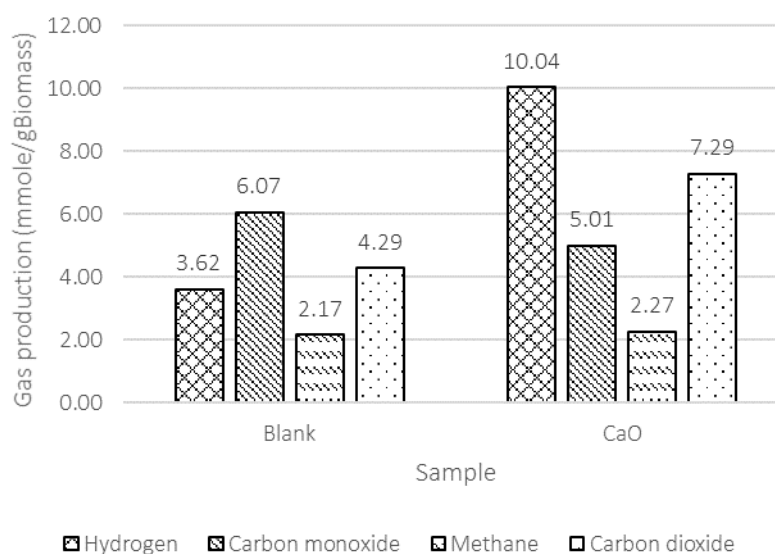
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์รังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 LHCAO25-H และ LHCAO25-A ที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

#### 4.5.2 ผลของแคลเซียมออกไซด์ต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

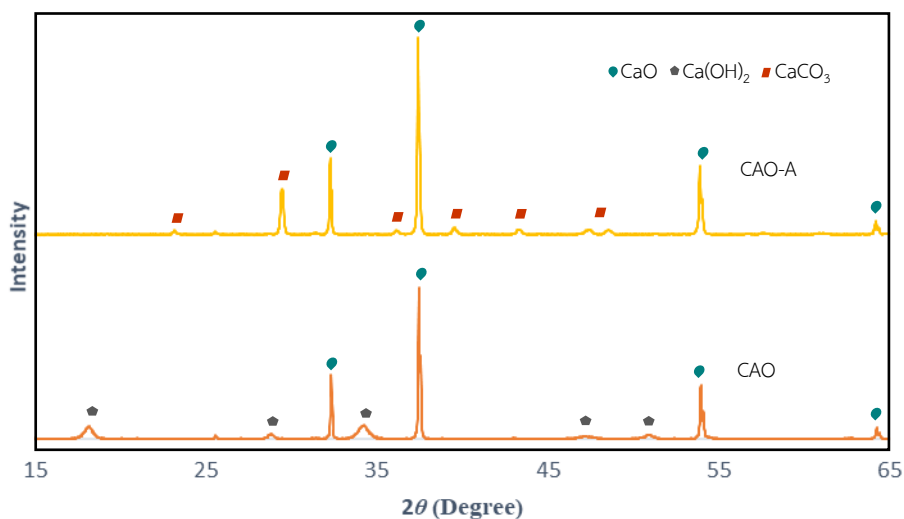
รูปที่ 4.16 แสดงผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของแคลเซียมออกไซด์และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา(blank) ที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์ส่งผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส กล่าวคือเมื่อแคลเซียมออกไซด์ถูกประยุกต์ใช้ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยส่งผลให้ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สรวมเพิ่มขึ้นจาก 16.14 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย ในการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 24.62 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย ผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นมากถึง 6.42 และ 3.01 มิลลิโมลต่อกรัม

ไบอ้อยตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่ง แต่จะเห็นได้ว่าปริมาณและความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ของการทดลองที่มีแคลเซียมออกไซด์ลดลง 1.06 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่ง

สาเหตุของการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนที่มากกว่าองค์ประกอบอื่นสามารถอธิบายได้จากเหตุผลดังนี้ สาเหตุแรกคือไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นเกิดขึ้นจากคุณสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของทาร์ รวมถึงเพิ่มผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สและผลได้ของไฮโดรเจน อีกสาเหตุหนึ่งคือแคลเซียมออกไซด์ไม่เพียงแต่มีผลเชิงเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ แต่ยังมีหน้าที่ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาซิฟตีในสมการที่ 2.14 ลดข้อจำกัดทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาและเลื่อนสมดุลไปข้างหน้าได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น [5, 21, 26, 33, 35-37] ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์วิฤภาคของแคลเซียมออกไซด์หลังจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยดังรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าวิฤภาคของแคลเซียมออกไซด์มีความเข้มที่ลดลงและปรากฏพิคความเข้มของแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้น แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์ตามสมการที่ 2.17



รูปที่ 4.16 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของแคลเซียมออกไซด์และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส



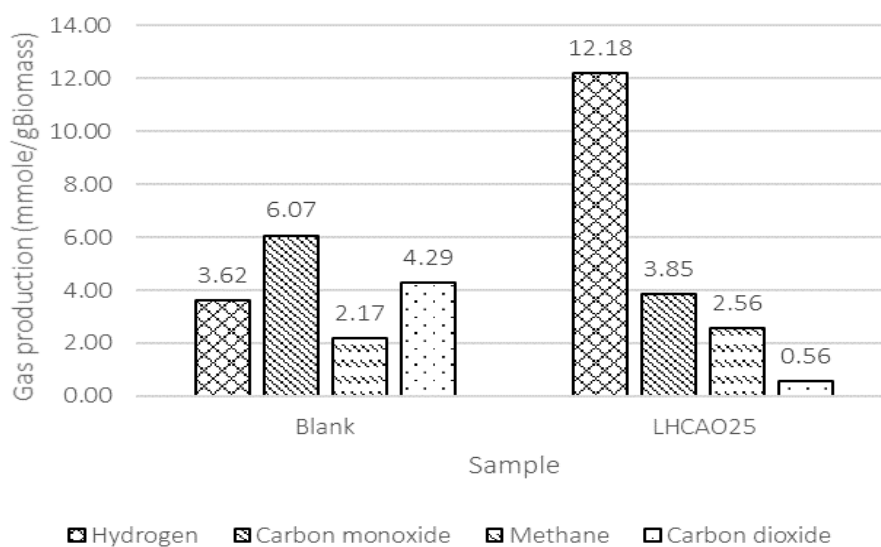
รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของแคลเซียมออกไซด์ก่อนและหลังแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

#### 4.5.3 ผลของ LHCAO25 ต่อแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

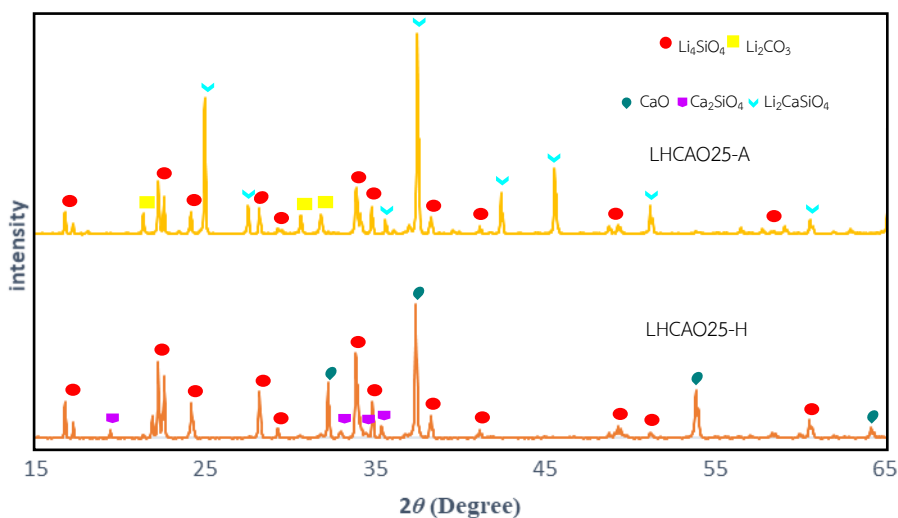
จากรูปที่ 4.18 แสดงผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ LHCAO25 และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าการเพิ่ม LHCAO25 ลงในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยมีผลกระทบอย่างมากต่อผลได้และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊ส ปริมาณผลได้รวมของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 3.01 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยเมื่อเพิ่ม LHCAO25 ลงในกระบวนการ ถึงแม้ว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปรากฏในการทดลอง LHCAO25 มีค่าเพียง 0.56 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย การเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมเป็นผลมาจากปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก

การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ชัดเจนคือปริมาณผลได้ของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ผลได้ของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง 3.73 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มเข้าไปใน LH700 ส่งผลเสริมกันอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 นอกจากนั้นแคลเซียมซิลิเกตที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปรับสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยายังมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง [34] จากกลไกการทำงานร่วมกันระหว่างแคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมออกไซด์ และลิเทียมอโทซิลิเกตที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4.2 ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 พัฒนาขึ้นเป็นอย่างมาก

ผลได้ของไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้นถึง 8.56 มิลลิโมลต่อกรัมไบโอมัส สามารถอธิบายสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนได้จากเหตุผลดังต่อไปนี้ สาเหตุแรกคือผลเชิงเร่งปฏิกิริยาที่เสริมกันของแคลเซียมออกไซด์และลิเทียมออกไซด์เกิดต่อปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันและรีฟอร์มมิงต่างๆ สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าการลดลงของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เป็นผลมาจากการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาซิฟิเคชัน อีกสาเหตุหนึ่งของการเพิ่มขึ้นของผลได้ไฮโดรเจนคือการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 กระตุ้นให้เกิดการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาซิฟิเคชันดังสมการที่ 2.14 ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น หลักฐานที่สนับสนุนข้อสันนิษฐานดังกล่าวคือปริมาณผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์ในการทดลองที่มี LHCAO25 มีค่าลดลง 2.22 มิลลิโมลต่อกรัมไบโอมัสเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 หลังการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบโอมัสดังแสดงในรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า LHCAO25 หลังแกซิฟิเคชันจะเกิดฟิสิกความเข้มของลิเทียมคาร์บอเนต ลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตในสัดส่วนที่ชัดเจน ซึ่งสารประกอบดังกล่าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 ตามกลไกที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4.2



รูปที่ 4.18 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ LHCAO25 และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Blank) ที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 หลังปรับสภาพและหลังแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

#### 4.6 ผลของอุณหภูมิแกซีฟิเคชัน อัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

##### 4.6.1 ผลของอัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

อัตราส่วนผสมระหว่าง LH700 และแคลเซียมออกไซด์ถูกนำมาศึกษาในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยเพื่อศึกษาผลของการทำงานร่วมกัน (Synergistic) และอิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อผลได้และองค์ประกอบภายในแก๊สสังเคราะห์ แคลเซียมออกไซด์ถูกผสมกับ LH700 ด้วยวิธีการผสมทางกายภาพหรือการบดด้วยมือเป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 25 50 และ 75 โดยมวล



ตารางที่ 4.6 ผลได้ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา LH700 LHCAO25 LHCAO50 LHCAO75 และแคลเซียมออกไซด์ในหน่วยมิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย

องค์ประกอบ	LH700	LHCAO25	LHCAO50	LHCAO75	CaO
ไฮโดรเจน	6.63	12.18	10.23	11.03	10.04
คาร์บอนมอนอกไซด์	4.88	3.85	4.41	3.99	5.01
มีเทน	2.18	2.56	2.70	2.63	2.27
คาร์บอนไดออกไซด์	7.09	0.56	1.90	3.69	7.29
รวม	20.78	19.15	19.24	21.34	24.62

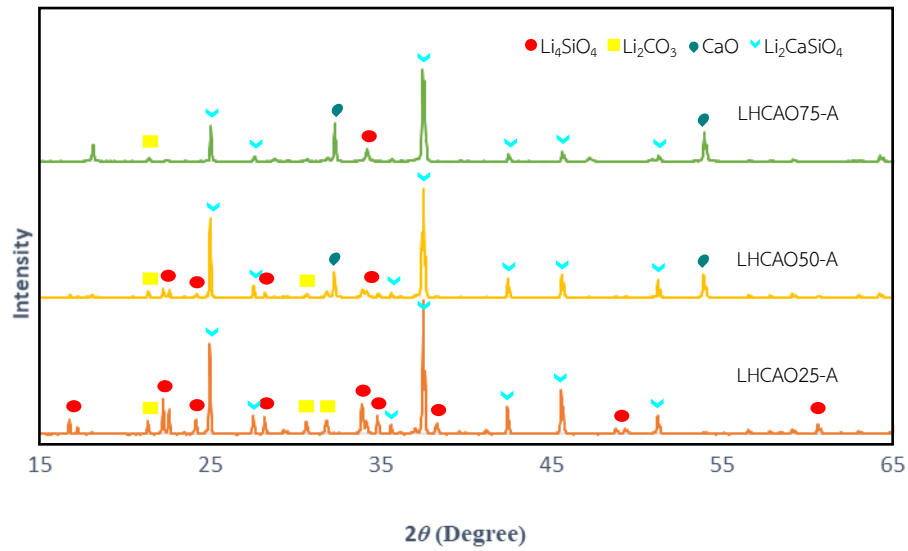
ตารางที่ 4.6 แสดงผลได้ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา LH700 LHCAO25 LHCAO50 LHCAO75 และแคลเซียมออกไซด์ในหน่วยมิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย จะเห็นได้ว่าทุกอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO จะมีค่าผลได้รวมของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ต่ำกว่าการทดลองของแคลเซียมออกไซด์ สาเหตุเนื่องมาจากปริมาณผลได้ของคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลองของ LHCAO ทุกอัตราส่วนผลมีค่าต่ำ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากของ LHCAO และจะเห็นได้ว่าปริมาณผลได้ของไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO ทุกอัตราส่วนผลมีค่าสูงกว่าการทดลองของ LH700 และแคลเซียมออกไซด์ ขณะที่ผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์ของการทดลองที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO ทุกส่วนผลมีค่าต่ำกว่าการทดลองของ LH700 และแคลเซียมออกไซด์

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของ LHCAO25 และ LHCAO50 จะพบว่าผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สรวมมีค่าใกล้เคียงกันแต่มีองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าในการทดลอง LHCAO25 มีปริมาณผลได้ของไฮโดรเจนสูงกว่าการทดลองของ LHCAO50 1.95 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย สามารถสันนิษฐานได้ว่า LHCAO25 มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า LHCAO50 จึงเกิดการกระตุ้นให้เกิดการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาซิฟต์ตั้งสมการที่ 2.14 ได้มากกว่า ข้อสันนิษฐานดังกล่าวสามารถยืนยันได้จากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้น 1.34 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง LHCAO25 แสดงถึงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ก็มีแนวโน้มสนับสนุนข้อสันนิษฐานดังกล่าว กล่าวคือเมื่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลองของ LHCAO50 ถูกดูดซับน้อยกว่า ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ถูกใช้ในปฏิกิริยาซิฟต์จึงน้อยกว่า ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LHCAO50 มีค่าสูงกว่าการทดลอง LHCAO25 0.56 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย นอกจากนั้นยังสามารถยืนยันข้อสันนิษฐานได้จากผลการ

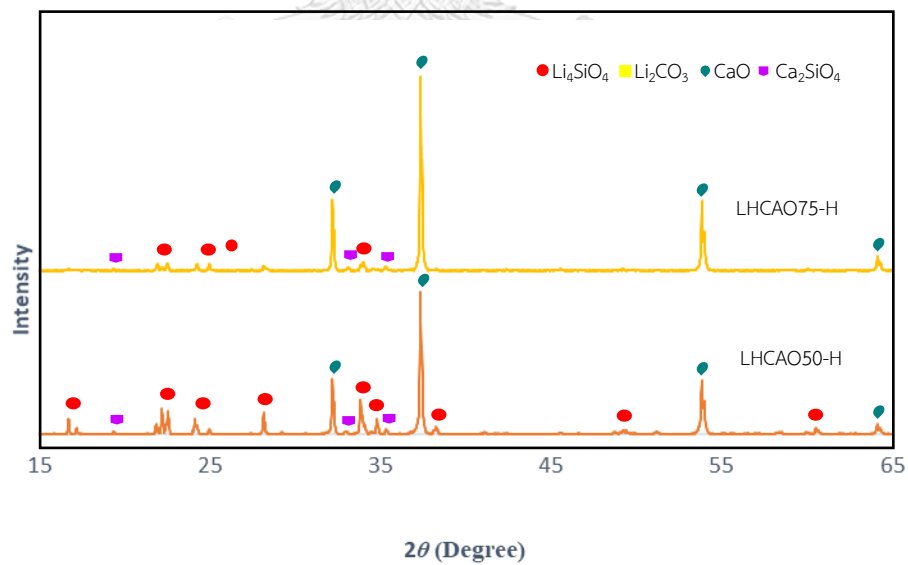
วิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 และ LHCAO50 หลังแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าวัฏภาคของลิเทียมคาร์บอเนตและลิเทียมแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ตามกลไกที่ได้เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.4.2 ที่เกิดขึ้นในการทดลองของ LHCAO25 มีสัดส่วนที่สูงกว่าการทดลอง LHCAO50 แสดงให้เห็นว่ามีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่า นอกจากนั้นจะสังเกตได้ว่าแทบจะไม่มีปรากฏของพีคความเข้มของแคลเซียมออกไซด์ใน LHCAO25 ต่างจาก LHCAO50 ที่เกิดพีคความเข้มของแคลเซียมออกไซด์อย่างเห็นได้ชัด บ่งบอกได้ว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเพิ่มลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25 ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสารประกอบของแคลเซียมอื่นๆ ทั้งหมด ซึ่งมีบทบาทในการช่วยเพิ่มการถ่ายโอนรวมถึงการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทซิลิเกตได้ดียิ่งขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของ LHCAO50 และ LHCAO75 จะเห็นได้ว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น สาเหตุมาจากปริมาณแคลเซียมออกไซด์ออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ รวมถึงปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งและแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น [5, 21, 26, 33, 35-37] ซึ่งยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบของ LHCAO75 หลังจากปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีในบรรยากาศของอาร์กอนดังรูปที่ 4.21 พบว่าวัฏภาคหลักของ LHCAO75 คือแคลเซียมออกไซด์เนื่องจากสัดส่วนความเข้มของพีคแคลเซียมออกไซด์ต่อความความเข้มของพีคลิเทียมอโทซิลิเกตหรือแคลเซียมซิลิเกตมีค่าสูง แต่จากการปรากฏของพีคความเข้มของแคลเซียมซิลิเกตและลิเทียมอโทซิลิเกต บ่งบอกได้ว่าปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มสูงขึ้นอาจไม่ได้มีผลมาจากการเร่งปฏิกิริยาของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับผลมาจากการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาซีฟิเคชันที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO75 อีกด้วย สามารถยืนยันข้อสันนิษฐานดังกล่าวด้วยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนั้นยังสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO75 หลังแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยดังรูปที่ 4.20 จะเห็นว่ามีปรากฏของวัฏภาคลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตและลิเทียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO75 ตามกลไกที่ได้เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.4.2 แต่จะสังเกตได้ว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ใน LHCAO75 มีค่าสูงกว่า LHCAO50 1.79 มิลลิโมลต่อกรัม ไบอ้อยสาเหตุหนึ่งคือปริมาณที่ต่ำลงของ LH700 ในตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลต่อการทำงานร่วมกันของแคลเซียมออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกตในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ หรือกล่าวได้ว่าอัตราส่วนผสมของลิเทียมอโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ไม่ใช่อัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการทำงานร่วมกันระหว่างวัฏภาคทั้งสองในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จึงเพิ่ม

สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ประกอบกับความสามารถเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของแคลเซียมออกไซด์ที่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 LHCAO50 และ LHCAO75 หลัง แกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

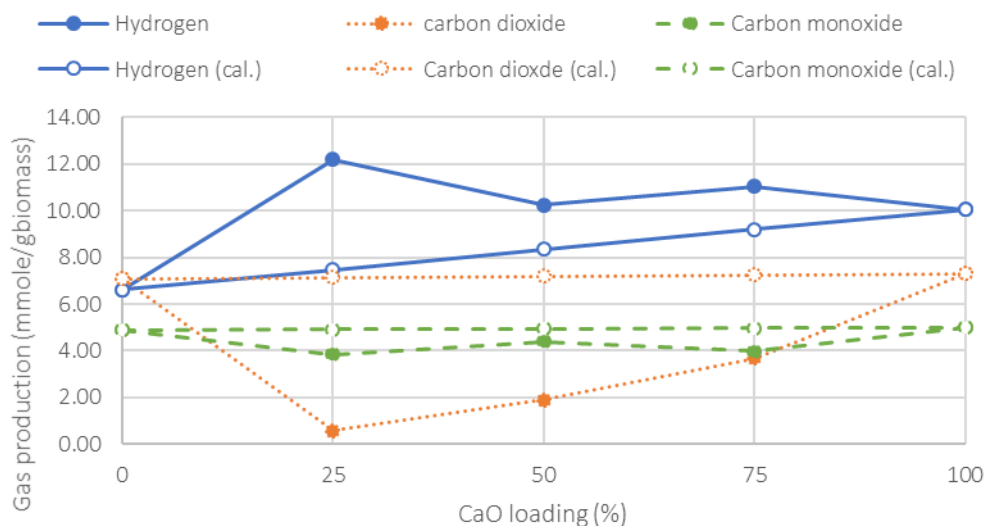


รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO50 และ LHCAO75 หลังการปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบของผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลองและผลได้จากการทำนายผลด้วยสมการที่ 4.6 [26, 31] ซึ่งเป็นสมการประมาณการผลได้ที่ควรจะเกิดขึ้นในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลจากการทำงานร่วมกันของ LH700 และแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จะเห็นได้ว่าไฮโดรเจนที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่าค่าทำนายมากในทุกอัตราส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นถึงผลของการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพของ LH700 และแคลเซียมออกไซด์ในการกระตุ้นการผลิตไฮโดรเจนจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย แนวนวมที่น่าสนใจของ LHCAO คือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่าค่าทำนายเป็นอย่างมากในทุกๆอัตราส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ลงในตัวดูดซับลิเทียมออกไซด์ไม่เพียงแต่ส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของแกซิฟิเคชัน แต่ยังส่งผลอย่างมากต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้จะเห็นว่าแนวมของคาร์บอนมอนอกไซด์ยังมีค่าต่ำกว่าค่าทำนายในทุกๆอัตราส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นเหตุผลยืนยันได้ว่าการเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากของไฮโดรเจนส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการเลื่อนของสมดุลของปฏิกิริยาซิฟิเคชัน ที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา สมการทำนายผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สขององค์ประกอบต่างๆ:

$$Y_{\text{cal}} = X_{\text{LH700}} \times Y_{\text{LH700}} + (1 - X_{\text{LH700}}) \times Y_{\text{CaO}} \quad (4.6)$$

โดย  $Y_{\text{cal}}$  คือค่าผลได้ทำนาย  $X_{\text{LH700}}$  คือค่าอัตราส่วนโดยมวลของ LH700  $Y_{\text{LH700}}$  คือผลได้ของการทดลอง LH700 และ  $Y_{\text{CaO}}$  คือผลได้ของการทดลองของแคลเซียมออกไซด์



รูปที่ 4.22 ผลได้ของไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลอง (จุดทึบ) และผลได้จากการทำนาย (จุดโปร่ง)

#### 4.6.2 ผลของอุณหภูมิแกซีฟิเคชันต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

อุณหภูมิแกซีฟิเคชันถูกนำมาศึกษาในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยการดูดซับโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO50 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพเชิงเร่งปฏิกิริยาของ LHCAO50 ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ รวมถึงศึกษาหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดำเนินการกระบวนการ อุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส

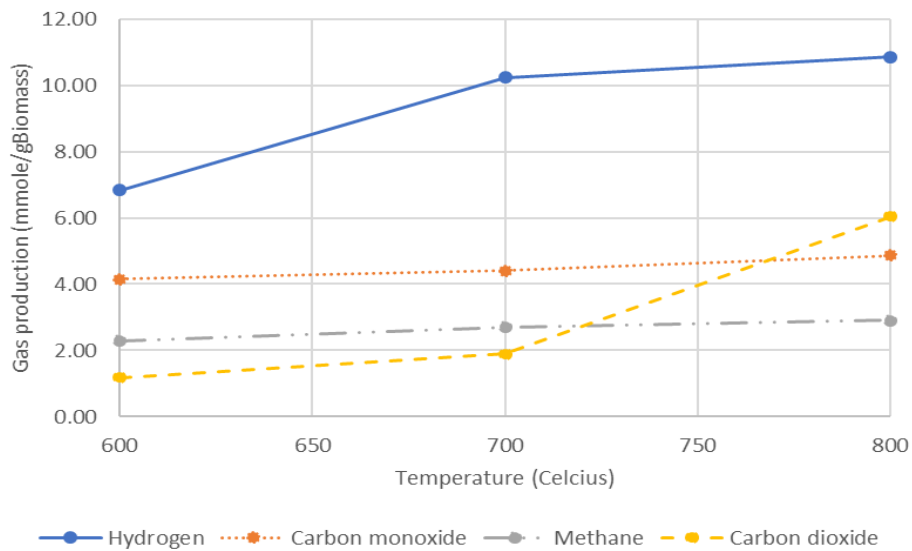
รูปที่ 4.23 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิแกซีฟิเคชันต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO50 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลได้จากอิทธิพลของความร้อนมีความคล้ายคลึงกับการทดลองของ LHMG0 กล่าวคือผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลได้รวมของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเท่ากับ 14.46 19.24 และ 24.66 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย ในการทดลองที่มีอุณหภูมิแกซีฟิเคชันเท่ากับ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการแตกตัวของทาร์หรือสารระเหยที่ควบแน่นได้ในปริมาณที่สูงขึ้นหรือเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง อีกสาเหตุหนึ่งคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาที่เกิดภายในแกซีฟิเคชัน เนื่องจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่ของแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น อาทิ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิง แกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ และปฏิกิริยาบูอาร์ด เป็นต้น ส่งผลให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้น [21, 32, 33, 35, 36]

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลองที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 600 และ 700 องศาเซลเซียสจะพบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สทุกองค์ประกอบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิแกซีฟิเคชันเพิ่มขึ้น ประเด็นที่น่าสนใจคือการเพิ่มขึ้นของผลได้ไฮโดรเจนมีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของผลได้องค์ประกอบอื่นเป็นอย่างมาก จะเห็นได้ว่าผลได้ของไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้นถึง 3.4 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยขณะที่ผลได้ขององค์ประกอบอื่นๆมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อธิบายได้ว่านอกจากอุณหภูมิต่ำที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนและปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันต่างๆแล้ว ในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียสยังส่งผลเร่งปฏิกิริยาซิฟต์ และส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของตัวเร่งปฏิกิริยา [5, 21] ปริมาณไฮโดรเจนจึงเพิ่มสูงขึ้นมากขณะที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ผลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบของ LHCAO50 หลังแกซีฟิเคชันด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าหลังการแกซีฟิเคชันจะปรากฏพีคความเข้มของลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตขึ้นมา ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO ตามกลไกที่ได้เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.4.2 อีกประเด็นที่น่าสนใจคือปริมาณที่เพิ่มขึ้นของผลได้และ

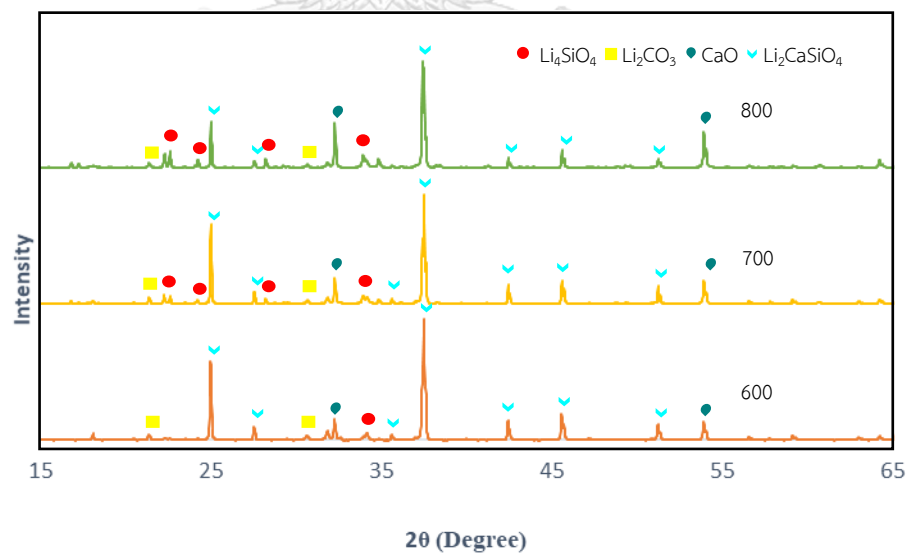
คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส LHCAO50 ก็สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน การสันนิษฐานดังกล่าวสามารถยืนยันได้ด้วยผลการวิเคราะห์วัฏภาค ของ LHCAO50 หลังแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชันต่างๆ ดังรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของพีคความเข้มของลิเทียมออโทซิลิเกตต่อพีคความเข้มของลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่ายิ่งอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO50 แต่จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 600 องศาเซลเซียสให้ผลได้ของแก๊สที่ต่ำกว่า สาเหตุเนื่องมาจากอุณหภูมิแกซีฟิเคชันที่ใช้ในการทดลองยังมีพลังงานความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาต่างๆในแกซีฟิเคชันไม่เพียงพอเนื่องจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจึงต้องใช้พลังงานความร้อนสูงในการดำเนินกระบวนการ

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลองของที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 และ 800 องศาเซลเซียสจะพบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สทุกองค์ประกอบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิแกซีฟิเคชันเพิ่มขึ้นเป็น 800 องศาเซลเซียส สาเหตุที่ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ สาเหตุแรกคืออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนของสารระเหยและทาร์มากขึ้น [21, 32, 33, 35, 36] สามารถยืนยันได้จากปริมาณมีเทนที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น สาเหตุที่สองคืออุณหภูมิส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO จะเห็นได้ว่า ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลองที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 800 องศาเซลเซียสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าการทดลองที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียสมากถึง 4.14 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย ผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wei L. และคณะ [21] และ Acharya B. และคณะ [36] ที่พบว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์มีค่าต่ำลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิแกซีฟิเคชันเพิ่มขึ้นถึง 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลต่อสมดุลเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์ ลิเทียมออโทซิลิเกต และลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงมากเกินไปจะส่งผลกระตุ้นให้เกิดการดีคาร์บอนเนชันของตัวดูดซับ ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมากในการทดลองของอุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 800 องศาเซลเซียส และจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของผลได้ไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย สาเหตุคือปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการเลื่อนของสมดุลปฏิกิริยาซิปต์ลดลงเป็นอย่างมากเนื่องจากการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้น และจากผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO50 ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 800 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนระหว่างพีคความเข้มของลิเทียมออโทซิลิเกตต่อพีคความเข้มของลิเทียม

แคลเซียมซิลิเกตมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่อุณหภูมิแกซีฟเคชันอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าการทดลองที่อุณหภูมิแกซีฟเคชัน 800 องศาเซลเซียสเป็นการทดลองที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 4.23 ผลกระทบของอุณหภูมิแกซีฟเคชันต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟเคชันของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO50



รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO50 หลังแกซีฟเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิแกซีฟเคชัน 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส

#### 4.7 ประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า LHCAO25 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีปริมาณผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนจากแก๊สซิโกลีคด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่สูงที่สุด LHCAO25 จึงถูกนำมาศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ โดยทำการทดลองการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดหนึ่งชั้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยมวลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อจำนวนรอบที่ทำการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.25 แสดงผลการวิเคราะห์ TGA ของ LHCAO25 หลังการผสมทางกายภาพจะพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเร่งปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส จะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณร้อยละ 3 โดยมวล การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงนี้เกิดจากกำจัดความชื้นภายนอกบริเวณพื้นผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 350 ถึง 400 องศาเซลเซียสจะเห็นได้ว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณร้อยละ 5.8 โดยมวล การเปลี่ยนแปลงร้อยละโดยน้ำหนักนี้สันนิษฐานได้ว่าการสลายตัวของวัฏภาคแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัฏภาคแคลเซียมออกไซด์ หรือปฏิกิริยาผันกลับของปฏิกิริยาที่ 4.3 [38] เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 650 องศาเซลเซียส พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณร้อยละ 6.5 คาดได้ว่าเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างลิเทียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกต ดังสมการที่ 4.7 ในขั้นตอนดังกล่าวอาจส่งผลให้เกิดการระเหยของลิเทียมออกไซด์ น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงลดลง [24]

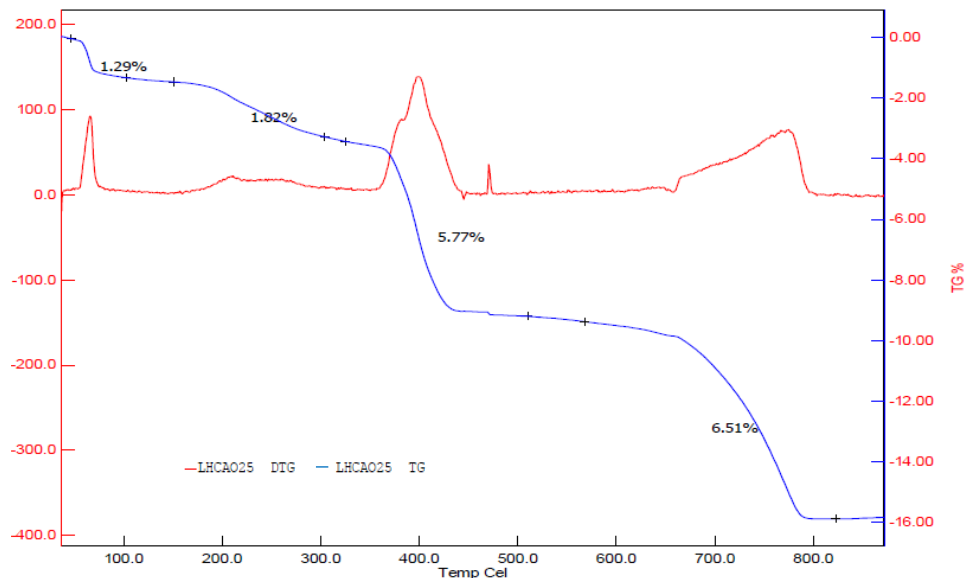
ผลการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 แสดงดังรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าหลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในรอบแรกมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหลังการดูดซับสูงสุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 15.05 โดยมวล น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA เพื่อประมาณการณ์อุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับและน้ำหนักที่หายไปเมื่อทำการคายซับดังแสดงในรูปที่ 4.26 จากผลการวิเคราะห์ LHCAO25 หลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิค TGA จะพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการคายซับของ LHCAO25 คือ 850 องศาเซลเซียส และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการคายซับจะมีค่าประมาณร้อยละ 14.1 โดยมวล ในการทดสอบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในรอบถัดๆไปจะเห็นได้ว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก LHCAO25 มีค่าลดลง และในระหว่างการทดลองการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวน 7 รอบการทดลอง ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 11.44 โดยมวลต่อรอบการทดลอง



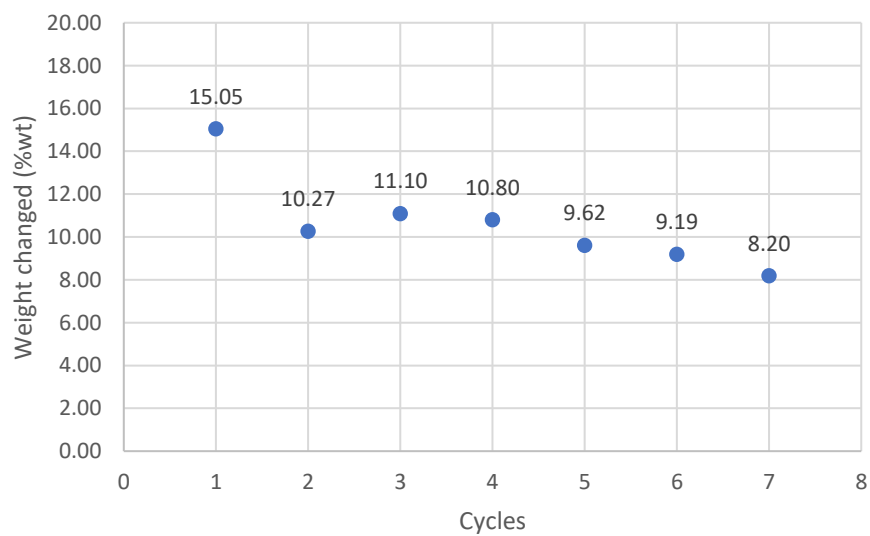
สาเหตุที่เกิดการลดลงอย่างมากในการทดลองรอบที่ 2 สามารถสันนิษฐานได้ว่า ในการทดลองรอบแรกตัวเร่งปฏิกิริยายังไม่ได้อยู่ในรูปที่เสถียรมากนัก สังเกตได้จากผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.27 พบว่าวัฏภาคองค์ประกอบของ LHCAO25 หลังการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที (LHCAO25-H) และหลังจากการคายซับในการทดลองรอบที่ 1 (LHCAO25-D) มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือวัฏภาคองค์ประกอบหลักของ LHCAO25 ก่อนเริ่มการทดลองแกซีพีเคชั่นจะประกอบด้วยวัฏภาคของลิเทียมออกโทซิลิเกต แคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตเป็นหลัก แต่จะเห็นได้ว่า LHCAO25 ที่ผ่านการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ จะมีวัฏภาคองค์ประกอบที่ซับซ้อนกว่ามาก กล่าวคือมีวัฏภาคของลิเทียมคาร์บอเนต ลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 อยู่ในความเข้มข้นที่สูง แสดงให้เห็นว่าภาวะที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ยังไม่เหมาะสมต่อการคายซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของ LHCAO25

จากผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบของ LHCAO25 หลังการคายซับในการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์รอบที่ 7 (LHCAO25C7-D) เปรียบเทียบกับ LHCAO25 หลังการคายซับในการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์รอบที่ 1 ดังรูปที่ 2.28 จะเห็นได้ว่าวัฏภาคองค์ประกอบของ LHCAO25 ทั้งสองมีความคล้ายคลึงกัน ปรากฏพิคความเข้มข้นของลิเทียมคาร์บอเนตและลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตในความเข้มข้นสูง แสดงให้เห็นว่าภาวะที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองยังไม่เหมาะสมเพียงพอต่อการคายซับของ LHCAO25 เนื่องจากมีวัฏภาคลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตและลิเทียมคาร์บอเนตปรากฏอยู่ในความเข้มข้นสูง

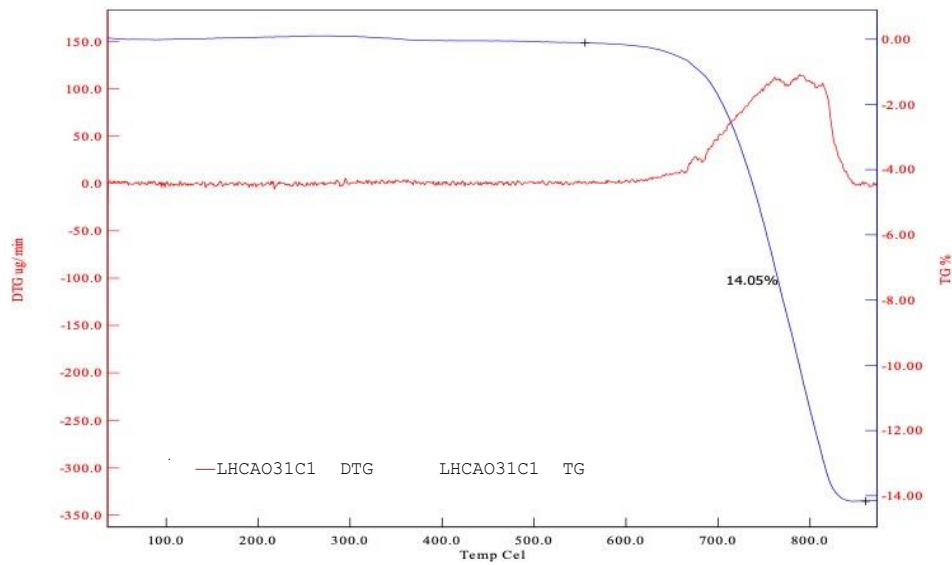
เมื่อพิจารณาร้อยละโดยน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะพบว่ามีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้ดังแสดงในภาคผนวก ข สาเหตุหลักเนื่องมาจากการคำนวณดังกล่าวตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลง (Conversion) ทั้งหมด แต่ในการทดลองจริงจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาต่างๆ ไม่ได้เกิดขึ้นทั้งหมด สังเกตได้จากการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบของ LHCAO25 หลังจากการปรับสภาพด้วยความร้อนดังรูปที่ 4.28 จะพบว่าวัฏภาคแคลเซียมออกไซด์เกิดขึ้นในความเข้มข้นสูง แสดงถึงปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบกับลิเทียมออกโทซิลิเกต ส่งผลให้กลไกการทำงานร่วมกันของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีความแตกต่างกัน น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงหลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีค่าแตกต่างกันออกไป



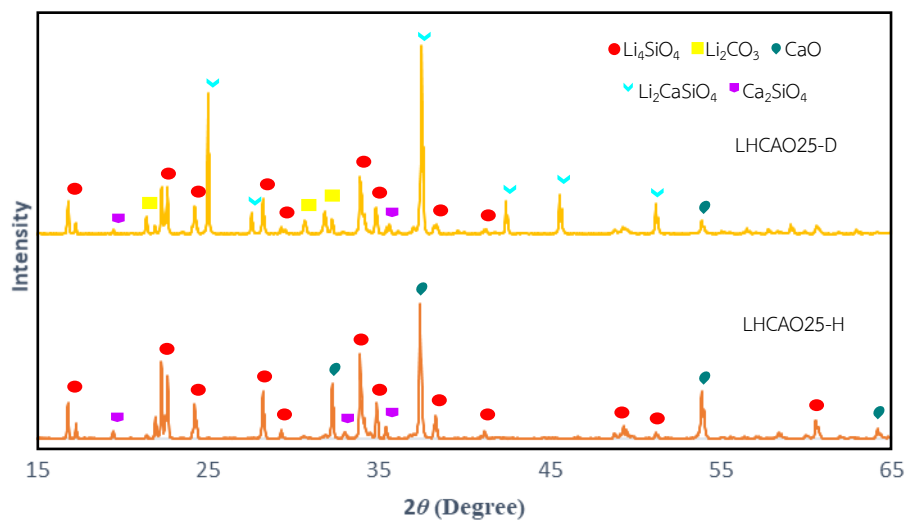
รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ TGA ของ LHCAO25 หลังจากการผสมทางกายภาพ



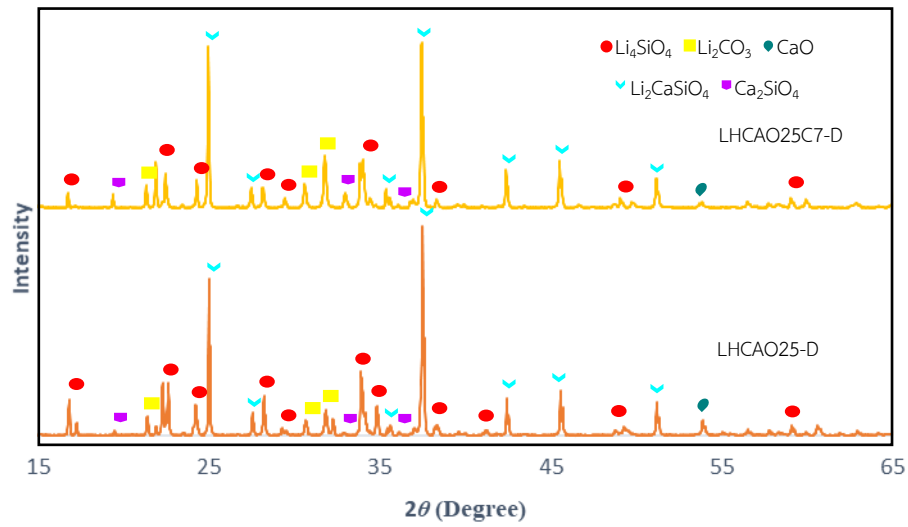
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในหน่วยร้อยละโดยมวลต่อจำนวนรอบที่ทำการทดลองของการทดสอบประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของ LHCAO25 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ TGA ของ LHCAO25 หลังจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์วิภูภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 หลังปรับสภาพด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและหลังการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ LHCAO25 หลังการคายซับจากการทดลอง การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์รอบที่ 1 และ 7 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวดูดซับลิเทียมออกโทซิลิเกตเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (Calcination) ต่อโครงสร้างและลักษณะ (Characteristics) รวมถึงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยารวมถึงการทำงานร่วมกัน (Synergistic) ของ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$  และ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$  ต่อแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น และศึกษาอุณหภูมิแกซีฟิเคชันที่เหมาะสมต่อการดำเนินการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำที่เพิ่มด้วยการดูดซับ อีกทั้งยังศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลการสังเคราะห์ลิเทียมออกโทซิลิเกตและผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของลิเทียมออกโทซิลิเกตต่อแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ลิเทียมออกโทซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการโซลิด-สเตททอราฟอรัมชันในทุกๆ อุณหภูมิการเผาจะมีวัฏภาคของลิเทียมออกโทซิลิเกตปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์สามารถสังเคราะห์ลิเทียมออกโทซิลิเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุณหภูมิมีผลต่อความบริสุทธิ์ โครงสร้าง ขนาดอนุภาคเฉลี่ย รวมถึงประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออกโทซิลิเกต ลิเทียมออกโทซิลิเกตที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิการเผา 700 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด มีค่า 509.45 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย

##### 5.1.3 ผลของอัตราส่วนผสมของ $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ทุกอัตราส่วนแสดงให้เห็นถึงการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ในแง่ของการสังเคราะห์ไฮโดรเจน ปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มสูงมากขึ้นในการทดลองของ LHMGO เป็นผลมาจากการคุณสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาต่างๆ อาทิ การแตกตัวของสารระเหย รีฟอร์มมิงและแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ ของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแมกนีเซียมออกไซด์ นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากการเลื่อนของสมดุลปฏิกิริยาซิปต์เมื่อมีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออกโทซิลิเกต ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้น

มากกว่าค่าทำนายแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นผลมาจากคุณสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาของ LHMGO เป็นหลัก ผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีค่าสูงสุดในการทดลองของ LHCMGO50 โดยผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 12.47 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยหรือร้อยละ 43.5 โดยปริมาตร

#### 5.1.4 ผลของอุณหภูมิแกซิฟิเคชันต่อการทำงานของ LHMGO50 ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนและความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้การทำงานของปฏิกิริยาโดยรวมในแกซิฟิเคชันเกิดได้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออกโทซิลิเกต ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้นจากการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาซิปต์ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 800 องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดการตีคาร์บอนขึ้นของ LHMGO ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊ส ผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีค่าสูงสุดในการทดลองที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชันเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส โดยผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 12.47 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยหรือร้อยละ 43.5 โดยปริมาตร

#### 5.1.5 ผลของอัตราส่วนผสมของ $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{CaO}$ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ทุกอัตราส่วนผสมของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ แสดงให้เห็นถึงการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพในแง่ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการสังเคราะห์ไฮโดรเจน ปริมาณผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากในการทดลองของ LHCAO เนื่องจากกลไกการทำงานร่วมกันต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ รวมถึงคุณสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารระเหย ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำที่สูงมากยิ่งขึ้น ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ใน LHCAO เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องมาจากปริมาณลิเทียมออกโทซิลิเกตที่ลดต่ำลง ผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีค่าสูงสุดในการทดลองของ LHCAO25 โดยผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 12.18 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยหรือร้อยละ 63.61 โดยปริมาตร

#### 5.1.6 ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชันต่อการทำงานของ LHCAO50 ในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน และความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้การทำงานของปฏิกิริยาโดยรวมในแกซีพีเคชันเกิดได้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน อุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO50 เป็นอย่างมาก อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO50 ในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยอยู่ในช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 800 องศาเซลเซียสส่งผลต่อสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนในการทดลองของ LHCAO25 มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิแกซีพีเคชันเท่ากับ 700 องศาเซลเซียสโดยผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 10.23 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยหรือร้อยละ 53.19 โดยปริมาตร

#### 5.1.7 ประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO50

จากการทดลองประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO50 มีค่าลดต่ำลงมากที่สุดหลังจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ครั้งแรก เนื่องจากความร้อนและเวลาในการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนเริ่มทำการทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ยังไม่เพียงพอต่อการสร้างวัฏภาคที่เสถียร ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของร้อยละโดยน้ำหนักมากในการทดลองครั้งที่ 1 ในระหว่างการทดลองการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวน 7 รอบการทดลอง ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 ลดลงร้อยละ 11.44 โดยมวลต่อรอบการทดลอง จากผลการวิเคราะห์วัฏภาคของ LHCAO หลังจากการทดลองในรอบที่ 7 จะเห็นได้ว่า วัฏภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการคายซับที่การทดลองครั้งที่ 7 มีวัฏภาคของแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ปรากฏอยู่ในความเข้มข้นต่ำ และมีการปรากฏของวัฏภาคคัลเซียมแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25 ในปริมาณที่สูง แสดงให้เห็นว่าภาวะที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO ยังไม่เหมาะสมเท่าที่ควร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ลิเทียมออกโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์แสดงให้เห็นถึงการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนจากแก๊สฟิชั่นด้วยไอน้ำของไบอ้อย แต่จะเห็นได้ว่าผลได้ของมีเทนในผลิตภัณฑ์แก๊สยังคงมีปริมาณมาก ดังนั้นการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาแก๊สฟิเคชันของไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก อาทิ ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานนิกเกิล (Ni-based) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาฐานเหล็ก (Fe-based) อาจส่งผลต่อผลได้ของมีเทนที่ต่ำลง รวมถึงผลได้ของไฮโดรเจนที่สูงมากยิ่งขึ้น





## บรรณานุกรม

1. Agency, I.E., *Global Energy & CO<sub>2</sub> Status Report*. 2018.
2. Shahbaz, M., et al., *The influence of catalysts in biomass steam gasification and catalytic potential of coal bottom ash in biomass steam gasification: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **73**: p. 468-476.
3. Sutton, D., B. Kelleher, and J.R.H. Ross, *Review of literature on catalysts for biomass gasification*. *Fuel Processing Technology*, 2001. **73**(3): p. 155-173.
4. Voldsund, M., K. Jordal, and R. Anantharaman, *Hydrogen production with CO<sub>2</sub> capture*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016. **41**(9): p. 4969-4992.
5. Li, B., et al., *The enhancing mechanism of calcium oxide on water gas shift reaction for hydrogen production*. *Energy*, 2014. **68**: p. 248-254.
6. Salaudeen, S.A., B. Acharya, and A. Dutta, *CaO-based CO<sub>2</sub> sorbents: A review on screening, enhancement, cyclic stability, regeneration and kinetics modelling*. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2018. **23**: p. 179-199.
7. Shokrollahi Yancheshmeh, M., H.R. Radfarnia, and M.C. Iliuta, *High temperature CO<sub>2</sub> sorbents and their application for hydrogen production by sorption enhanced steam reforming process*. *Chemical Engineering Journal*, 2016. **283**: p. 420-444.
8. Dhyani, V. and T. Bhaskar, *A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass*. *Renewable Energy*, 2018. **129**: p. 695-716.
9. Ommen, w.d.J.a.J.R.v., *Biomass composition, properties, and characterization*, in *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future: Fundamentals of Conversion Processes*, A.I.o.C. Engineers, Editor. 2014, John Wiley & Sons, Inc. p. 36-38.
10. *Thailand Alternative Energy Situation*, D.o.A.E.D.a. Efficiency, Editor. 2017: Thailand.
11. Yoovatana, L., *Biomass raw material suitability assessment used in fuel pellet production against green productivity principle*, in *Department of Industrial Engineering*. 2017, Chulalongkorn University: Thailand.

12. รายงานพื้นที่ปลูกอ้อย, สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล, Editor. 2017: ประเทศไทย. p. 8-14.
13. ประพันธ์ คูชลธารา และ ศศิธร สรรพอคำ, ผลงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้,. 2015, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,.
14. นคร ทิพย์าวงศ์, เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล,. 2 ed. 2015: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,.
15. Gao, N., et al., *Hydrogen-rich gas production from biomass steam gasification in an updraft fixed-bed gasifier combined with a porous ceramic reformer*. International Journal of Hydrogen Energy, 2008. **33**(20): p. 5430-5438.
16. Göransson, K., et al., *Review of syngas production via biomass DFBGs*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(1): p. 482-492.
17. Chen, X., et al., *High-temperature CO<sub>2</sub> sorption by Ca-doped Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sorbents*. International Journal of Hydrogen Energy, 2016. **41**(30): p. 13077-13085.
18. Kim, H., H.D. Jang, and M. Choi, *Facile synthesis of macroporous Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> with remarkably enhanced CO<sub>2</sub> adsorption kinetics*. Chemical Engineering Journal, 2015. **280**: p. 132-137.
19. Wang, J., et al., *Recent advances in solid sorbents for CO<sub>2</sub> capture and new development trends*. Energy Environ. Sci., 2014. **7**(11): p. 3478-3518.
20. Dou, B., et al., *Solid sorbents for in-situ CO<sub>2</sub> removal during sorption-enhanced steam reforming process: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **53**: p. 536-546.
21. Wei, L., et al., *Absorption-enhanced steam gasification of biomass for hydrogen production: Effect of calcium oxide addition on steam gasification of pyrolytic volatiles*. International Journal of Hydrogen Energy, 2014. **39**(28): p. 15416-15423.
22. Chiodo, V., et al., *Syngas production by catalytic steam gasification of citrus residues*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(46): p. 28048-28055.
23. Wang, K., et al., *Development of metallic element-stabilized Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sorbents for cyclic CO<sub>2</sub> capture*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(7): p. 4224-4232.
24. Venegas, M.J., et al., *Kinetic and reaction mechanism of CO<sub>2</sub> sorption on*

- Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>: Study of the particle size effect*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2007. **46**(8): p. 2407-2412.
25. นพิตา หิณชูธีระนันท์ และ ชวลิต งานจรัสศรีวิชัย, เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา, . 2014, กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,.
  26. Bunma, T. and P. Kuchonthara, *Synergistic study between CaO and MgO sorbents for hydrogen rich gas production from the pyrolysis-gasification of sugarcane leaves*. Process Safety and Environmental Protection, 2018. **118**: p. 188-194.
  27. Anis, S. and Z.A. Zainal, *Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(5): p. 2355-2377.
  28. Li, B., et al., *Absorption-enhanced steam gasification of biomass for hydrogen production: Effects of calcium-based absorbents and NiO-based catalysts on corn stalk pyrolysis-gasification*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(9): p. 5840-5848.
  29. Amorim, S.M., et al., *Lithium orthosilicate for CO<sub>2</sub> capture with high regeneration capacity: Kinetic study and modeling of carbonation and decarbonation reactions*. Chemical Engineering Journal, 2016. **283**: p. 388-396.
  30. Abbasi, E., et al., *Regenerable MgO-based sorbent for high temperature CO<sub>2</sub> removal from syngas: 3. CO<sub>2</sub> capture and sorbent enhanced water gas shift reaction*. Fuel, 2014. **137**: p. 260-268.
  31. Kreckkaiwan, S., et al., *Synergetic effect during co-pyrolysis/gasification of biomass and sub-bituminous coal*. Fuel Processing Technology, 2013. **115**: p. 11-18.
  32. Zhang, B., et al., *Hydrogen-rich gas production from wet biomass steam gasification with CaO/MgO*. International Journal of Hydrogen Energy, 2015. **40**(29): p. 8816-8823.
  33. Florin, N.H. and A.T. Harris, *Enhanced hydrogen production from biomass with in situ carbon dioxide capture using calcium oxide sorbents*. Chemical Engineering Science, 2008. **63**(2): p. 287-316.

34. Wang, M., C. Lee, and C. Ryu, *CO<sub>2</sub> sorption and desorption efficiency of Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>*. International Journal of Hydrogen Energy, 2008. **33**(21): p. 6368-6372.
35. Udomsirichakorn, J. and P.A. Salam, *Review of hydrogen-enriched gas production from steam gasification of biomass: The prospect of CaO-based chemical looping gasification*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **30**: p. 565-579.
36. Acharya, B., A. Dutta, and P. Basu, *An investigation into steam gasification of biomass for hydrogen enriched gas production in presence of CaO*. International Journal of Hydrogen Energy, 2010. **35**(4): p. 1582-1589.
37. Hanaoka, T., et al., *Hydrogen production from woody biomass by steam gasification using a CO<sub>2</sub> sorbent*. Biomass and Bioenergy, 2005. **28**(1): p. 63-68.
38. Dai, L., et al., *Thermal cycling stability of thermochemical energy storage system Ca(OH)<sub>2</sub>/CaO*. Applied Thermal Engineering, 2018. **133**: p. 261-268.

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของไบอ้อย

#### 1.การวิเคราะห์แบบปริมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์แบบปริมาณถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณความชื้น วิธีการดำเนินการมาตรฐาน ต่างๆมีดังนี้

##### 1.1 ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3173 มีวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

1. นำกรดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดไปอบด้วยเตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 104 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อกำจัดความชื้น หลังจากนั้นนำกรดอะลูมิเนียมและฝาปิดเก็บในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 15 นาทีเพื่อลดอุณหภูมิลง หลังจากนั้นนำกรดอะลูมิเนียมพร้อมฝาไปแช่ น้ำหนักพร้อมจดบันทึก
2. ชั่งตัวอย่างไบอ้อยประมาณ 1 กรัมลงในกรดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด ชั่งน้ำหนักพร้อมจด บันทึก
3. นำกรดอะลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างไบอ้อยพร้อมฝาปิดไปอบด้วยเตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 104 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักของตัวอย่างไบอ้อยจะมีค่าคงที่
4. นำกรดอะลูมิเนียมออกจากเตาอบแล้วเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อลดอุณหภูมิเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำกรดอะลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างไบอ้อยและฝาปิดไปชั่งน้ำหนักพร้อมจด บันทึก

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100 \times (W1 - W2) / W$$

โดย	M	ได้แก่ ร้อยละโดยมวลของความชื้นในตัวอย่างไบอ้อย
	W1	ได้แก่ น้ำหนักของกรดอะลูมิเนียม ฝา และตัวอย่างไบอ้อยก่อนเริ่มทำการอบ (กรัม)
	W2	ได้แก่ น้ำหนักของกรดอะลูมิเนียม ฝา และตัวอย่างไบอ้อยหลังทำการอบ (กรัม)
	W	ได้แก่ น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

## 1.2 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)

ปริมาณความชื้นถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3175 มีวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

1. เเผา crucible (Crucible) พร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสในเตาเผา (Muffle furnace) เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวในเดซิเคเตอร์ จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก
2. ชั่งตัวอย่างไบอ้อยประมาณ 1 กรัมลงใน crucible พร้อมฝาปิด จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก
3. นำ crucible วางบริเวณเหนือเตาเผา (Turbular furnace) ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที
4. หย่อน crucible ลงบริเวณส่วนบนของเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที
5. หย่อน crucible ลงกึ่งกลางของเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 นาที
6. นำ crucible ออกจากเตาเผาแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

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

โดย	V	ได้แก่ ร้อยละโดยมวลของปริมาณสารระเหยในตัวอย่างไบอ้อย
	$W_3$	ได้แก่ น้ำหนักของ crucible ฝา และตัวอย่างไบอ้อยก่อนทำการเผา (กรัม)
	$W_4$	ได้แก่ น้ำหนักของ crucible ฝา และตัวอย่างไบอ้อยหลังทำการเผา (กรัม)
	W	ได้แก่ น้ำหนักของตัวอย่างไบอ้อย (กรัม)

## 1.3 ปริมาณเถ้า (Ash content)

ปริมาณเถ้าถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3174 มีวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

1. เเผา crucible (Crucible) พร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสในเตาเผาเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวในเดซิเคเตอร์ จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก
2. ชั่งตัวอย่างไบอ้อยประมาณ 1 กรัมลงใน crucible พร้อมฝาปิด จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก

3. นำครุซีเบลไปเผาด้วยตะเกียงเบนเซนจนกว่าไอระเหยจะหมดไป
4. เผาครุซีเบลที่ผ่านการเผาด้วยตะเกียงเบนเซนในเตาเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. นำครุซีเบลออกจากเตาเผาแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก

#### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

โดย	V	ได้แก่ ร้อยละโดยมวลของปริมาณเถ้าในตัวอย่างใบอ้อย
	$W_5$	ได้แก่ น้ำหนักของครุซีเบล ผา และเถ้าหลังการเผา (กรัม)
	$W_6$	ได้แก่ น้ำหนักของครุซีเบล ผา (กรัม)
	W	ได้แก่ น้ำหนักของตัวอย่างใบอ้อย (กรัม)

#### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)

ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างใบอ้อยสามารถคำนวณได้จากร้อยละโดยน้ำหนักทั้งหมดหักลบกับร้อยละของความชื้น สารละลาย และปริมาณเถ้า ดังสมการด้านล่าง

#### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$C = 100 - M - V - A$$

โดย	C	ได้แก่ ร้อยละโดยมวลของคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างใบอ้อย
-----	---	--

**ภาคผนวก ข**  
**การคำนวณ**

**1. ตัวอย่างการคำนวณผลได้และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก๊สในการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LH700**

1.1 ภาวะที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง

● ปริมาณ LH700	0.5005	กรัม
● อุณหภูมิ	700	องศาเซลเซียส
● เวลา	30	นาที
● เก็บตัวอย่างทุกๆ	2	นาที
● อัตราการป้อนเข้าของอาร์กอน	30	มิลลิลิตรต่อนาที
● อัตราการป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์	30	มิลลิลิตรต่อนาที
● รัศมีภายในของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊ส	0.5	เซนติเมตร
● ช่วงความสูงที่พิจารณาในการวัดอัตราการไหล	10	เซนติเมตร

1.2 การคำนวณปริมาตรของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ปริมาตรของผลิตภัณฑ์แก๊สคำนวณได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับปริมาตรในช่วงที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สหรือช่วงความสูง 10 เซนติเมตรภายในอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดฟองแก๊ส ดังสมการ

$$X = (60 \times 7.85) / Y \times T$$

โดย	X	ได้แก่ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิลิตร)
	Y	ได้แก่ ระยะเวลาเฉลี่ยของฟองแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านความสูง 10 เซนติเมตร (วินาที)
	T	ได้แก่ ระยะเวลาที่เก็บตัวอย่าง (นาที)
	7.85	ได้แก่ ปริมาตรในช่วงความสูง 10 เซนติเมตร (มิลลิลิตร)

จากข้อมูลการทดลองจะเห็นว่า ระยะเวลาเฉลี่ยของฟองแก๊สที่ 4 ของการทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LH700 มีค่าเท่ากับ 6.9 วินาที ดังนั้นปริมาตรทั้งหมดของผลิตภัณฑ์แก๊สในฟองแก๊สจึงมีค่าเท่ากับ

$$X = (60 \times 7.85) / 6.7 \times 2 = 136.6 \text{ มิลลิลิตร}$$



### 1.3 คำนวณหาร้อยละความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ร้อยละความเข้มข้นโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส สามารถคำนวณได้จากผลวิเคราะห์ GC ของผลิตภัณฑ์แก๊สเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ GC ของแก๊สมาตรฐานร้อยละ 1 โดยปริมาตร ยกตัวอย่างการคำนวณร้อยละความเข้มข้นของถู่ที่ 4 ได้ดังนี้

ตารางที่ ข1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานด้วยเทคนิค GC

องค์ประกอบ	พื้นที่	ร้อยละความเข้มข้น
ไฮโดรเจน	25081.4	1
คาร์บอนมอนอกไซด์	1297.7	1
มีเทน	6199.1	1
คาร์บอนไดออกไซด์	1556.8	1

ตารางที่ ข2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สถู่ที่ 4 ด้วยเทคนิค GC

องค์ประกอบ	พื้นที่	ร้อยละความเข้มข้นเทียบกับ แก๊สมาตรฐาน (โดยปริมาตร)
คาร์บอนไดออกไซด์	5360	$5360.0/1556.8 = 3.44$

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานและผลิตภัณฑ์แก๊สถู่ที่ 4 ด้วยเทคนิค GC แสดงดังตาราง ข1 และ ข2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าร้อยละความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของผลิตภัณฑ์แก๊สถู่ที่ 4 มีค่าเท่ากับ 3.44 โดยปริมาตร ดังนั้นปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก๊สในถู่ที่ 4 จึงมีค่าเท่ากับ  $3.44/100 \times 136.6 = 4.64$  มิลลิลิตร

### 1.4 คำนวณหาผลได้ขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ปริมาณผลได้ของคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สมมติฐานของแก๊สอุดมคติสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$PV = nRT$$

โดย	P	ได้แก่ ความดัน (atm)
	V	ได้แก่ ปริมาตรของแก๊สผลิตภัณฑ์ (มิลลิลิตร)
	n	ได้แก่ จำนวนโมลของแก๊สแต่ละองค์ประกอบ (มิลลิโมล)
	R	ได้แก่ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 0.082057
	T	ได้แก่ อุณหภูมิ (เคลวิน)

ปริมาณผลได้คาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่ 4 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$PV = nRT$$

$$(1) \times 4.64 = n \times 0.082057 \times (25+273)$$

$$n = 0.019 \text{ มิลลิโมล}$$

$$n = 0.019 / 0.5 = 0.038 \text{ มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ}$$

## 2. ตัวอย่างการคำนวณผลได้และความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์แก๊สในการทดลองแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับของ LHCAO25

### 2.1 ภาวะที่ใช้ในการดำเนินกระบวนการ

● ปริมาณ LHCAO25	1.024	กรัม
● ปริมาณไบอ้อย	0.202	กรัม
● อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย	700	องศาเซลเซียส
● อุณหภูมิแก๊สซิเคชัน	700	องศาเซลเซียส
● เวลา	30	นาที
● เก็บตัวอย่างทุกๆ	5	นาที
● อัตราการป้อนเข้าของอาร์กอน	30	มิลลิลิตรต่อนาที
● อัตราการป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์	30	มิลลิลิตรต่อนาที
● รัศมีภายในของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊ส	0.5	เซนติเมตร
● ช่วงความสูงที่พิจารณาในการวัดอัตราการไหล	10	เซนติเมตร

### 2.2 การคำนวณปริมาตรของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ปริมาตรของผลิตภัณฑ์แก๊สคำนวณได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับปริมาตรในช่วงที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สหรือช่วงความสูง 10 เซนติเมตร ภายในอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดฟองแก๊ส ดังสมการ

$$X = (60 \times 7.85) / Y \times T$$

โดย X	ได้แก่ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิลิตร)
Y	ได้แก่ ระยะเวลาเฉลี่ยของฟองแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านความสูง 10 เซนติเมตร (วินาที)
T	ได้แก่ ระยะเวลาที่เก็บตัวอย่าง (นาที)
7.85	ได้แก่ ปริมาตรในช่วงความสูง 10 เซนติเมตร (มิลลิลิตร)

ตารางที่ ข3 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส

อุ้งเก็บแก๊ส	ระยะเวลาเฉลี่ย (วินาที)	ปริมาตรผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิลิตร)
1	8.74	$471/8.74 \times 5 = 269.68$
2	9.21	$471/9.21 \times 5 = 255.72$
3	9.09	$471/9.09 \times 5 = 259.32$
4	10.15	$471/10.15 \times 5 = 231.96$
5	9.16	$471/9.16 \times 5 = 257.34$

## 2.3 คำนวณหาร้อยละความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ตารางที่ ข4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานด้วยเทคนิค GC

องค์ประกอบ	พื้นที่	ร้อยละความเข้มข้น
ไฮโดรเจน	25,735.9	1
คาร์บอนมอนอกไซด์	1,331	1
มีเทน	4,443	1
คาร์บอนไดออกไซด์	1,504	1

ตารางที่ ข5 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส

องค์ประกอบ	พื้นที่	ร้อยละความเข้มข้นเทียบกับ แก๊สมาตรฐาน (โดยปริมาตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
ไฮโดรเจน	212077.7	$212077.7/25735.9 = 8.24$	$8.24/100 \times 269.68$ $= 22.22$
คาร์บอนมอนอกไซด์	5639.5	$5639.5/1331 = 4.24$	$4.24/100 \times 269.68$ $= 11.43$
มีเทน	11133.1	$11133.1/4443 = 2.51$	$2.51/100 \times 269.68$ $= 6.76$
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0

ร้อยละความเข้มข้นโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส สามารถคำนวณได้จากผลวิเคราะห์ GC ของผลิตภัณฑ์แก๊สเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ GC ของแก๊สมาตรฐานร้อยละ 1 โดยปริมาตร ยกตัวอย่างการคำนวณร้อยละความเข้มข้นของถุงที่ 1 ได้ดังตารางที่ ข5

#### 2.4 คำนวณหาผลได้ขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ปริมาณผลได้ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สภายใต้สมมติฐานของแก๊สอุดมคติ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$PV = nRT$$

โดย	P	ได้แก่ ความดัน (atm)
	V	ได้แก่ ปริมาตรของแก๊สผลิตภัณฑ์ (มิลลิลิตร)
	n	ได้แก่ จำนวนโมลของแก๊สแต่ละองค์ประกอบ (มิลลิโมล)
	R	ได้แก่ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 0.082057
	T	ได้แก่ อุณหภูมิ (เคลวิน)

ปริมาณผลได้ขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊สถุงที่ 1 สามารถคำนวณได้ดังนี้

ตารางที่ ข6 การคำนวณผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในการทดลองแก๊สพีเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อยด้วย

LHCAO25			
องค์ประกอบ	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	จำนวนโมล (มิลลิโมล)	จำนวนโมลต่อกรัมใบอ้อย (มิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อย)
ไฮโดรเจน	22.22	$(1 \times 22.22)/(0.082057 \times 298) = 0.91$	$0.91/(0.202 \times 82.4/100) = 5.46$
คาร์บอนมอนอกไซด์	11.43	$(1 \times 11.43)/(0.082057 \times 298) = 0.47$	$0.47/(0.202 \times 82.4/100) = 2.8$
มีเทน	6.76	$(1 \times 6.76)/(0.082057 \times 298) = 0.28$	$0.28/(0.202 \times 82.4/100) = 1.66$
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0
รวม	40.41	1.62	9.92

ตารางที่ ข6 แสดงการคำนวณผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในการทดลองแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำของไบอ้อยด้วย LHCAO25 จะเห็นว่าจำนวนโมลต่อผลิตภัณฑ์แก๊สคำนวณจากจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์แก๊สหารด้วยน้ำหนักของไบอ้อยที่หักปริมาณความชื้นและปริมาณไอน้ำออก

## 2.5 การคำนวณความเข้มข้นรวมขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ตารางที่ ข7 การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส

องค์ประกอบ	ปริมาตรรวมทุกฤดู (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น (ร้อยละโดยปริมาตร)
ไฮโดรเจน	50.78	$50.78/78.92 \times 100 = 64.33$
คาร์บอนมอนอกไซด์	15.64	$15.64/78.92 \times 100 = 19.82$
มีเทน	9.84	$9.84/78.92 \times 100 = 12.46$
คาร์บอนไดออกไซด์	2.67	$2.67/78.92 \times 100 = 3.39$
รวม	78.92	100

## 2.6 ตัวอย่างการคำนวณการลดลงของความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับลิเทียมอโทธิซิลิเกต

- น้ำหนักเริ่มต้นของตัวดูดซับลิเทียมอโทธิซิลิเกต 1.01251 กรัม

จากรูปที่ 4.25 แสดงผลการวิเคราะห์ TGA ของ LHCAO25 หลังจากการผสมทางกายภาพ จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25 หลังการปรับสภาพด้วยความร้อนจะมีน้ำหนักหายไปร้อยละ 15.88 โดยมวล ดังนั้นหากชั่งน้ำหนัก LHCAO25 มา 1.01251 กรัม จะมีน้ำหนักหลังปรับสภาพด้วยความร้อนเท่ากับ  $(1.01251 \times 0.842) = 0.85$  กรัม

ตารางที่ ข8 การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ  
LHCAO25

จำนวนรอบการทดลอง	1	2
น้ำหนักของตัวดูดซับกับเครื่อง	120.18	120.20
ปฏิกรณ์ก่อนเริ่มการทดลอง (กรัม)		
น้ำหนักหลังการทดลอง (กรัม)	120.31	120.29
ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	$120.31 - 120.18 = 0.13$	$120.29 - 120 = 0.09$
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก	$0.13 / 0.85 \times 100 = 15.05$	$0.09 / 0.85 \times 100 = 10.27$
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับ	0.00	$(15.05 - 10.27) / 15.05 \times 100 = 31.75$
ค่าสัมบูรณ์	0.00	31.75

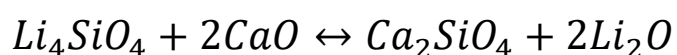
ค่าเฉลี่ยร้อยละการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับ

$$\frac{31.75 + 8 + 2.65 + 10.98 + 4.4 + 10.86}{6} = 11.44$$

## 2.7 การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ LHCAO25

- สมมติฐาน: ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลง (Conversion) ทั้งหมด  
ขั้นตอนการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน

แคลเซียมออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกตจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้



กรัม	0.267151	0.25	0.383931	0.133208
โมล	0.002229	0.004458	0.002229	0.004458

ดังนั้นหลังจากปรับสภาพด้วยความร้อน ตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25 จะประกอบด้วยวัฏภาคดังต่อไปนี้

$$Li_4SiO_4 = 0.75 - 0.267151 = 0.4828 \text{ กรัม}$$

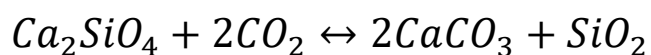
$$Ca_2SiO_4 = 0.3839 \text{ กรัม}$$

$$Li_2O = 0.1332 \text{ กรัม}$$

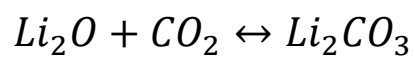
ขั้นตอนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์



กรัม	0.383931		0.446197	0.133921
โมล	0.002229	0.004458	0.004458	0.002229



กรัม	0.383931		0.446197	0.133921
โมล	0.002229	0.004458	0.004458	0.002229



กรัม	0.133208		0.329413
โมล	0.004458	0.004458	0.004458

ดังนั้น น้ำหนักโดยรวมของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ

$$0.36+0.3+0.45+0.13+0.33 = 1.57 \text{ กรัม}$$

ร้อยละการเปลี่ยนแปลงโดยน้ำหนักเท่ากับ

$$(1.57-1)/1*100 = \text{ร้อยละ } 57 \text{ โดยน้ำหนัก}$$



ภาคผนวก ค  
ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทธิซิลิเกต

ตารางที่ ค1 ข้อมูลการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทธิซิลิเกต

ชนิดตัวดูดซับ	ถุ่กที่เก็บ ตัวอย่าง	ระยะเวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (นาทื)	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อย)
LH600	1	2	0.00
	2	4	0.075
	3	6	0.13
	4	8	0.56
	5	10	1.25
	6	12	1.88
	7	14	2.36
	8	16	2.68
	9	18	2.86
	10	20	3.01
LH700	1	2	0.00
	2	4	0.00
	3	6	0.00
	4	8	0.38
	5	10	1.07
	6	12	1.72
	7	14	2.30
	8	16	2.50
	9	18	2.74
	10	20	2.90

LH800	1	2	0.21
	2	4	0.14
	3	6	0.20
	4	8	0.83
	5	10	1.52
	6	12	1.97
	7	14	2.16
	8	16	2.51
	9	18	2.67
	10	20	2.87

2. ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลองแก๊ซพีเคชั้นด้วยไอน้ำของไบอ้อย

ตารางที่ ค2 ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์  
แมกนีเซียมออกไซด์และลิเทียมออกไซด์เกิดจากแก๊ซพีเคชั้นด้วยไอน้ำของไบอ้อย

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	องค์ประกอบ	ผลได้ (มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย)
Blank	ไฮโดรเจน	3.62
	คาร์บอนมอนอกไซด์	6.06
	มีเทน	2.17
	คาร์บอนไดออกไซด์	4.29
	รวม	6.14
แคลเซียมออกไซด์	ไฮโดรเจน	10.04
	คาร์บอนมอนอกไซด์	5.01
	มีเทน	2.27
	คาร์บอนไดออกไซด์	7.29
	รวม	24.62
แมกนีเซียมออกไซด์	ไฮโดรเจน	6.06
	คาร์บอนมอนอกไซด์	7.03
	มีเทน	2.96
	คาร์บอนไดออกไซด์	6.99
	รวม	23.04

ลิเทียมอโทซิลิเกต	ไฮโดรเจน	6.63
	คาร์บอนมอนนอกไซด์	4.88
	มีเทน	2.18
	คาร์บอนไดออกไซด์	7.09
	รวม	20.78

ตารางที่ ค3 ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LHMGO จากแกซิพีเคชันด้วยไอน้ำของใบ  
อ้อยที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิแกซิพีเคชันเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	องค์ประกอบ	ผลได้ (มิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อย)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	S.D.
LHMGO25	ไฮโดรเจน	9.51	10.91	10.21	0.70
	คาร์บอนมอนนอกไซด์	4.05	4.33	4.19	0.14
	มีเทน	2.67	2.44	2.55	0.11
	คาร์บอนไดออกไซด์	7.16	8.03	7.60	0.43
LHMGO50	ไฮโดรเจน	12.29	12.65	12.47	0.18
	คาร์บอนมอนนอกไซด์	3.68	3.68	3.68	0.00
	มีเทน	2.24	2.66	2.45	0.21
	คาร์บอนไดออกไซด์	10.89	9.24	10.06	0.83
LHMGO75	ไฮโดรเจน	9.39	9.47	9.43	0.04
	คาร์บอนมอนนอกไซด์	5.05	5.37	5.21	0.16
	มีเทน	2.26	2.49	2.37	0.12
	คาร์บอนไดออกไซด์	6.97	7.97	7.47	0.50

ตารางที่ ค4 ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LHMGO จากแกซิพีเคชั่นด้วยไอน้ำของใบ  
อ้อยที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแกซิพีเคชั่นต่างๆ

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อุณหภูมิ แกซิพีเคชั่น (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ	ผลได้ (มิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อย)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	S.D.
LHMGO50	600	ไฮโดรเจน	4.55	4.03	4.29	0.26
		คาร์บอนมอนอกไซด์	3.49	3.28	3.38	0.10
		มีเทน	1.09	1.10	1.10	0.00
		คาร์บอนไดออกไซด์	3.88	4.74	4.31	0.43
	700	ไฮโดรเจน	12.29	12.65	12.47	0.18
		คาร์บอนมอนอกไซด์	3.68	3.68	3.68	0.00
		มีเทน	2.24	2.66	2.45	0.21
		คาร์บอนไดออกไซด์	10.89	9.24	10.06	0.83
	800	ไฮโดรเจน	10.97	10.90	10.94	0.03
		คาร์บอนมอนอกไซด์	5.77	6.48	6.13	0.36
		มีเทน	3.22	3.32	3.27	0.05
		คาร์บอนไดออกไซด์	10.08	9.02	9.55	0.53

ตารางที่ ค5 ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LHCAO จากแกซิพีเคชั่นด้วยไอน้ำของไบอ้อย  
ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิแกซิพีเคชั่นเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	องค์ประกอบ	ผลได้ (มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	S.D.
LHCAO25	ไฮโดรเจน	12.47	11.90	12.18	0.29
	คาร์บอนมอนอกไซด์	3.84	3.85	3.85	0.01
	มีเทน	2.42	2.70	2.56	0.14
	คาร์บอนไดออกไซด์	0.66	0.47	0.56	0.09
LHCAO50	ไฮโดรเจน	10.67	9.79	10.23	0.44
	คาร์บอนมอนอกไซด์	4.24	4.57	4.41	0.16
	มีเทน	2.78	2.63	2.70	0.08
	คาร์บอนไดออกไซด์	2.16	1.64	1.90	0.26
LHCAO75	ไฮโดรเจน	10.80	11.27	11.03	0.24
	คาร์บอนมอนอกไซด์	3.88	4.10	3.99	0.11
	มีเทน	2.66	2.60	2.63	0.03
	คาร์บอนไดออกไซด์	2.74	4.64	3.69	0.95

ตารางที่ ค6 ข้อมูลผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของการทดลอง LHCAO จากแกซีพีเคชั้นด้วยไอน้ำของใบอ้อย  
ที่อุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหย 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแกซีพีเคชั้นต่างๆ

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อุณหภูมิ แกซีพีเคชั้น (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ	ผลได้ (มิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อย)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	S.D.
LHCAO50	600	ไฮโดรเจน	6.64	7.03	6.83	0.19
		คาร์บอนมอนอกไซด์	3.86	4.42	4.14	0.28
		มีเทน	2.18	2.41	2.30	0.11
		คาร์บอนไดออกไซด์	1.17	1.20	1.19	0.02
	700	ไฮโดรเจน	10.67	9.79	10.23	0.44
		คาร์บอนมอนอกไซด์	4.24	4.57	4.41	0.16
		มีเทน	2.78	2.63	2.70	0.08
		คาร์บอนไดออกไซด์	2.16	1.64	1.90	0.26
	800	ไฮโดรเจน	11.16	10.54	10.85	0.31
		คาร์บอนมอนอกไซด์	5.29	4.45	4.87	0.42
		มีเทน	3.19	2.62	2.91	0.28
		คาร์บอนไดออกไซด์	5.87	6.21	6.04	0.17

### 3. ข้อมูลการทดลองประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา LHCAO25

- น้ำหนักของ LHCAO25 ก่อนการทดลอง 1.01251 กรัม

ตารางที่ ค7 ข้อมูลน้ำหนักและร้อยละโดยมวลที่เปลี่ยนแปลงไปของ LHCAO25

จำนวนรอบการ ดูดซับ-คายซับ	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (กรัม)	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (ร้อยละโดยมวล)
1	0.1282	12.66
2	0.0875	8.64
3	0.0945	9.33
4	0.0920	9.09
5	0.0819	8.09
6	0.0783	7.73
7	0.0698	6.89

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายต่อพงษ์ คงสนั่นทน
วัน เดือน ปี เกิด	2 พฤศจิกายน 2536
สถานที่เกิด	ลพบุรี
วุฒิการศึกษา	ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	99/40 หมู่ 4 ถนนพหลโยธิน ตำบลโคกสำโรง อำเภอกอเขมา จังหวัด ลพบุรี 15120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY