

การผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สฟิเคชั่นด้วยไอน้ำของไบอ้อยโดยใช้  $\text{NiO}/\text{CaO}-\text{Li}_4\text{SiO}_4$



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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



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 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สซิโพลีเอทิลีนด้วยไอน้ำของไบอ้อยโดย ใช้ NiO/CaO-Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>
โดย	น.ส.พีชช รุณะเกียรติ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)	
.....	กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภชิตา เกริกไกวล์)	

เพชร ชูณะเกียรติ : การผลิตไฮโดรเจนจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อยโดยใช้  
 NiO/CaO-Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>. ( HYDROGEN PRODUCTION FROM STEAM GASIFICATION OF  
 SUGARCANE LEAVES USING NiO/CaO-Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ประพันธ์  
 คูชลธารา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบ  
 อ้อยโดยใช้ NiO/CaO-Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> โดยการทดลองถูกดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสอง  
 ชั้น จากผลการทดลองพบว่าการใช้ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต (Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) ร่วมกับตัวดูดซับ  
 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าการใช้ตัวดูดซับลิเทียม  
 อโทซิลิเกตหรือแคลเซียมออกไซด์เพียงอย่างเดียว บ่งชี้ถึงการทำงานร่วมกันของแคลเซียม  
 ออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกต ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่  
 ได้มีแนวโน้มของผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สูงขึ้น เนื่องจากการดูดซับของ  
 คาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/CaO-Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีผลได้  
 และความเข้มข้นของไฮโดรเจนสูงชันเป็นผลมาจากการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวและรีฟอร์มมิงด้วย  
 ไอน้ำของสารระเหย การศึกษาผลของอุณหภูมิ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊ส  
 รวมมีค่าสูงชันจากการแตกตัวด้วยความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลงจากการดูด  
 ซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง นอกจากนี้จากการศึกษาผลของวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่  
 ต่างกันพบว่าวิธีอิมเพรกเนชันร่วมจะให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนสูงชันที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เคมีเทคนิค  
 ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6171904823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: hydrogen production, steam gasification, lithium orthosilicate,  
calcium oxide, nickel oxide

Petch Chunakiat : HYDROGEN PRODUCTION FROM STEAM GASIFICATION OF  
SUGARCANE LEAVES USING NiO/CaO-Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>. Advisor: Assoc. Prof. PRAPAN  
KUCHONTHARA, Ph.D.

This work aimed to study the hydrogen production from steam gasification of sugarcane leaves using NiO/CaO-Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>. Experiments were carried out using a two-stage fixed-bed reactor. The results indicated that concentration and yield of the hydrogen when using lithium orthosilicate (Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) with calcium oxide (CaO) is higher than that using only either lithium orthosilicate or calcium oxide. This implied a synergistic effect of calcium oxide and lithium orthosilicate. Moreover, the concentration and yield of hydrogen tended to increase when increasing the loading amount of calcium oxide. It is attributable to the promotion of carbon dioxide absorption. Using NiO/CaO-Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> catalysts gave high yield of gas production due to catalytic cracking of volatile and steam reforming. The influence of temperature was also examined. At high temperature, yield of hydrogen production increased because of the enhancement of thermal cracking. On the other hand, concentration of hydrogen production decreased due to the limitation of carbon dioxide absorption at a high temperature. In addition, the different catalyst synthesis methods were investigated. The results indicated that the co-impregnation method was the most effective, leading to the highest concentration of hydrogen.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา ที่กรุณามอบความรู้ ให้คำปรึกษา แนะนำและให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้มอบความรู้ตลอดจนคำปรึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอกราบขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบ ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภชิตา เกริกไควล์ กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญมาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและความคิดเห็นเพื่อปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษา อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยทั้งในเรื่องของการจัดการงานธุรการอุปกรณ์งานวิจัยและเทคนิคการวิเคราะห์ต่าง ๆ

ขอขอบคุณสมาชิกในครอบครัวที่คอยดูแลและเป็นกำลังใจ รวมถึงคอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณ คุณนิพิฐพนธ์ ปะนามะสา ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ อย่างเต็มที่ ตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ และ น้อง ๆ ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

งานวิจัย “การผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สซิพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยโดยใช้ निकเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกไซด์” จะสำเร็จไปไม่ได้เลยหากขาดทุนสนับสนุนจากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนการศึกษาเฉพาะค่าเล่าเรียนประเภท 60/40 ระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณดีความชอบทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้แก่บุคคลดังที่กล่าวข้างต้น รวมถึงผู้มีพระคุณท่านอื่นที่ยังไม่ได้กล่าวนามมา ณ โอกาสนี้

เพ็ชร ชูณะเกียรติ

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 ชีวมวล (biomass).....	5
2.2 กระบวนการแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงาน.....	18
2.3 แก๊ซิฟิเคชัน (gasification).....	21
2.4 แก๊ซิฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic gasification).....	25
2.5 แก๊ซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับ (sorption-enhanced gasification) .....	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32

บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	34
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.2 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษาแกซีฟิเคชัน .....	36
3.3 วิธีการทดลอง.....	37
3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	41
3.5 ตัวแปรที่ศึกษา .....	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	45
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไบอ้อย.....	46
4.2 ผลของตัวดูดซับลิเทียมออกโทซิลิเกตและตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตต่อ ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส .....	47
4.3 ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตต่อผลได้ ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส .....	53
4.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตต่อผลได้ของ ผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส .....	57
4.5 ผลของปริมาณนิกเกิลออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออก โทซิลิเกตต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส .....	61
4.6 ผลของอุณหภูมิแกซีฟิเคชันต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกต .....	63
4.7 เปรียบเทียบผลการทดลองของ Ni5Ca15Li และ Ca15Li จากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบ อ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส .....	67
4.8 ผลของวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตต่อ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศา เซลเซียส.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	72



5.1 สรุปผลการทดลอง .....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	74
บรรณานุกรม.....	75
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	90



## สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 2

ตารางที่ 2.1 สถิติการใช้พลังงานทดแทนด้านต่าง ๆ ตั้งแต่ปี 2557 ถึง 2561.....	11
ตารางที่ 2.2 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย.....	13
ตารางที่ 2.3 พื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตอ้อยปีการผลิต 2561/62.....	14
ตารางที่ 2.4 สมการของปฏิกิริยาระหว่างซาร์หรือสารระเหยจากขั้นตอนไพโรไลซิสกับสารร่วมแกซีฟาย.....	23

บทที่ 3

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สตัวอย่าง .....	42
--	----

บทที่ 4

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณบนฐานข้อมูลที่ได้รับมาของไบอ้อย (proximate analysis, as received basis) .....	46
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุองค์ประกอบบนฐานแห้งไร้เถ้า (ultimate analysis, dry ash-free basis).....	47
ตารางที่ 4.3 ผลได้ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวดูดซับลิเทียมออร์โทซิลิเกต Ca <sub>5</sub> Li Ca <sub>10</sub> Li Ca <sub>15</sub> Li และแคลเซียมออกไซด์.....	54

ตารางที่ 4.4 ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออร์โทซิลิเกต	59
---	----

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข1 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส .....	85
ตารางที่ ข2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานด้วยเทคนิค GC.....	85
ตารางที่ ข3 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส .....	86
ตารางที่ ข4 การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส .....	86

ตารางที่ ข5	การคำนวณผลได้ขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่ 1.....	87
ตารางที่ ข6	การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	88



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญรูปภาพ

## หน้า

บทที่ 2	
รูปที่ 2.1 พันธะ $\beta$ -1,4-glucoside ของเซลลูโลส.....	6
รูปที่ 2.2 พันธะไฮโดรเจนภายในและภายนอกโครงสร้างเซลลูโลส.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส.....	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของลิกนิน.....	8
รูปที่ 2.5 การใช้พลังงานทดแทนปี 2557 – 2562.....	9
รูปที่ 2.6 สัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนขั้นสุดท้ายปี 2562 ..	10
รูปที่ 2.7 กราฟของ Van Krevelen.....	17
รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบฐานข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิง.....	18
รูปที่ 2.9 การแปรสภาพทางเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์.....	20
รูปที่ 2.10 แผนผัง C-H-O แสดงการเปลี่ยนชีวมวลด้วยกระบวนการแบบต่าง ๆ.....	22
รูปที่ 2.11 กลไกหลักในแกซิฟิเคชัน.....	22
รูปที่ 2.12 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล.....	26
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น.....	35
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น.....	36
รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	42
รูปที่ 3.4 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟลกชันสเปคโตรสโคปี.....	43
รูปที่ 3.5 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสปี.....	43

บทที่ 4

รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ และ $\text{Ca}_5\text{Li}$ ที่สังเคราะห์ได้.....	47
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ และ $\text{Ca}_5\text{Li}$ ที่ผ่านแกซีพีเคชั่นที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	49
รูปที่ 4.3 ลักษณะสัญญาณของตัวดูดซับ ก) $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ และ ข) $\text{Ca}_{15}\text{Li}$ .....	49
รูปที่ 4.4 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ $\text{Ca}_5\text{Li}$ และ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (blank) ที่ อุณหภูมิแกซีพีเคชั่น 700 องศาเซลเซียส.....	51
รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของ $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ $\text{Ca}_5\text{Li}$ และ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (blank) ที่อุณหภูมิแกซีพีเคชั่นที่ 700 องศาเซลเซียส.....	52
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ $\text{Ca}_5\text{Li}$ $\text{Ca}_{10}\text{Li}$ และ $\text{Ca}_{15}\text{Li}$ ที่สังเคราะห์ได้ .....	53
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ $\text{Ca}_5\text{Li}$ $\text{Ca}_{10}\text{Li}$ และ $\text{Ca}_{15}\text{Li}$ ที่ผ่านแกซีพีเค ชัน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	55
รูปที่ 4.8 ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลอง (เส้นทึบ) และผลได้จากการทำนาย (เส้นปะ) .....	56
รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีพีเคชั่น ด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส .....	57
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ $\text{Ni}_5\text{Ca}_{15}\text{Li}$ $\text{Ni}_{10}\text{Ca}_{15}\text{Li}$ และ $\text{Ni}_{15}\text{Ca}_{15}\text{Li}$ ที่สังเคราะห์ได้.....	58
รูปที่ 4.11 ลักษณะสัญญาณของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}_5\text{Ca}_{15}\text{Li}$ .....	59
รูปที่ 4. 12 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ $\text{Ni}_5\text{Ca}_{15}\text{Li}$ และ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (blank) ที่ อุณหภูมิแกซีพีเคชั่น 700 องศาเซลเซียส.....	60
รูปที่ 4. 13 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของ $\text{Ni}_5\text{Ca}_{15}\text{Li}$ และ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (blank) ที่อุณหภูมิแกซีพีเคชั่น 700 องศาเซลเซียส .....	61
รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณนิกเกิลออกไซด์ที่มีต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำ ของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส .....	62

**รูปที่ 4.15** ผลของปริมาณนิกเกิลออกไซด์ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีพีเคชันด้วย  
ไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ..... 63

**รูปที่ 4.16** ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชันที่มีต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของ  
ไบอ้อย โดยใช้ตัวดูดซับ Ca15Li ..... 64

**รูปที่ 4.17** ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชันที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีพีเคชันด้วยไอ  
น้ำของไบอ้อย โดยใช้ตัวดูดซับ Ca15Li ..... 65

**รูปที่ 4.18** ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชันที่มีต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของ  
ไบอ้อย โดยใช้ตัวดูดซับ Ni5Ca15Li ..... 66

**รูปที่ 4.19** ผลของอุณหภูมิแกซีพีเคชันที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีพีเคชันด้วยไอ  
น้ำของไบอ้อย โดยใช้ตัวดูดซับ Ni5Ca15Li ..... 67

**รูปที่ 4.20** ผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของ Ca5Li และ Ni5Ca15Li ที่อุณหภูมิ แกซีพี  
เคชัน 700 องศาเซลเซียส..... 68

**รูปที่ 4.21** องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของ Ca5Li และ Ni5Ca15Li ที่เวลา 5 นาทีแรก..... 69

**รูปที่ 4.22** องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700  
องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li ที่มีวิธีการเตรียมต่างกัน ..... 70

**รูปที่ 4.23** ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่เวลา 5 นาทีแรก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li ที่มีวิธีการ  
เตรียมต่างกัน ..... 71

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานจากน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ และถ่านหินเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และการเติบโตทางเศรษฐกิจ ส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์ ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน วิธีการที่จะช่วยลด การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การใช้แหล่งพลังงานทางเลือกทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจาก ฟอสซิลซึ่งชีวมวลถือเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อย ออกมาจากการใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลจะถูกนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชและ หมุนเวียนเป็นวัฏจักร อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลาย ชนิดที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการแปรรูปเป็นพลังงาน

ไฮโดรเจนจัดเป็นพลังงานสะอาดและสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยกระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากชีวมวลมี 2 วิธี คือ กระบวนการทางเคมีความร้อน (thermochemical conversion) และ กระบวนการทางชีวภาพ (biological conversion) ซึ่ง กระบวนการทางชีวภาพจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าและใช้พลังงานน้อยกว่าเนื่องจากทำงาน ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า แต่ก็ให้อัตราและผลผลิตของไฮโดรเจนต่ำ ในทางกลับกันกระบวนการทาง เคมีความร้อนจะเป็นกระบวนการที่มีความรวดเร็วและให้ผลผลิตไฮโดรเจนที่สูง [1]

แก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนรูปแบบหนึ่งที่เปลี่ยน ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส โดยมีน้ำเป็นสารร่วมแก๊สฟาย ซึ่งน้ำจะทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอนที่ อยู่ในสถานะแก๊ส ผ่านปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) ซึ่งเชื้อเพลิงแก๊สที่ผลิตได้ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรงหรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารมูลค่าเพิ่มอื่น ๆ ได้ต่อไป อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดคือผลได้ของแก๊สที่ผลิตจากชีวมวลมีค่าต่ำ ในขณะที่มีประมาณของทาร์สูง [2, 3] ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มการแตกตัวของซาร์และทาร์ รวมทั้ง เร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดในแก๊สซิเคชัน ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้น รวมทั้งช่วยปรับปรุง องค์ประกอบและคุณภาพของผลิตภัณฑ์แก๊ส [4] นิกเกิลออกไซด์ (NiO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูก พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพสูงต่อการเกิดแก๊สซิเคชันของชีวมวลและการลดการเกิดทาร์ นอกจากนี้ ยังเป็นที่นิยมเนื่องจากราคาถูก [5-8] อย่างไรก็ตามแก๊สที่ผลิตได้จะมีองค์ประกอบของไฮโดรเจนต่ำ และไม่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างคุ้มค่า ดังนั้นการเพิ่มตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถูกประยุกต์ใช้ ในแก๊สซิเคชันเพื่อดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า

แก๊สซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับ (sorption-enhanced gasification) ส่งผลให้ข้อจำกัดทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาชิฟต์ (water-gas shift reaction, WGS) ลดลง และผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น [9, 10] ซึ่งไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่มีค่าความจุพลังงานสูงจึงทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีคุณภาพสูงขึ้น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง ราคาถูกและหาได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดกีดกันในเรื่องของการคายซับที่อุณหภูมิสูงและเสถียรภาพในการใช้ซ้ำต่ำ [11] ในขณะที่ลิเทียมอโทซิลิเกต ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง ง่ายต่อการคายซับและนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีเสถียรภาพ และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง แต่ข้อเสียของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตคือมีพื้นที่ผิวต่ำและเกิดการจับกลุ่มก้อน (agglomeration) ได้ง่าย [12] ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการเจือ (doping) ธาตุหรือสารประกอบบางตัวลงไปโครงสร้างของตัวดูดซับเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการดูดซับและเสถียรภาพของตัวดูดซับ

ในงานวิจัยนี้เน้นศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต ต่อแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวลในการการผลิตไฮโดรเจน โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างนิกเกิลออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกต รวมทั้งอุณหภูมิแก๊สซิฟิเคชันที่มีต่อผลได้ของไฮโดรเจนจากแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต

1.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราส่วนระหว่างนิกเกิลออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกตที่มีต่อผลได้ของไฮโดรเจนจากแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาผลของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตที่มีต่อแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตที่มีต่อแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย และศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สซิฟิเคชันต่อประสิทธิภาพการทำงานของแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำที่เพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล



## 1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี งานวิจัย และเอกสารที่เกี่ยวข้องกับแกซีพีเคชั้นด้วยไอน้ำที่เพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับคาร์บอนไอออกไซด์

1.5.2 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และเตรียมเครื่องมือที่ต้องใช้ในการวิจัย

1.5.3 วิเคราะห์สมบัติของไบอ้อย

1.5.3.1 องค์ประกอบของชีวมวลโดยประมาณ (proximate analysis) ได้แก่ ความชื้น เถ้า สารระเหย และ คาร์บอนคงตัว

1.5.3.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHNS element analyzer)

1.5.4 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต

1.5.4.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตด้วยวิธีการโซลิด-สเตททรานส์ฟอร์เมชัน (solid-state transformation) โดยชั่งซิลิกาฟุ่ม 1 กรัม ผสมกับลิเทียมไฮดรอกไซด์ให้มีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่อลิเทียมเท่ากับ 1:4.4 แล้วผสมกับเอทานอล 10 มิลลิลิตร ในโถงบดสาร ทำการบดสารเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการเผา (calcination) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศด้วยอัตราการให้ความร้อน (temperature ramp rate) เท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

1.5.4.2 การสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตด้วยวิธีการอิมเพรกเนชัน (impregnation) โดยชั่งลิเทียมอโทซิลิเกต 10 กรัม ผสมกับสารละลายแคลเซียมไนเตรท ทำการกวนและระเหยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศ ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.5.4.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตด้วยวิธีการอิมเพรกเนชัน โดยชั่งแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต 10 กรัม ผสมกับสารละลายนิกเกิลไนเตรท ทำการกวนและระเหยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศ ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.5.5 ศึกษาการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้นโดยใช้ไบอ้อย 0.2 กรัม เป็นสารตั้งต้น ในขั้นแรกจะเป็นขั้นตอนการเกิดไพโรไลซิสของไบอ้อยได้ผลิตภัณฑ์

เป็นสารระเหยและซาร์ จากนั้นสารระเหยที่เกิดขึ้นจะถูกแก๊สอาร์กอน (Ar) ซึ่งเป็นแก๊สตัวพาที่มีอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที พาเข้าสู่ชั้นที่ 2 ซึ่งเป็นชั้นที่เกิดแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยกำหนดให้อัตราการป้อนเข้าของน้ำ (water injection rate) มีค่าเท่ากับ 0.1 กรัมต่อนาที และมีตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัมรองรับอยู่ หลังจากนั้นไอระเหยจะถูกทำให้เย็นลงเพื่อกำจัดทาร์และน้ำที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออก จากผลิตภัณฑ์แก๊ส และผ่านซิลิกาเจลเพื่อลดความชื้นก่อนเก็บผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ด้วยถุงเก็บแก๊ส และนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อคำนวณหาผลได้ขององค์ประกอบใน ผลิตภัณฑ์แก๊ส

#### 1.5.6 ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ในการทำแก๊สฟิเคชัน

1.5.6.1 อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อลิเทียมมอโทซิลิเกต ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยมวล

1.5.6.2 อัตราส่วนระหว่างนิกเกิลออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมมอโทซิลิเกต ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยมวล

1.5.6.3 อุณหภูมิแก๊สฟิเคชัน 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส

#### 1.5.7 วิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังแก๊สฟิเคชัน

1.5.7.1 วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM)

1.5.7.2 วิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction spectroscopy; XRD)

#### 1.5.8 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ชีวมวล (biomass)

ชีวมวล หมายถึง สารอินทรีย์ของพืชหรือสัตว์ที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติผ่านกระบวนการทางชีวภาพ รวมทั้ง ของเสียอินทรีย์ มูลสัตว์ เศษวัสดุเหลือใช้และขยะที่ได้จากการเกษตร ชุมชนหรืออุตสาหกรรม ดังนั้นลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างและองค์ประกอบของชีวมวลจึงมีความหลากหลาย ชีวมวลถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน (renewable energy resource) เนื่องจากสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนพลังงานจากฟอสซิล (fossil fuel) ที่มีปริมาณจำกัด ในขณะที่ชีวมวลสามารถผลิตทดแทนขึ้นมาใหม่ได้ในระยะเวลาสั้น การมีส่วนร่วมในเชิงบวกอีกประการหนึ่งคือการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) ในชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากการใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลจะถูกนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชและหมุนเวียนเป็นวัฏจักรทำให้สมดุลคาร์บอนไดออกไซด์เป็นศูนย์ [13, 14]

##### 2.1.1 ประเภทของชีวมวล

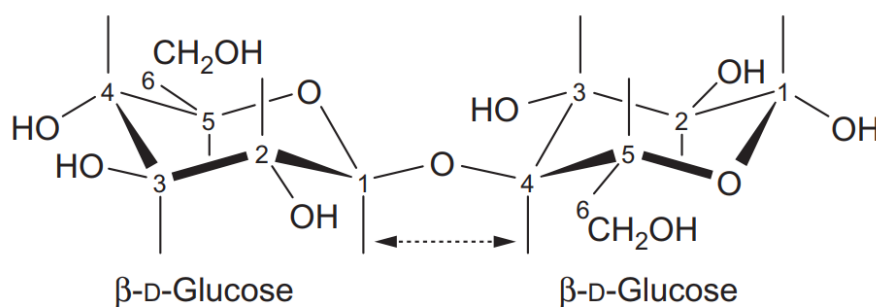
การแบ่งประเภทของชีวมวลสามารถแบ่งออกได้หลายลักษณะตามเกณฑ์ที่กำหนด อาจแบ่งตามลักษณะทางชีววิทยา ลักษณะทางกายภาพ หรือแบ่งตามแหล่งกำเนิดของชีวมวล ซึ่งในที่นี้จะแบ่งชีวมวลออกเป็น 2 ประเภทหลักตามลักษณะทางชีวภาพ ดังนี้

- ชีวมวลประเภทไม้ (woody biomass) คือชีวมวลที่มีเนื้อไม้ ได้แก่ ไม้ยูคาลิปตัส ไม้ยางพารา ต้นสน ต้นปาล์ม เป็นต้น
- ชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้ (non-woody biomass) คือชีวมวลนอกเหนือจากชีวมวลประเภทไม้ ได้แก่
  - พืชล้มลุก เช่น ข้าว อ้อย ข้าวโพด หญ้า ทานตะวัน เป็นต้น
  - พืชน้ำ เช่น ผักตบชวา สาหร่าย เป็นต้น
  - วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและการแปรรูป เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชานอ้อย ฟาง กากน้ำตาลซีลี้อย เปลือกไม้ เศษเยื่อไม้จากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น
  - ขยะมูลฝอย เช่น เศษอาหาร เศษขยะชุมชน น้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นต้น
  - ของเสียจากสัตว์

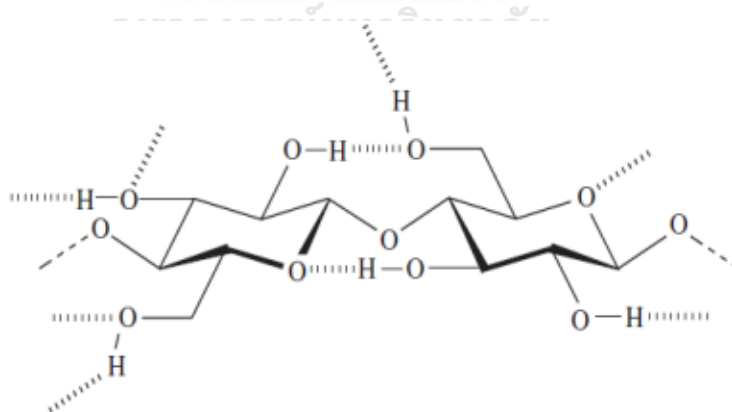
### 2.1.2 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ลิกนิน (lignin) แป้ง (starch) โปรตีน (protein) สารอินทรีย์ (organic compounds) และอนินทรีย์ (inorganic compounds) ตัวอื่น ๆ

เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ของกลูโคสที่มีจำนวนมากกว่า 10,000 โมเลกุล เชื่อมโยงกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4-glucoside ดังรูปที่ 2.1 หมู่ไฮดรอกไซด์ภายในโครงสร้างสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ทั้งภายในและภายนอกโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.2 ส่งผลให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงและย่อยสลายได้ยาก ซึ่งจัดเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ของพืชชีวมวลส่วนใหญ่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 40 ถึง 50 โดยน้ำหนักฐานแห้ง

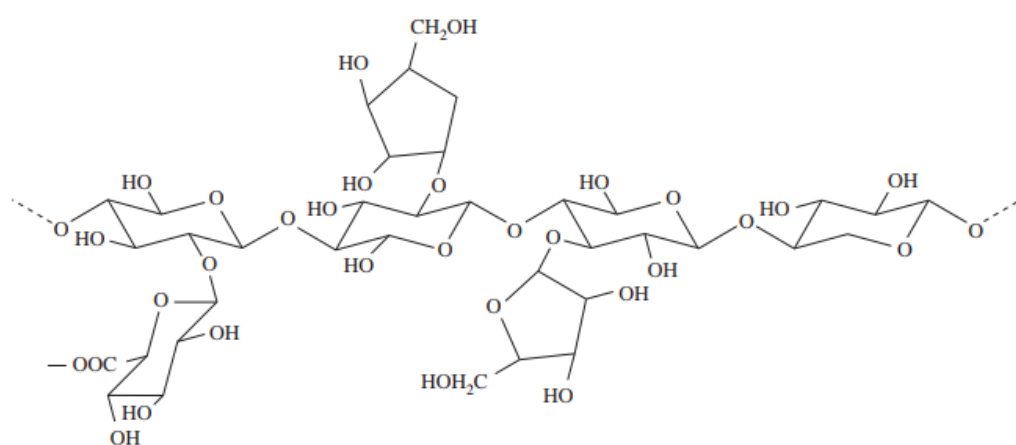


รูปที่ 2.1 พันธะ  $\beta$ -1,4-glucoside ของเซลลูโลส [13]



รูปที่ 2.2 พันธะไฮโดรเจนภายในและภายนอกโครงสร้างเซลลูโลส [15]

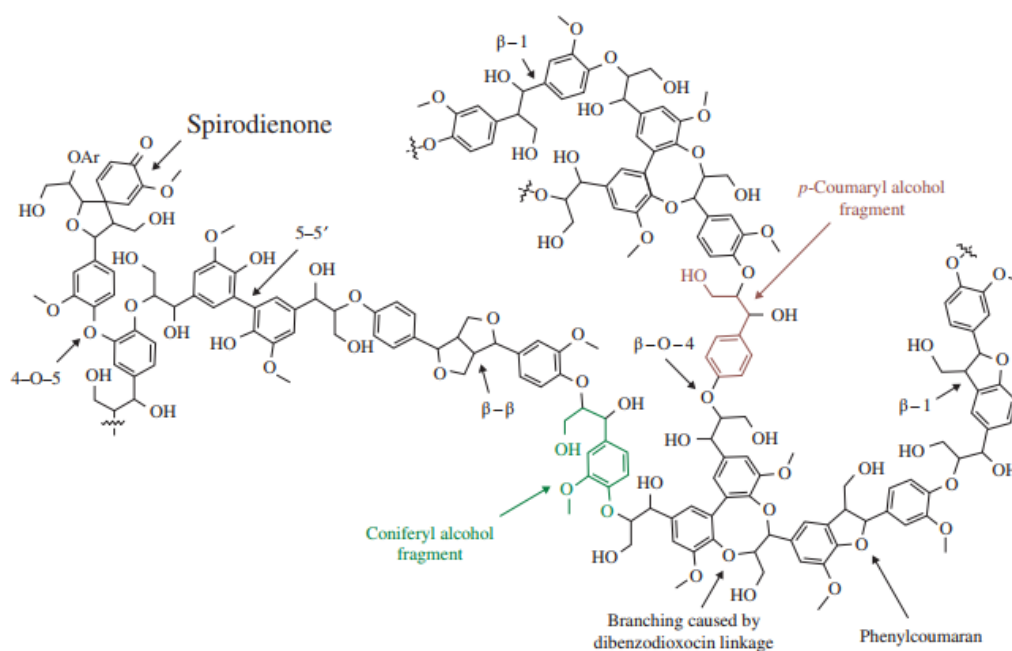
เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนผสมของพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 30,000 กิโลกรัมต่อกิโลโมล ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 5 อะตอม และ 6 อะตอม เช่น ไซโลส อาราบิโนส กลูโคส แมนโนส และกาแลกโตส โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยมอนอเมอร์ (monomers) ประมาณ 50-200 หน่วย โดยในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสสามารถเกิดพันธะไกลโคไซด์ (glycoside bond) เชื่อมโยงกันในตำแหน่งที่ 2, 3, 4 และ 6 ได้ ส่งผลให้โมเลกุลเรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบ คุณสมบัตินี้ทำให้เฮมิเซลลูโลสสามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น และสลายได้ง่าย ตัวอย่างโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [15]

ลิกนินเป็นอสัณฐานพอลิเมอร์ (amorphous polymers) ที่มีความซับซ้อนของโครงสร้างสูง โดยลิกนินจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์และสร้างความแข็งแรงให้กับเซลล์ ลิกนินมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ย่อยสลายได้ยากและมีค่าความร้อน (heating value) วัสดุชีวมวลมีองค์ประกอบของลิกนินอยู่ประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างโครงสร้างของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.4

แป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโมเลกุลมีความซับซ้อน ประกอบด้วยสององค์ประกอบคืออะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) อะไมโลสมีส่วนประมาณร้อยละ 15 ถึง 25 และอะไมโลเพคตินมีส่วนเป็นร้อยละ 75 ถึง 85 โครงสร้างอะไมโลสประกอบด้วยสายโซ่เชิงเส้นของ D-glucose ที่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -(1-4) glycosid อะไมโลเพคตินมีสายโซ่หลักที่คล้ายกับอะไมโลส แต่มีกิ่งก้านที่ประกอบด้วยกลูโคสที่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -(1-6) glycoside



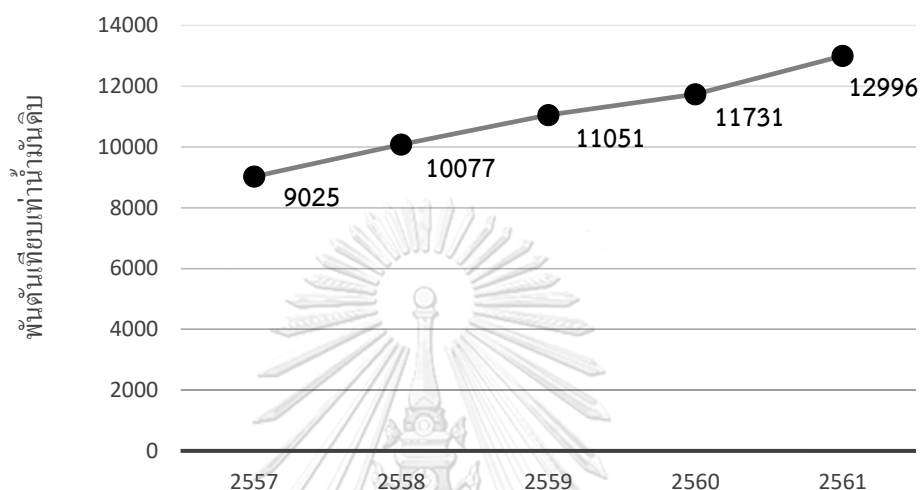
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของลิกนิน [15]

### 2.1.3 ศักยภาพทางด้านพลังงานของชีวมวล

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานจัดทำรายงานสถานการณ์พลังงานของประเทศไทยประจำปี 2561 [16] พบว่าประเทศไทยจะมีแนวโน้มการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพลังงานทดแทนในที่นี้ ประกอบไปด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ ชีวมวล แก๊สชีวภาพ ขยะ และเชื้อเพลิงชีวภาพ โดยจะถูกใช้งานในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน และพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพ ดังนั้นปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศจะลดลง และมีการประยุกต์ใช้งานรวมถึงการพัฒนาเชื้อเพลิงจากพลังงานทางเลือกมากยิ่งขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายสนับสนุนจากภาครัฐที่มุ่งเน้นไปที่การส่งเสริมการผลิตพลังงานจากวัสดุพลังงานทดแทนได้อย่างเต็มศักยภาพ รวมถึงการกระจายการใช้พลังงานทดแทนไปทุกภาคส่วนของภูมิภาค ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015)

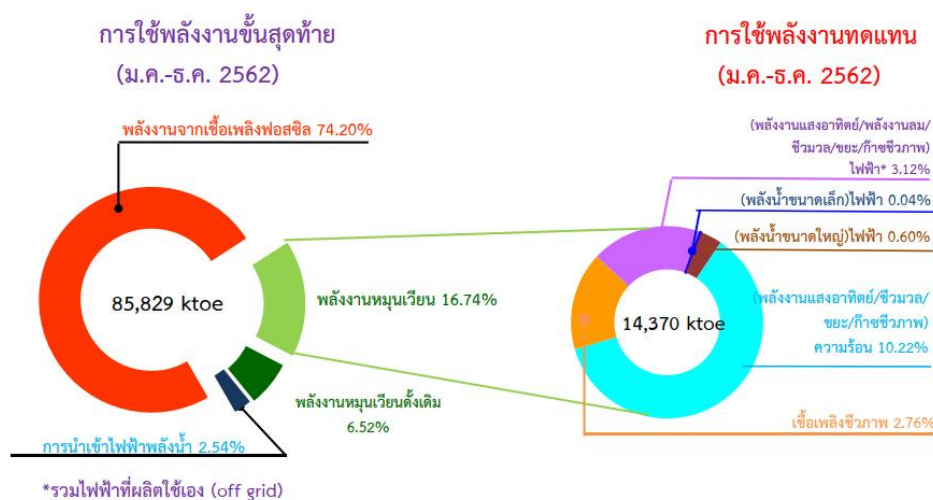
สถิติการใช้พลังงานทดแทนปี 2557 ถึง 2561 แสดงในรูปที่ 2.5 พบว่าการใช้พลังงานจากพลังงานทดแทนมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2561 มีการใช้พลังงานทดแทน 12,996 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มสูงขึ้นจากปี 2560 ร้อยละ 10.8 และคิดเป็นร้อยละ 15.48 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด ซึ่งจากการใช้งานที่เพิ่มขึ้นนี้ ส่งผลให้มีการนำเข้าพลังงานลดลงเป็นมูลค่ากว่า 214,434 ล้านบาท อีกทั้งยังลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 39.86 ล้านตัน

สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย ประจำปี 2562 [17] รายงานโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานจัดทำรายงาน พบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของปี 2562 เป็นปริมาณ 85,829 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปีก่อน ร้อยละ 2.6 คิดเป็นมูลค่ากว่า 1,214,069 ล้านบาท



รูปที่ 2.5 การใช้พลังงานทดแทนปี 2557 – 2562 [16]

สัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนขั้นสุดท้ายปี 2560 แสดงในรูปที่ 2.6 ปริมาณพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ถูกใช้คิดเป็นร้อยละ 74.20 ของพลังงานที่ถูกใช้ทั้งหมด ซึ่งถือเป็นแหล่งพลังงานหลัก ในขณะที่พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิมถูกใช้ร้อยละ 6.52 ได้แก่ ถ่าน ฟืน แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้เป็นแหล่งความร้อนในครัวเรือนและพลังงานหมุนเวียนที่ถูกใช้มีค่าเท่ากับ 63,685.12 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นร้อยละ 16.74 ซึ่งประกอบไปด้วย พลังงานจากแสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ และขยะ ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานหมุนเวียนที่ถูกใช้ในประเทศไทยจะถูกใช้ในรูปของพลังงานความร้อนมากที่สุด รองลงมาจะเป็นพลังงานในรูปของไฟฟ้าและเชื้อเพลิงชีวภาพ



รูปที่ 2.6 สัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนขั้นสุดท้ายปี 2562

[17]

สถิติการใช้พลังงานทดแทนด้านต่าง ๆ ตั้งแต่ปี 2557 ถึง 2561 [16] แสดงในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าปริมาณจากพลังงานไฟฟ้ามีอัตราการเติบโตสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานทดแทนชนิดอื่น มีค่าเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 19.7 เมื่อเปรียบเทียบกับปี 2560 กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน มีปริมาณรวม 11,369 เมกะวัตต์ ซึ่งกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากชีวมวลมีปริมาณมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 29.7 รองลงมาได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำขนาดใหญ่ พลังงานลม ก๊าซชีวภาพ ขยะ พลังงานน้ำขนาดเล็ก และพลังงานความร้อนใต้พิภพ คิดเป็นร้อยละ 26.1 15.7 9.7 4.1 2.0 1.6 และ 0.0 ตามลำดับ การใช้ความร้อนมีอัตราการเติบโตต่ำที่สุด โดยพลังงานความร้อนที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทนมากที่สุด มีปริมาณ 7,919 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นร้อยละ 90.3 รองลงมาได้แก่ ก๊าซชีวภาพ ขยะ และพลังงานแสงอาทิตย์ คิดเป็นร้อยละ 8.0, 1.6 และ 0.1 ตามลำดับ การใช้เชื้อเพลิงชีวภาพมีปริมาณ 8.4 ล้านลิตรต่อวัน โดยพบว่าปริมาณการใช้เอทานอลและไบโอดีเซลมีปริมาณเท่ากันเป็น 4.2 ล้านลิตรต่อวัน

เนื่องจากภาครัฐมีนโยบายผลักดันให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นและทำให้ภาคเอกชนมีความสนใจที่จะลงทุนในอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน โดยในปี 2561 พบว่า การลงทุนด้านพลังงานทดแทนจากการสนับสนุนของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานคิดเป็นมูลค่า 1,016.1 ล้านบาท ในส่วนของการลงทุนด้านพลังงานทดแทนจากการดำเนินการของสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (BOI) คิดเป็นมูลค่า 7,206.5 ล้านบาท



ตารางที่ 2.1 สถิติการใช้พลังงานทดแทนด้านต่าง ๆ ตั้งแต่ปี 2557 ถึง 2561 [16]

การใช้พลังงานทดแทน	ปริมาณ (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)					อัตราการ เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
	2557	2558	2559	2560	2561	
1. ไฟฟ้า <sup>1/2/</sup> (แสงอาทิตย์ ลม พลังน้ำขนาดเล็ก พลังงานน้ำขนาดใหญ่ ชีวมวล ขยะ และก๊าซชีวภาพ)	1,467	1,556	2,122	2,473	2,960	19.7
2. ความร้อน (แสงอาทิตย์ ชีวมวล ขยะ และก๊าซ ชีวภาพ)	5,775	6,579	7,182	7,322	7,919	8.2
3. เชื้อเพลิงชีวภาพ	1,783	1,942	1,747	1,936	2,117	9.3
- เอทานอล <sup>3/</sup>	874	879	684	733	781	6.5
- ไบโอดีเซล	909	1,063	1,063	1,203	1,336	11.1
รวม	9,025	10,07	11,051	11,731	12,996	10.8

1/ รวมการผลิตไฟฟ้านอกระบบ

2/ เริ่มรวมพลังงานน้ำขนาดใหญ่ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2558

3/ มีการเปลี่ยนวิธีคำนวณค่าความร้อนจากน้ำมันเบนซินเป็นเอทานอลตั้งแต่วันที่ 2559

#### 2.1.4 ศักยภาพทางด้านพลังงานและปริมาณของอ้อยในประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม แม้จะมีภาคอุตสาหกรรมและการท่องเที่ยวที่เพิ่มขึ้น แต่การเกษตรก็ยังคงมีความสำคัญเนื่องจากมีเกษตรกรเป็นจำนวนมากที่อาศัยอยู่ในสภาพที่ยากจน ดังนั้นรัฐบาลจึงมีแรงจูงใจในการสร้างโอกาสให้กับเกษตรกรในการกระจายรายได้โดยมีเป้าหมายเพื่อสร้างรายได้ใหม่ ๆ แต่ยังมี การป้องกันความเสี่ยงจากความผันผวนของราคาอาหารโลก

ปริมาณและศักยภาพของชีวมวลที่มีในประเทศไทยถูกรวบรวมโดยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน แสดงในตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าปริมาณชีวมวลทั้งหมดในปี.ศ.2557 ที่สามารถผลิตเป็นพลังงานได้ 6,642 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยชีวมวลที่มีปริมาณมากที่สุดที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานได้คือ ปาล์ม ฟางข้าว อ้อยและ ใบอ้อย ตามลำดับ นอกจากนี้กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและ

อนุรักษ์พลังงานตั้งเป้าหมายในแผนพัฒนาด้านพลังงานในปีพ.ศ.2579 ว่าจะสามารถผลิตพลังงานจากชีวมวลได้ 15,783 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยจะมีการพิจารณาหาแหล่งที่มาของชีวมวลเพิ่มขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อการผลิตพลังงาน [18]

อ้อยจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพทางด้านพลังงานสูงเมื่อเทียบกับชีวมวลประเภทอื่น ๆ เนื่องจากของเสียที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปอ้อยเป็นน้ำตาลสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานได้ทั้งหมด พลังงานที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปชีวมวลจากอ้อย 1 ตันเทียบเท่ากับพลังงานที่ได้จากน้ำมันดิบ 1 บาร์เรล ในกระบวนการผลิตน้ำตาล 1 ตันจะใช้พลังงานทั้งหมดประมาณ 25 ถึง 30 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ใช้ไอน้ำประมาณ 0.4 ตัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบด้วยน้ำตาลและกากอ้อยหรือขานอ้อยประมาณ 290 กิโลกรัม ซึ่งเทียบได้กับพลังงานไฟฟ้าประมาณ 100 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง [19]

ปัจจุบันขานอ้อยถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานที่จำเป็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำตาลเกือบ 100% ของปริมาณที่เกิดขึ้นทั้งหมด ทำให้ปริมาณที่เหลือนำมาใช้ประโยชน์ได้นั้นมีน้อยมาก ในส่วนของใบและยอดอ้อย ส่วนใหญ่จะถูกเผาทั้งก่อนตัดหรือหลังตัดเพื่อสะดวกต่อการตัดและการเตรียมพื้นที่เพาะปลูกในรอบต่อไป ในปัจจุบันในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการเก็บใบและยอดอ้อยนำเข้าโรงงานน้ำตาลพร้อมกับลำต้นเพื่อเพิ่มปริมาณชีวมวล แต่ยังคงอยู่ในปริมาณที่จำกัด ดังนั้นถ้ามีการจัดเก็บที่เป็นระบบและเหมาะสมกับพื้นที่เพาะปลูกของประเทศ ยอดและใบอ้อยที่เก็บได้จะนำมาเพิ่มศักยภาพในการผลิตพลังงานได้ประมาณ 2,544.31 กิโลตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ [20]

จากการสำรวจพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในปี 2561/62 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล โดยวิเคราะห์จากภาพถ่ายดาวเทียมและการเก็บข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม พบว่าพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในประเทศไทยมีทั้งหมด 12,236,074 ไร่ โดยเป็นพื้นที่เพาะปลูกของอ้อยส่งโรงงาน 11,957,201 ไร่ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นรายภูมิภาคได้ดังตารางที่ 2.3 เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลสถิติพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตอ้อยกับปีการผลิต 2560/61 จะพบว่าพื้นที่การเพาะปลูกอ้อยเพิ่มขึ้น 693,524 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 6.01 ซึ่งเพิ่มขึ้นทุกภาคทั่วประเทศ สืบเนื่องมาจากนโยบายขยายพื้นที่ปลูกอ้อยทดแทนในพื้นที่นาข้าวที่ไม่เหมาะสมของรัฐบาล และประกอบกับมีการตั้งโรงงานน้ำตาลขึ้นมาใหม่ในทุกภาคทำให้การส่งเสริมพื้นที่ปลูกอ้อยเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.2 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย [18]

ประเภท ชีวมวล	ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย (พ.ศ.2557)			ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยตามแผนพัฒนา พลังงานในปี พ.ศ.2579		
	ตันต่อปี	พินตัน เทียบเท่า น้ำมันดิบ	ศักยภาพ พลังงาน (เมกะวัตต์)	ตันต่อปี	พินตัน เทียบเท่า น้ำมันดิบ	ศักยภาพ พลังงาน (เมกะวัตต์)
แกลบ	432	0.14	0.05	432	0.14	0.05
ฟางข้าว	4,124,630	1,20	461	4,124,630	1,20	461
อ้อยและใบ อ้อย	,928,140	1,073	411	5,265,619	1,929	738
ชานอ้อย	-	-	-	21,280,000	3,712	1,421
ซังข้าวโพด	80,889	18	7	80,889	18	7
ลำต้นข้าวโพด	3,369,690	784	300	3,369,690	784	300
เหง้ามัน สำปะหลัง	2,838,125	369	141	3,372,560	439	168
ลำต้นมัน สำปะหลัง	1,052,636	388	149	2,084.755	769	294
ทางใบปาล์ม	14,606,671	2,265	867	33,586,191	5,208	1,993
ทะลายปาล์ม เปล่า	606,541	104	40	1,402,455	240	92
ใบปาล์ม	-	-	-	2,944,803	795	304
กะลาปาล์ม	-	-	-	619,959	248	95
ไม้ยางพารา	1,411,834	287	110	1,411,834	287	110
กะลามะพร้าว	79,678	31	12	79,678	31	12
ขุยมะพร้าว	71,875	27	10	71,875	27	10
ทางมะพร้าว	249,026	91	35	249,026	91	35
รวม	31,420,166	6,642	2,542	79,944,394	15,783	6,040

ตารางที่ 2.3 พื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตอ้อยปีการผลิต 2561/62 [21]

ภูมิภาค	พื้นที่ เพาะปลูก (ไร่)	ปริมาณอ้อย ทั้งหมด (ตัน)	พื้นที่อ้อยส่ง โรงงาน (ไร่)	ปริมาณอ้อย ส่งเข้าหีบ (ตัน)	ผลผลิต เฉลี่ย (ตัน/ไร่)
เหนือ	3,000,922	32,501,723	2,956,574	32,021,390	10.83
กลาง	3,203,034	33,279,946	3,077,219	31,972,676	10.39
ตะวันออกเฉียงเหนือ	5,345,711	58,779,951	5,279,917	58,051,703	10.99
ตะวันออก	686,407	6,916,529	643,491	6,484,092	10.08
รวม	12,236,074	131,478,148	11,957,201	128,529,862	10.75

#### 2.1.5 สมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวล

สมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวลแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการนำชีวมวลมาแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบสมบัติที่สำคัญในการพิจารณานำไปแปลงสภาพเป็นพลังงาน ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า ปริมาณคาร์บอนคงตัว ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่นบัลก์ และสัดส่วนธาตุองค์ประกอบ [14]

2.1.5.1 ความชื้น (moisture) คือค่าที่แสดงปริมาณน้ำที่อยู่ในชีวมวล ถ้าชีวมวลมีความชื้นสูงจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการระเหยน้ำ โดยส่วนใหญ่ชีวมวลจะมีปริมาณความชื้นสูง ซึ่งความชื้นสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ ความชื้นที่อยู่บริเวณผิวและรูพรุนของชีวมวล เรียกว่า ความชื้นภายนอกหรือความชื้นที่ผิว ส่วนความชื้นภายในหรือความชื้นสมดุลจะเป็นค่าความชื้นที่สมดุลกับความชื้นในอากาศ โดยการบอกปริมาณความชื้นในชีวมวลนิยมแสดงเป็นค่าร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักของสารทั้งหมด ซึ่งอาจใช้การคิดแบบฐานเปียก (wet basis) หรือแบบฐานแห้ง (dry basis) โดยการคิดแบบฐานเปียกคือปริมาณน้ำต่อน้ำหนักของชีวมวลทั้งหมดโดยที่ยังไม่หักความชื้นออก โดยค่าร้อยละความชื้นโดยฐานคิดแบบเปียกและแบบแห้ง 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 สารระเหย (volatile matter) คือไอระเหยหรือแก๊สที่เป็นส่วนประกอบของชีวมวล หรือวัสดุเหลือใช้ที่ถูกปลดปล่อยออกจากโครงสร้างโดยการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 400 - 500 องศาเซลเซียส การสลายตัวด้วยความร้อนข้างต้นจะเกิดผลิตภัณฑ์ 2 ส่วน คือ ไอของสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออก และขาร์หรือของแข็งที่เหลืออยู่ (รวมเถ้า) ส่วนของสารระเหยแบ่งออกเป็นสารระเหยที่ควบแน่นได้ (condensable volatile) และสารระเหยที่ควบแน่นไม่ได้ (non-condensable volatile) ปริมาณสารระเหยที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ปริมาณความร้อนและอัตราการให้ความร้อนขณะเกิดปฏิกิริยา

2.1.5.3 เถ้า (ash) คือสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในชีวมวล ซึ่งอยู่ในรูปของแข็ง เมื่อผ่านกระบวนการแปรสภาพต่าง ๆ จะไม่เกิดปฏิกิริยา โดนปริมาณเถ้าในชีวมวลจะแสดงเป็นค่าร้อยละ โดยน้ำหนัก นิยมใช้ฐานการคิดแบบแห้ง องค์ประกอบและปริมาณของสารอนินทรีย์ต่าง ๆ ในเถ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการนำชีวมวลไปใช้งานหรือแปลงสภาพผ่านกระบวนการแบบต่าง ๆ ดังนั้นคุณสมบัติของเถ้าจะต่างกันเมื่อชีวมวลมีองค์ประกอบต่างกัน กระบวนการที่ใช้ภาวะอุณหภูมิสูง เช่น การเผาไหม้ แกซิฟิเคชัน จะต้องคำนึงถึงจุดหลอมเหลวของเถ้า เนื่องจากเถ้าที่ถูกหลอมเหลวจะส่งผลให้เกิดการอุดตันท่อและเครื่องปฏิกรณ์ เกิดสแลก และส่งผลเสียต่อการถ่ายโอนความร้อน

2.1.5.4 ค่าความร้อน (heating value) คือปริมาณพลังงานหรือปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาเมื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (complete combustion) ค่าความร้อนที่แสดงมี 2 ประเภทคือ ค่าความร้อนสูง (high heating value: HHV) หรือ ค่าความร้อนทั้งหมด (gross heating value: GHV) และ ค่าความร้อนต่ำ (low heating value: LHV) หรือ ค่าความร้อนสุทธิ (net heating value: NHV)

ค่าความร้อนสูงคือค่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่รวมค่าความร้อนของการระเหยกลายเป็นไอของน้ำ (heat of vaporization) ดังนั้นน้ำในผลิตภัณฑ์จะอยู่ในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความร้อนดังกล่าวคือบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (bomb calorimeter) นอกจากนั้นยังสามารถคำนวณหาได้จากองค์ประกอบของธาตุในชีวมวลตามสมการของดูลอง (Dulong equation) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป แสดงดังสมการที่ 2.2

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

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

ค่าความร้อนต่ำคือค่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่รวมค่าความร้อนของการระเหยกลายเป็นไอของน้ำ (heat of vaporization) ดังนั้นน้ำในผลิตภัณฑ์จะอยู่ในสถานะของแก๊ส การวัดค่าความร้อนต่ำในทางปฏิบัติวัดได้ยาก จึงนิยมใช้การคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงดังสมการที่ 2.3

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

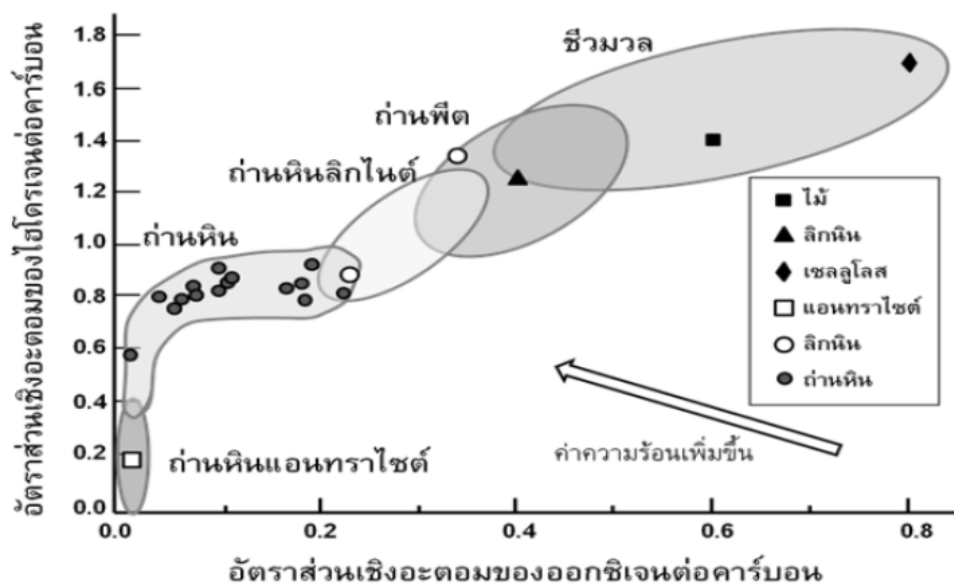
โดย	W	คือ ร้อยละความชื้น (ร้อยละโดยมวลฐานเปียก)
	H	คือ ร้อยละองค์ประกอบไฮโดรเจน (ร้อยละโดยมวลฐานแห้ง)

2.1.5.5 ความหนาแน่นบัลก์ (bulk density) คือค่าปริมาณน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของชีวมวล โดยปริมาตรที่ใช้คำนวณจะรวมช่องว่างของอากาศที่เกิดขึ้นจากช่องว่างระหว่างอนุภาคหรือชิ้นส่วนของชีวมวลที่มารวมกัน หรือรูพรุนของชีวมวล ซึ่งความหนาแน่นบัลก์จะไม่ใช้ความหนาแน่นจริงของชีวมวลเนื่องจากปริมาตรที่นำมาคำนวณหาความหนาแน่นจริงจะไม่รวมช่องว่างของอากาศ ความหนาแน่นบัลก์คำนวณได้ดังสมการที่ 2.4

$$\text{ความหนาแน่นบัลก์} = \frac{\text{น้ำหนักของชีวมวลทั้งหมด}}{\text{ปริมาตรที่ชีวมวลครอบครองอยู่}} \quad (2.4)$$

2.1.5.6 สัดส่วนธาตุองค์ประกอบ (elemental composition) โดยทั่วไปชีวมวลจะมีองค์ประกอบที่เป็นธาตุหลัก ๆ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ซึ่งปริมาณของธาตุองค์ประกอบจะแสดงเป็นค่าร้อยละโดยน้ำหนัก ที่ไม่รวมความชื้นและเถ้า กราฟของ Van Krevelen แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมลอะตอมของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) กับอัตราส่วนโมลอะตอมของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) กราฟ

ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบสมบัติทางเชื้อเพลิงแข็งของถ่านหิน ชีวมวลและวัสดุเหลือใช้ โดยเชื้อเพลิงที่มีค่า H/C และ O/C น้อย จะมีค่าความร้อนสูง จากกราฟจะพบว่าถ่านหินมีอัตราส่วน H/C และ O/C ต่ำกว่าชีวมวลแสดงว่ามีสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดีกว่าซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนของถ่านหินที่สูงกว่าชีวมวล



รูปที่ 2.7 กราฟของ Van Krevelen [14]

2.1.6 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุ ซึ่งข้อมูลที่ได้มาสามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านพลังงาน โดยการวิเคราะห์แบบประมาณประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า ส่วนข้อมูลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุประกอบด้วย 5 ธาตุองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์

การนำค่าการวิเคราะห์ดังกล่าวไปใช้จะต้องทราบรูปแบบของฐานข้อมูลที่ใช้ในการการรายงานค่าขององค์ประกอบเพื่อให้สามารถนำค่าต่าง ๆ ไปใช้ได้อย่างถูกต้อง โดยข้อมูลการวิเคราะห์แบบประมาณอาจแสดงในรูปแบบของฐานเปียก (wet basis) หรือเรียกว่าแบบฐานที่รับมา (as-received basis) และแบบฐานแห้ง (dry basis) ส่วนข้อมูลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุอาจแสดงในรูปแบบของฐานที่รับมา แบบฐานแห้ง และแบบฐานแห้งไร้เถ้า (dry-ash-free basis) ซึ่งรูปแบบ

ของฐานข้อมูลแบบต่าง ๆ จะแสดงในรูปที่ 2.8 โดยแบบฐานแห้งจะสามารถแยกออกเป็นสองประเภทย่อยคือ ฐานแห้งโดยอากาศ (air-dry basis) และฐานแห้งสุทธิ (total-dry basis) ซึ่งแตกต่างกันที่ ฐานแห้งสุทธิจะไม่รวมทั้งความชื้นที่ผิว (surface moisture:  $M_s$ ) และความชื้นภายใน (inherent moisture:  $M_i$ ) ส่วนฐานแห้งโดยอากาศจะความชื้นภายใน โดยทั่วไปหากกล่าวถึงฐานแห้งจะหมายถึง ฐานแห้งสุทธิ



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบฐานข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิง [14]

## 2.2 กระบวนการแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงาน

การแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงานเป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิง กระบวนการในการแปรสภาพชีวมวลประกอบด้วย 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ การแปรสภาพทางกายภาพ (physical conversion) การแปรสภาพทางชีวภาพ (biological conversion) และ การแปรสภาพเชิงเคมีความร้อน (thermochemical conversion)

### 2.2.1 การแปรสภาพทางกายภาพ

การแปรสภาพทางกายภาพเป็นกระบวนการแปรสภาพของชีวมวลเพื่อให้มีลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในกระบวนการต่อไป ซึ่งประกอบไปด้วย 3 กระบวนการ ได้แก่ การลดความชื้น (moisture reduction) การลดขนาด (size reduction) และการเพิ่มความหนาแน่น (densification)



2.2.1.1 การลดความชื้นจัดเป็นการปรับปรุงสภาพขั้นต้น (pretreatment process) ที่ใช้ในการกำจัดความชื้นหรือออกจากชีวมวล เนื่องจากความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการแปรสภาพต่าง ๆ และไม่ให้พลังงาน โดยการกำจัดความชื้นหรือน้ำออกจากชีวมวลสามารถทำได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การแยกน้ำ (dewatering) และการทำแห้ง (drying)

การแยกน้ำเป็นการลดความชื้นที่แยกน้ำออกมาในรูปของของเหลว ซึ่งเหมาะกับวัสดุที่มีความชื้นสูง มีลักษณะเปียก เช่น พีชน้ำ สาหร่าย น้ำเสีย ขยะสด วิธีการที่ใช้ในการแยกน้ำได้แก่ การกรอง การตกตะกอนหรืออาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นในการแยก

การทำแห้งเป็นการลดความชื้นที่แยกน้ำออกมาในรูปของไอน้ำ โดยน้ำจะถูกถ่ายโอนผ่านตัวกลางซึ่งจะมีการใช้ความร้อนในการระเหยน้ำออก ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับวัสดุที่ผ่านกระบวนการแยกน้ำมาแล้ว หรือมีความชื้นต่ำ การทำแห้งสามารถทำได้ 2 วิธีได้แก่ การทำแห้งด้วยอากาศ (air drying) และการทำแห้งด้วยความร้อน (thermal drying) ซึ่งการทำแห้งด้วยอากาศจะใช้อากาศแห้งที่มีความชื้นต่ำเป็นตัวกลางในการพาผลของน้ำออกหรือใช้อากาศอุ่นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นวิธีที่ใช้พลังงานต่ำ ดังนั้นความชื้นที่ลดได้จะเป็นความชื้นที่ผิว ส่วนการทำแห้งด้วยความร้อนจะใช้ความร้อนสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถกำจัดได้ทั้งความชื้นที่ผิวและความชื้นภายใน แต่วิธีนี้จะใช้พลังงานสูงจึงไม่เป็นที่นิยม

2.2.1.2 การลดขนาดของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากขนาดของวัสดุจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวล ความร้อน และอันตรายการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงมีการระบุขนาดของวัสดุโดยใช้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) หรือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (equivalent diameter) สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่ทรงกลม กระบวนการที่ใช้ในการลดขนาดได้แก่ การบีบและอัด (compression) กระแทก (impact) การชน (attrition) และการตัด (cutting) ซึ่งการเลือกใช้วิธีการต่าง ๆ จะต้องคำนึงถึงลักษณะของวัสดุ

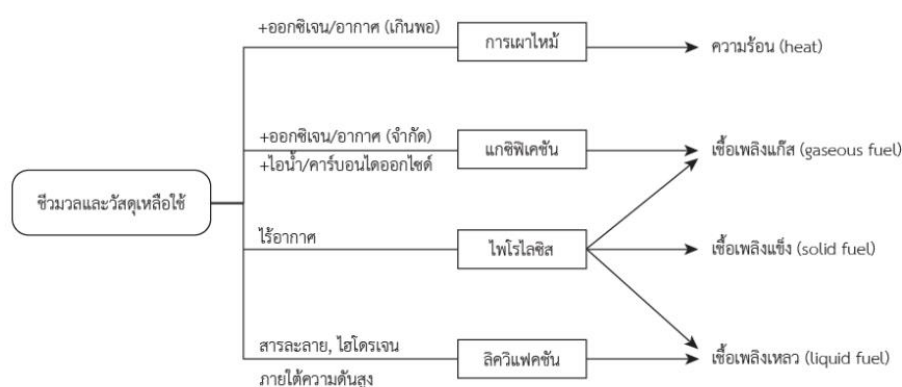
2.2.1.3 การเพิ่มความหนาแน่นให้วัสดุจะถูกใช้เพื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานหรือค่าความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric calorific value) ของเชื้อเพลิงแข็ง ทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพ รวมทั้งยังช่วยเพิ่มความหนาแน่นบดอัด ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านการขนส่งและการเก็บรักษาลดลง

### 2.2.2 การแปรสภาพทางชีวภาพ

การแปรสภาพทางชีวภาพคือการเปลี่ยนชีวมวลให้กลายเป็นพลังงานโดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับเอนไซม์ (enzyme) หรือจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ กระบวนการนี้จะดำเนินการที่ภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิต่ำความร้อนจากสิ่งแวดล้อมน้อย จึงทำให้กระบวนการนี้มีค่าใช้จ่ายต่ำ อีกทั้งยังดำเนินการง่าย ขั้นตอนน้อย จึงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก แต่ข้อเสียของกระบวนการดังกล่าวคืออัตราการสังเคราะห์พลังงานต่ำ ต้องใช้พื้นที่และเวลาในการดำเนินการสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ การแปรสภาพทางเคมีความร้อน อีกทั้งยังอาจเกิดปัญหาด้านการทำงานของเอนไซม์และจุลินทรีย์ได้ การแปรสภาพทางชีวภาพที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันได้แก่ การผลิตมีเทนชีวภาพ (biomethanation) และการหมักเอทานอล (ethanol fermentation)

### 2.2.3 การแปรสภาพเชิงเคมีความร้อน

การแปรสภาพเชิงเคมีความร้อนคือกระบวนการที่อาศัยความร้อนและการเกิดปฏิกิริยาเคมีในการแปรสภาพชีวมวลให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงพลังงาน ซึ่งข้อดีของกระบวนการดังกล่าวคือผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็นใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเคมีภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ อาทิ เอทานอล เมทานอล หรือสารปิโตรเคมีภัณฑ์ต่าง ๆ กระบวนการแปรสภาพเชิงเคมีความร้อนประกอบไปด้วย การเผาไหม้ (combustion) การไพโรไลซิส (pyrolysis) แกซิฟิเคชัน (gasification) และลิกวิแฟกชัน (liquefaction) โดยแต่ละกระบวนการจะให้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การแปรสภาพทางเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์ [14]

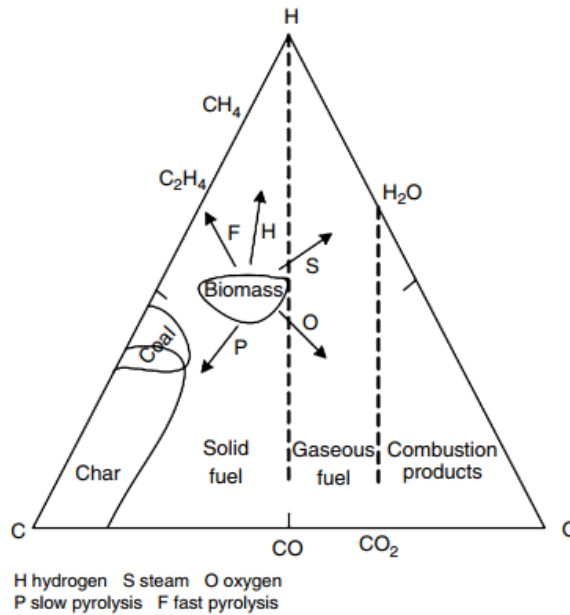
## 2.3 แก๊สซิฟิเคชัน (gasification)

แก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการแปรสภาพทางเคมีความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนหรือตัวออกซิไดซ์ในปริมาณที่จำกัด โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการจะอยู่ในรูปของของแข็งหรือของเหลว และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแก๊ส ซึ่งประกอบด้วย ไฮโดรเจน (hydrogen) คาร์บอนมอนอกไซด์ (carbon monoxide) คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน (methane) เป็นองค์ประกอบหลัก แก๊สซิฟิเคชันจะไม่เปลี่ยนพลังงานเคมีของชีวมวลให้กลายเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมดเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่อย่างจำกัด แต่จะเปลี่ยนให้กลายเป็นพลังงานเคมีในรูปของเชื้อเพลิงแก๊ส (gaseous fuel) เรียกว่าแก๊สสังเคราะห์ (synthetic gas หรือ syngas) หรือโปรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) บางส่วนที่ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจะถูกใช้ในปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดในแก๊สซิฟิเคชัน

### 2.3.1 สารร่วมแก๊สฟาย (gasifying agents)

สารร่วมแก๊สฟายเป็นสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีมวลโมเลกุลต่ำ โดยสารร่วมแก๊สฟายจะเป็นสารที่ป้อนเข้าไปยังระบบแก๊สซิฟิเคชันจากภายนอกหรือเป็นสารที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาภายในระบบก็ได้ โดยทั่วไปสารร่วมแก๊สฟายที่นิยมใช้ได้แก่ ออกซิเจน อากาศ ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน เป็นต้น สารร่วมแก๊สฟายมีบทบาทในการปรับสัดส่วนหรือกำหนดองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ต้องการ ดังนั้นการใช้สารร่วมแก๊สฟายที่ต่างกันจึงส่งผลต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ [14, 22] แนวโน้มการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แบบต่าง ๆ เมื่อใช้สารร่วมแก๊สฟายที่แตกต่างกันของไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชัน แสดงในรูปที่ 2.10

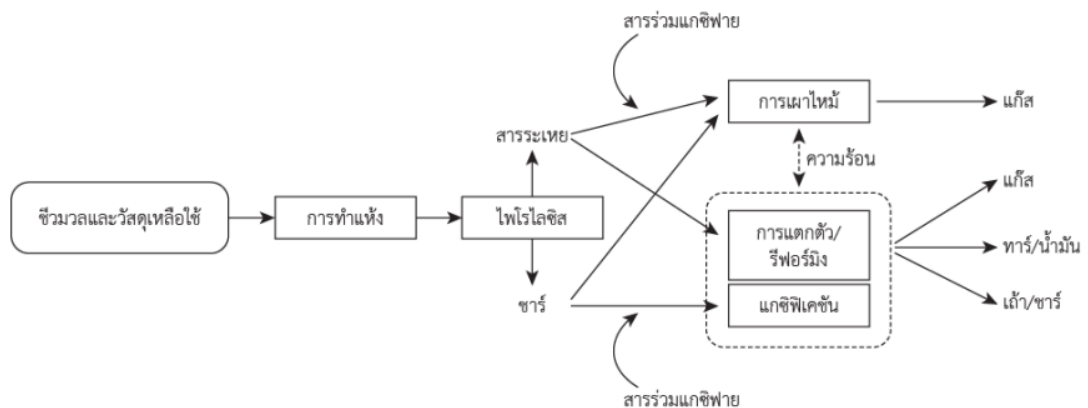
การใช้อากาศเป็นสารร่วมแก๊สฟายจะได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีค่าความร้อนต่ำประมาณ 4 - 7 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากอากาศมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก การเลือกใช้น้ำเป็นสารร่วมแก๊สฟายจะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีผลได้ของไฮโดรเจนและค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊ส (water-gas reaction) และมีการเจือปนของไนโตรเจนต่ำ การใช้ไฮโดรเจนเป็นสารร่วมแก๊สฟายที่มีความดันสูงและตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบการใช้งานจะส่งผลให้แก๊สสังเคราะห์มีค่าความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากมีองค์ประกอบของมีเทนมาก ส่วนการใช้ออกซิเจนเป็นสารร่วมแก๊สฟายจะให้แก๊สสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ [22, 23]



รูปที่ 2.10 แผนผัง C-H-O แสดงการเปลี่ยนชีวมวลด้วยกระบวนการแบบต่าง ๆ [22]

2.3.2 กลไกของแกซิฟิเคชัน

กลไกของแกซิฟิเคชันโดยทั่วไปประกอบด้วยขั้นตอนหลักคือ การทำแห้ง ไพโรไลซิส (pyrolysis) การเผาไหม้ การแตกตัวหรือรีฟอร์มมิงของสารระเหย แกซิฟิเคชันของชาร์ โดยมักเกิดขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แต่บางส่วนอาจเกิดขึ้นพร้อมกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาวะดำเนินการ รวมถึงลักษณะเครื่องปฏิกรณ์หรือเตาแกซิฟาย



รูปที่ 2.11 กลไกหลักในแกซิฟิเคชัน [14]

2.3.2.1 การทำแห้ง (drying) เป็นขั้นตอนการกำจัดความชื้นออกจากชีวมวล โดยพลังงานที่ใช้ในขั้นตอนนี้จะไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานของระบบลดลง โดยทั่วไปชีวมวลที่นำมาใช้ในแกซิฟิเคชันจะมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 20 ขั้นตอนอย่างง่ายของการทำแห้งแสดงดังสมการที่ 2.5



2.3.1.2 ไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะที่มีออกซิเจนหรืออากาศจำกัด โดยพันธะเคมีของชีวมวลจะถูกทำลายด้วยความร้อน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นของแข็งหรือที่เรียกว่าชาร์และส่วนที่สองคือสารระเหยที่มีสถานะเป็นแก๊ส ซึ่งเมื่ออุณหภูมิลดลงจะมีบางส่วนควบแน่นเป็นของเหลวที่เรียกว่าทาร์ ขั้นตอนอย่างง่ายของการไพโรไลซิสแสดงดังสมการที่ 2.6



2.3.1.3 แกซิฟิเคชันของชาร์ (char gasification) คือปฏิกิริยาระหว่างสารร่วมแกซิฟายกับชาร์และสารระเหยจากขั้นตอนไพโรไลซิส สมการของปฏิกิริยาระหว่างชาร์หรือสารระเหยจากขั้นตอนไพโรไลซิสกับสารร่วมแกซิฟายชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** สมการของปฏิกิริยาระหว่างชาร์หรือสารระเหยจากขั้นตอนไพโรไลซิสกับสารร่วมแกซิฟาย

ชนิดของสารร่วมแกซิฟาย	ปฏิกิริยา
ออกซิเจน	$2\text{C} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{CO}_2$
คาร์บอนไดออกไซด์	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$
น้ำ	$3\text{C} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$
ไฮโดรเจน	$\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$

เนื่องจากชาร์มีโครงสร้างที่ซับซ้อนจึงยากต่อการเขียนสูตรโครงสร้างและดุลสมการเคมี แต่ชาร์มีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นหลัก ดังนั้นจึงใช้คาร์บอนเป็นตัวแทนของชาร์เพื่อแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแกซิฟิเคชัน ดังนี้

ปฏิกิริยาอวเทอร์-แก๊ส (water-gas reaction) :



ปฏิกิริยาบูดูอาร์ด (boudouard reaction) :



ไฮโดรแกซิฟิเคชัน (hydrogasification reaction) หรือปฏิกิริยามีเทนชัน (Methanation reaction) :



ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation reaction) :



ปฏิกิริยาอวเทอร์-แก๊สชิฟต์ (water-gas shift reaction) :



ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) :



2.3.1.4 การเผาไหม้ของชาร์หรือออกซิเดชัน (char combustion หรือ oxidation) ปฏิกิริยาส่วนใหญ่ในแกซิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน มีเพียงบางปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนและไฮโดรเจนที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของชาร์ประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาหลักคือปฏิกิริยาการเผาไหม้ (complete combustion) หรือปฏิกิริยาออกซิเดชันแสดงดังสมการที่ 2.13 และปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation reaction) แสดงดังสมการที่ 2.14 ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาจะเกิดควบคู่กันไป โดยมีอุณหภูมิเป็นตัวกำหนดว่าปฏิกิริยาใดเกิดมากหรือน้อย

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (complete combustion)



ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation reaction) :



อุณหภูมิและความดันเป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินการของแกซิฟิเคชัน ปฏิกิริยาต่าง ๆ จะเกิดขึ้นไม่ได้หากดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียสเนื่องมาจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่ของแกซิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดำเนินการมีค่าประมาณ 800 องศาเซลเซียสขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล หากอุณหภูมิจากกระบวนการต่ำเกินไปจะส่งผลให้การ

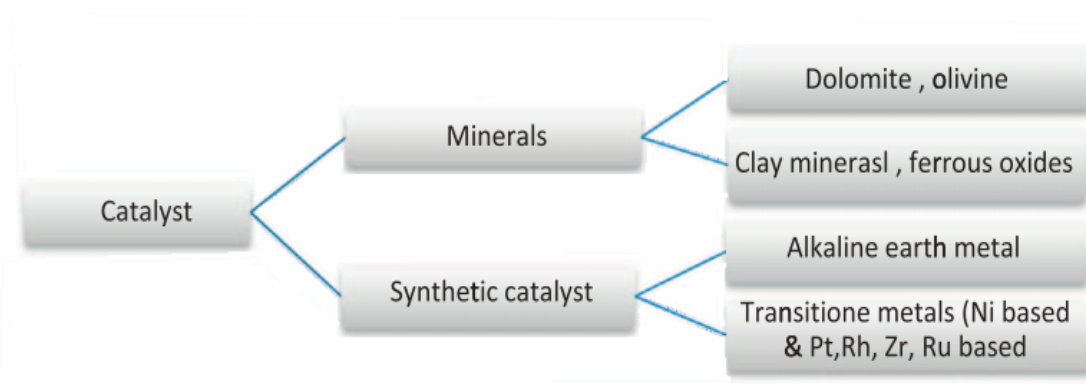
ถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาค (phase) ของแก๊สและชีวมวลเกิดได้ช้า ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการ

## 2.4 แก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic gasification)

ปัญหาของแก๊สซิฟิเคชันที่ต้องได้รับการศึกษาพัฒนาคือผลได้และคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์ต่ำหรือไม่เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน รวมถึงผลได้ของทาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นในปริมาณมาก เนื่องจากทาร์ที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ผลได้ของแก๊สต่ำลงและยังส่งผลเสียต่อการดำเนินกระบวนการและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ทาร์ก่อให้เกิดการสะสมตามอุปกรณ์ การอุดตัน ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านการถ่ายโอนมวลและความร้อนตามมา ดังนั้นแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อแก้ปัญหาของแก๊สซิฟิเคชันโดยลดปริมาณทาร์และผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการให้น้อยลง ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือมีราคาที่เหมาะสมผล ทนทานและเหมาะสมกับภาวะที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาเคมี สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้สูงยิ่งขึ้น สามารถลดปริมาณการทาร์ รวมถึงมีความทนทานต่อการเกิดซินเทอริง (sintering) และสามารถฟื้นฟูสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3, 22]

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในแก๊สซิฟิเคชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามการใช้งานได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ (primary catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาดาวนสตรีม (downstream catalyst) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิถูกใช้เพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาการสลายตัวของทาร์หรือรีฟอร์มมิงของทาร์เพื่อลดปริมาณทาร์ที่เกิดขึ้นและเพิ่มผลิตภัณฑ์แก๊สที่ต้องการ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาดาวนสตรีมถูกใช้เพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาต่าง ๆ ในแก๊สซิฟิเคชัน เช่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยไอน้ำ ปฏิกิริยา วอเตอร์-แก๊ส แก๊สซิฟิเคชันของซาร์ เป็นต้น เพื่อเพิ่มผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส

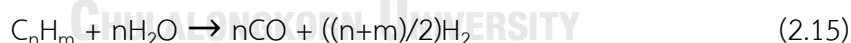
รูปที่ 2.12 แสดงการแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาตามลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่กลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาฐานแร่ธาตุจากธรรมชาติ (mineral based catalyst) และกลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาฐานสังเคราะห์ (synthesized catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มแรกจะเป็นแร่ธาตุต่างๆที่พบในธรรมชาติ เช่น โดโลไมต์ (dolomite) โอลิวีน (olivine) หรือแร่ธาตุจากดินเหนียว (clay minerals) เป็นต้น องค์ประกอบหลักในตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ จะประกอบไปด้วย ออกไซด์ของอะลูมิเนียม (aluminium) แคลเซียม (calcium) แมกนีเซียม (magnesium) และเหล็ก (iron) ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวมีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ในแก๊สซิฟิเคชัน กลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาฐานสังเคราะห์คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นมา ที่นิยมได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานโลหะกลุ่มอัลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth metal) และตัวเร่งปฏิกิริยาฐานโลหะทรานซิชัน (transition metal) เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานนิกเกิล (nickel-based catalysts)



รูปที่ 2.12 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล [3]

นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มโลหะทรานซิชันที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมที่ใช้ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากมีกัมมันตภาพ (activity) ในการเร่งปฏิกิริยาสูง ราคาไม่สูง รวมถึงมีความสามารถในการลดปริมาณคาร์ที่ดี และสามารถปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมต่อการใช้งานได้อย่างยืดหยุ่น ในสถานะการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในแก๊สซิฟิเคชัน นิกเกิลช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของไฮโดรคาร์บอนดังสมการที่ 2.12 และ 2.15 รวมทั้งสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาออกเตอร์-แก๊สซิฟิเคชันดังสมการที่ 2.11 ทำให้ปริมาณคาร์ลดลง เพิ่มผลได้ของแก๊สและเพิ่มคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ [24]

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) :



## 2.5 แก๊สซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับ (sorption-enhanced gasification)

แก๊สซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับเป็นกระบวนการที่นำตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> capture) มาประยุกต์ใช้ในแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อที่จะเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์ เนื่องจากองค์ประกอบของไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากแก๊สซิฟิเคชันค่อนข้างต่ำ ทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างคุ้มค่าหรือไม่สามารถนำไปใช้งานกับกระบวนการอื่น ๆ ได้ จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งสิ้นเปลืองทั้งพลังงาน เวลาและค่าใช้จ่าย [25]



### 2.5.1 ขั้นตอนพื้นฐานของแกซีฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับ

ปฏิกิริยาที่สำคัญในแกซีฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับจะมีอยู่ 2 ปฏิกิริยาได้แก่ ปฏิกิริยาดูดซับและคายซับของตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และปฏิกิริยาวอเตอร์-แก๊สชิฟท์ ดังสมการที่ 2.11 โดยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน [26, 27]

ขั้นตอนแรกคือการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) โดยตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะทำหน้าที่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาต่าง ๆ ในแกซีฟิเคชัน เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับออกจากกระบวนการ จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาวอเตอร์-แก๊สชิฟท์ นอกจากนั้นความร้อนที่ถูกคายออกมาจะช่วยในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในแกซีฟิเคชันและลดการถ่ายโอนความร้อนจากเตาปฏิกรณ์สู่เบดของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst bed)

ขั้นตอนที่สองคือการเปลี่ยนแปลงสมดุลปฏิกิริยาวอเตอร์-แก๊สชิฟท์ เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบต่ำลงจากการดักจับของตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ สมดุลของปฏิกิริยาวอเตอร์-แก๊สชิฟท์จะเลื่อนไปข้างหน้าส่งผลให้ปริมาณ ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์ลดต่ำลง ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอัตราส่วนนี้สามารถปรับค่าได้ตามปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับโดยปรับได้จากปริมาณของตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้เหมาะกับการนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้งานต่อไป

### 2.5.2 ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง (high temperature CO<sub>2</sub> sorbent materials)

การพัฒนาตัวดูดซับสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 400 องศาเซลเซียส) ได้รับความสนใจอย่างมาก การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรงที่อุณหภูมิสูงสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้โดยการเอาชนะความจำเป็นในการทำให้แก๊สเย็นลงจนถึงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมก่อนที่จะกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ประสิทธิภาพการทำงานของตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะ ชนิด และกัมมันตภาพของตัวดูดซับ ข้อกำหนดในการพัฒนาและวิจัยตัวดูดซับที่ใช้กับแกซีฟิเคชันมีดังต่อไปนี้ [27, 28]

- 1.) มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และมีจลนพลศาสตร์ (kinetics) ที่สูงมากเพียงพอ
- 2.) มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง
- 3.) ต้นทุนต่ำ ง่ายและสังเคราะห์ง่าย
- 4.) ง่ายต่อการคายซับ (desorption) และมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง

ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นของแข็งที่ใช้ในแกซิฟิเคชันจะประกอบไปด้วย 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide-based sorbents) กลุ่มเซรามิกของโลหะอัลคาไลน์ (ceramic alkaline-based sorbents) และกลุ่มอื่น ๆ อาทิ ไฮโดรทัลไซต์ (hydrotalcite) เป็นต้น

#### 2.5.2.1 ตัวดูดซับลิเทียมออร์โทซิลิเกต (lithium orthosilicate; $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ )

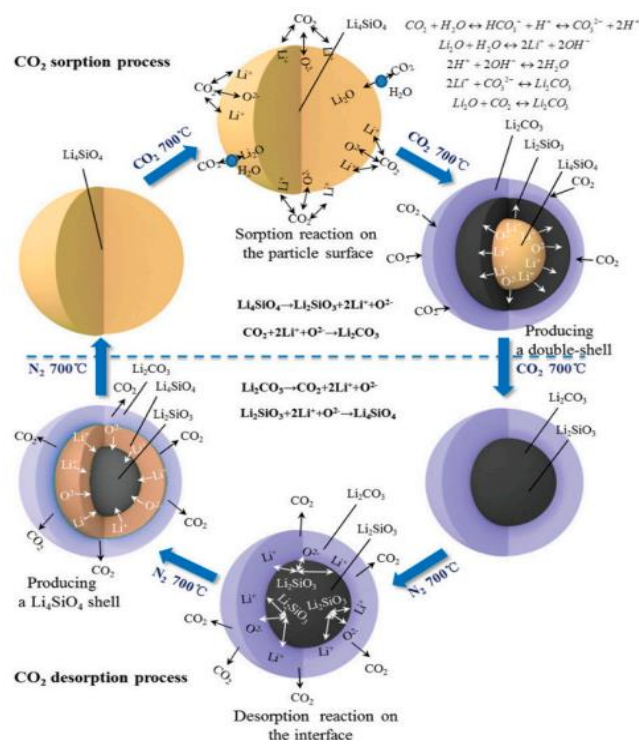
ตัวดูดซับเซรามิกของโลหะอัลคาไลน์ (alkaline ceramic sorbents) เป็นกลุ่มตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และได้รับความสนใจในปัจจุบัน เช่น ลิเทียมออร์โทซิลิเกต โซเดียมเซอร์โคเนต (sodium zirconate) เป็นต้น [29] ลิเทียมออร์โทซิลิเกตเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องมาจากความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 750 องศาเซลเซียส มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวดูดซับต่ำกว่าแคลเซียมออกไซด์ รวมถึงมีความสามารถในการฟื้นฟูสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับแคลเซียมออกไซด์ [26] การดูดซับเชิงเคมีเกิดขึ้นตามสมการต่อไปนี้



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

กลไกการดูดซับเชิงเคมีของลิเทียมออร์โทซิลิเกตแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างลิเทียมออร์โทซิลิเกตกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวระหว่างวัฏภาค และขั้นตอนการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แกนกลางของตัวดูดซับ โดยการดูดซับจะเริ่มจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และลิเทียมออร์โทซิลิเกตที่บริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาค เกิดเป็นวัฏภาคของลิเทียมเมตาซิลิเกต (lithium metasilicate;  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ) และลิเทียมคาร์บอเนต (lithium carbonate;  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปจนกว่าบริเวณผิวของตัวดูดซับจะปกคลุมด้วยวัฏภาคของลิเทียมเมตาซิลิเกตและลิเทียมคาร์บอเนตทั้งหมด ขั้นตอนแรกนี้ เป็นขั้นตอนที่ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นตอนที่เกิดได้รวดเร็วหรือมีจลนพลศาสตร์สูง จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนถัดไปคือขั้นตอนของการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงไอออนของลิเทียม (lithium ion;  $\text{Li}^+$ ) และไอออนของออกซิเจน (oxygen ion;  $\text{O}^{2-}$ ) เพื่อทำปฏิกิริยากับลิเทียมออร์โทซิลิเกตภายในแกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ถูกกำหนดด้วยการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์และไอออนต่าง ๆ จึงเป็นขั้นตอนที่เกิดได้ช้าหรือเป็นขั้นตอนที่มีจลนพลศาสตร์ต่ำ แบบจำลองการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออร์โทซิลิเกตแสดงดังรูปที่ 2.13

โดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์ลิเทียมอโทซิลิเกตจะสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นของซิลิกา กับลิเทียมหลากหลายชนิด อาทิ ซิลิกาเจล (silica gel) ฟูมซิลิกา (fumed silica) ไดอะตอมไมต์ (diatomite) ลิเทียมคาร์บอเนต ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (lithium hydroxide; LiOH) ลิเทียมไนเตรต (lithium nitrate; LiNO<sub>3</sub>) เป็นต้น ภายใต้การสังเคราะห์แบบเปียกหรือแบบแห้ง แล้วตามด้วยการปรับปรุงด้วยความร้อน (heat treatment) ที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้อาจเกิดการชินเทอริงของโครงสร้างไปพร้อม ๆ กับการเตรียมตัวดูดซับได้ ส่งผลให้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวและรูพรุนต่ำ [27]



รูปที่ 2.13 กลไกการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทซิลิเกต [30]

### 2.5.2.2 ตัวดูดซับกลุ่มแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide-based sorbents)

ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่ามีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีกลนพลศาสตร์สูง และราคาถูก รวมทั้งสามารถหาได้ง่าย โดยพบได้ในธรรมชาติในรูปของหินปูน (limestone) แคลเซียมคาร์บอเนตและโดโลไมต์ (dolomite) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแคลเซียมออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังสมการที่ 2.17



จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometric) ตามทฤษฎีแคลเซียมออกไซด์ 1 กรัมสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงถึง 0.786 กรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 78.6 โดยมวลของตัวดูดซับ

กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์สามารถแบ่งออกได้เป็นสองขั้นตอน ได้แก่ขั้นตอนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนพื้นผิวของตัวดูดซับและขั้นตอนการกระจายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปยังตัวดูดซับ โดยในขั้นตอนแรกคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์จนกลายเป็นวัฏภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตบริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาค (interface) เป็นขั้นตอนที่ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมีซึ่งเกิดได้รวดเร็วและมีจลนพลศาสตร์สูง ปฏิกิริยานี้จะดำเนินไปจนกว่าพื้นผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยชั้นของแคลเซียมคาร์บอเนตจนหมด หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนถัดไปคือ ขั้นตอนการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แกนกลาง (core) ของตัวดูดซับซึ่งยังไม่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดได้ช้าเพราะถูกควบคุมด้วยการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์และมีจลนพลศาสตร์ต่ำ นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกอาจส่งผลให้การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แกนกลางเกิดได้ยากขึ้นอีกด้วย

ปัญหาหลักของการใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาที่ 2.17 หรือการคายซับ (desorption) ของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) ที่ต้องการพลังงานสูงและจะเกิดที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะดำเนินการที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า การใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการฟื้นฟูสภาพ (regeneration) ส่งผลให้ลักษณะ (characteristic) ของตัวดูดซับเปลี่ยนไป ก่อให้เกิดการซินเทอริง (sintering) ของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดจากการจับกลุ่มก้อน (agglomeration) ของอนุภาคขนาดเล็ก การเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของรูพรุน รวมถึงการหดตัวของรูพรุน (pore shrinkage) โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินการ กระบวนการ ชนิดของสารตั้งต้น (precursor) ที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับ และระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ดังนั้นตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์จึงมีประสิทธิภาพในการใช้งานในระยะยาวหรือการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวดูดซับที่ต่ำ และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการฟื้นฟูสภาพของแคลเซียมออกไซด์ที่สูง อีกปัญหาหนึ่งที่พบของการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมคือ การทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลเฟตภายในแก๊สสังเคราะห์เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (calcium sulfate) แทนที่การเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์เสียสภาพว่องไว [28, 31]

### 2.5.3 การประยุกต์ใช้งานของแก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากแก๊ซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น

เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารมูลค่าเพิ่มชนิดอื่น: แก๊ซิฟิเคชันที่เพิ่มด้วยการดูดซับเป็นกระบวนการที่มีความโดดเด่นเป็นอย่างมาก เนื่องจากความสามารถในการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ควบคุมอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไฮโดรเจนได้ ส่งผลให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น กระบวนการผลิตมีเทนที่ต้องการแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไฮโดรเจนประมาณ 3 กระบวนการสังเคราะห์ฟิชเชอร์โทรปซ์ (fischer-tropsch synthesis) หรือกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล (methanol synthesis) ที่ต้องการแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไฮโดรเจนประมาณ 2 เป็นต้น

ใช้งานในโรงงานกลั่นน้ำมันดิบ: ไฮโดรเจนถูกใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหน่วยการแตกตัวด้วยไฮโดรเจน (hydrocracking unit) เพื่อเปลี่ยนสารโมเลกุลหนักให้เป็นสารโมเลกุลเบาขึ้น หรือถูกใช้ในการกำจัดซัลเฟอร์ที่ประกอบอยู่ในน้ำมันดิบ เป็นต้น

ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับพาหนะขนส่ง: ไฮโดรเจนถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจในการศึกษาและพัฒนาอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์เผาไหม้ชนิดอื่น นอกจากนั้นยังไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ประกอบด้วยความร้อนและน้ำ

ใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก: อุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้พลังงานความร้อนมาก และปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในปริมาณมากเช่นกัน การใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจัดเป็นวิธีการในการลดการสร้างและการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม

การประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ : แก๊สสังเคราะห์ยังสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย อาทิ ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแอมโมเนีย (ammonia) ในอุตสาหกรรมปุ๋ย เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) ไขมันหรือน้ำมันที่ไม่อิ่มตัวในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยากับออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen และคณะ [26] ศึกษาผลของการเจือแคลเซียมลงบนตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction method) และทำการวิเคราะห์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักด้วยความร้อน (thermogravimetric analysis) พบว่าปริมาณแคลเซียมที่เจือลงไปเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 - 32 โดยโมล จะทำให้ขนาดของอนุภาคลดลงและพื้นที่ผิวของลิเทียมอโทซิลิเกตเพิ่มขึ้นจาก 0.064 m<sup>2</sup>/g เป็น 0.314 m<sup>2</sup>/g ทำให้การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และปริมาณการเจือแคลเซียมที่ร้อยละ 6 โดยมวล จะมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงที่สุดและมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ซ้ำได้ดี เนื่องจากปริมาณแคลเซียมที่สูงเกินไปจะทำให้ปริมาณตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตน้อยลง

Kim และคณะ [27] ศึกษาการสังเคราะห์ลิเทียมอโทซิลิเกตแบบรูพรุนขนาดใหญ่ เพื่อใช้สำหรับดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ลิเทียมไฮดรอกไซด์และซิลิกาฟุ่มเป็นสารตั้งต้น สังเคราะห์ด้วยวิธีการโซลิด-สเตทเทรานพอร์เมชัน พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับลดลงเหลือ 600 องศาเซลเซียส จากปกติที่มากกว่า 700 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ซินเทอริงของตัวดูดซับต่ำลง โครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ และมีพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตแบบรูพรุนขนาดใหญ่ที่สังเคราะห์ได้มีความสามารถและอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน และสามารถนำมาใช้ซ้ำได้ถึง 10 รอบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความสามารถและอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Wei และคณะ [32] ศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น พบว่าแคลเซียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน โดยแคลเซียมออกไซด์กระตุ้นให้ปฏิกิริยา วอเตอร์-แก๊สชิฟต์เลื่อนสมดุลไปข้างหน้า ช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารละลาย และปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันส่งผลให้ได้ไฮโดรเจนและผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการแกซีฟิเคชัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารละลายและปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการคือ 600-700 องศาเซลเซียส

Adedi และ Dalai [8] ศึกษาผลของอุณหภูมิ (650-850 องศาเซลเซียส) ที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของเปลือกหุ้มข้าวโอ๊ตอัดเม็ด พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณชาร์และทาร์จะลดลง เนื่องจากเกิดการแตกตัวมากขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าปริมาณทาร์จะลดลงและแก๊สเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มปริมาณนิกเกิลจนถึงร้อยละ 10 เนื่องจากนิกเกิลจะช่วยเปลี่ยนทาร์เป็นแก๊สผ่านปฏิกิริยาริฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ และมีตำแหน่งกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณนิกเกิลเพิ่มเป็นร้อยละ 15 ปริมาณทาร์จะ

เพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของนิเกิลจะลดลง รวมทั้งผลจากผลของ XRD จะพบนิเกิลออกไซด์เฟสใหม่ที่ไม่ส่งผลในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ

Li และคณะ [7] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่ ต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวลเพื่อผลิตไฮโดรเจน โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น ที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส ปริมาณร้อยละโดยมวลของนิเกิลออกไซด์ที่ใช้คือ 2.5, 5 และ 10 พบว่าปริมาณนิเกิลออกไซด์ที่สูงขึ้น ทำให้ผลได้ของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากนิเกิลออกไซด์ช่วยเร่งการเกิดแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและการแตกตัวของสารระเหยที่ได้จากไพโรไลซิสของชีวมวล แต่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลงเมื่อเทียบกับการใช้แคลเซียมออกไซด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ที่มีไม่เพียงพอต่อการดูดซับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

Hu และคณะ [33] ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนผ่านกระบวนการ sorption-enhanced steam reforming ของกรดอะซิติก ซึ่งเป็นตัวแทนของน้ำมันชีวภาพโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่ คือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CexZr1-xO2-CaO ที่อัตราส่วนระหว่าง Ca/(Zr+Ce) เป็น 2.5 จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีเสถียรภาพสูง กัมมันตภาพสูง ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี และสามารถนำมาใช้ซ้ำได้ถึง 15 รอบ เนื่องจากเกิดโครงสร้างของ CaZrO<sub>3</sub> ที่ช่วยป้องกันการรวมตัวกันของ CaO

### บทที่ 3

#### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมใบอ้อย

- 1) เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบและละเอียด
- 2) เครื่องแยกขนาดอนุภาค (sieve shaker)
- 3) ตะแกรงร่อน (sieve tray) ขนาด 150 และ 250 ไมครอน
- 4) ตู้อบแห้ง (drying)

##### 3.1.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา

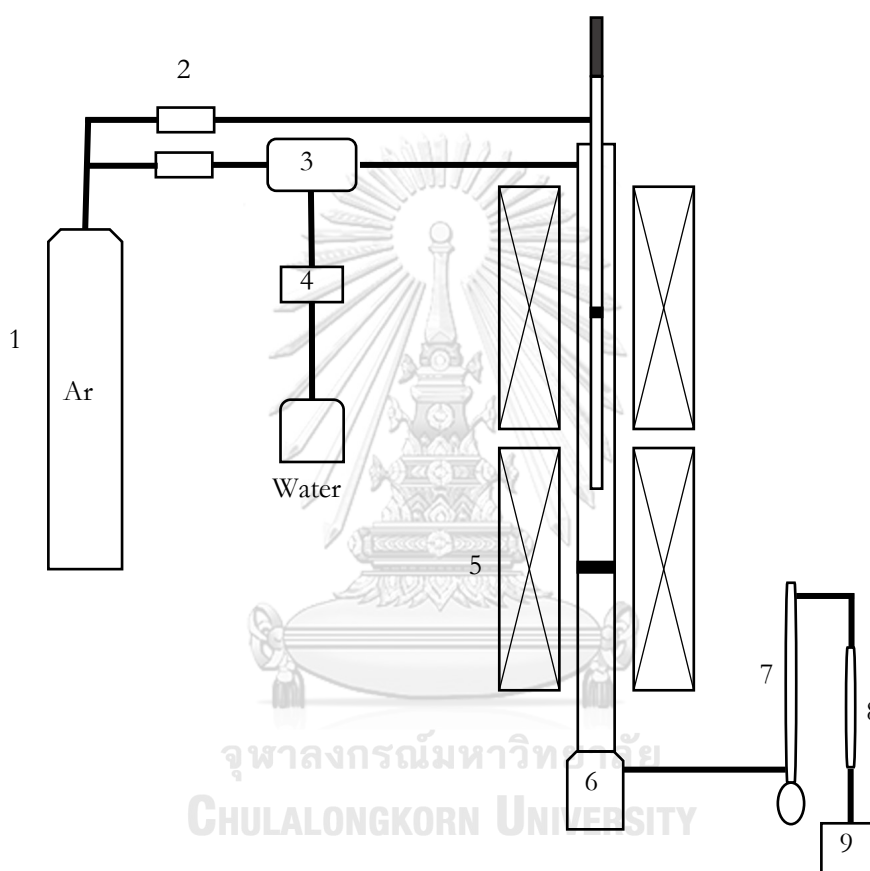
- 1) ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (Lithium hydroxide)
- 2) เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร (Ethanol)
- 3) ฟิวมีซิลิกา (Fume silica)
- 4) แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide)
- 5) นิกเกิลไนเตรท (Nickel nitrate)
- 6) แคลเซียมไนเตรท (Calcium nitrate)
- 7) น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)
- 8) โกร่งบดสาร (pestle and mortar)
- 9) ตู้อบแห้งสาร (drying)
- 10) เตาเผา (calcination furnace)
- 11) เครื่องกวนสารและให้ความร้อน (magnetic stirrer with hotplate)

##### 3.1.3 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น

- 1) อาร์กอนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร
- 2) น้ำปราศจากประจุ (deionized water)
- 3) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (mass flow controller)
- 4) เครื่องผลิตไอน้ำ (steam generator)
- 5) ปั๊มน้ำ (HPLC pump)
- 6) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)
- 7) เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple)
- 8) เตาเผาชนิดท่อ (tube furnace)



- 5) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น
- 6) อุปกรณ์ดักจับทาร์ (tar trap)
- 7) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สชนิดฟองแก๊ส (bubble flowmeter)
- 8) ซิลิกาเจล (Silica gel)
- 9) ถุงเก็บแก๊สตัวอย่างขนาด 1 ลิตร (gas bag)

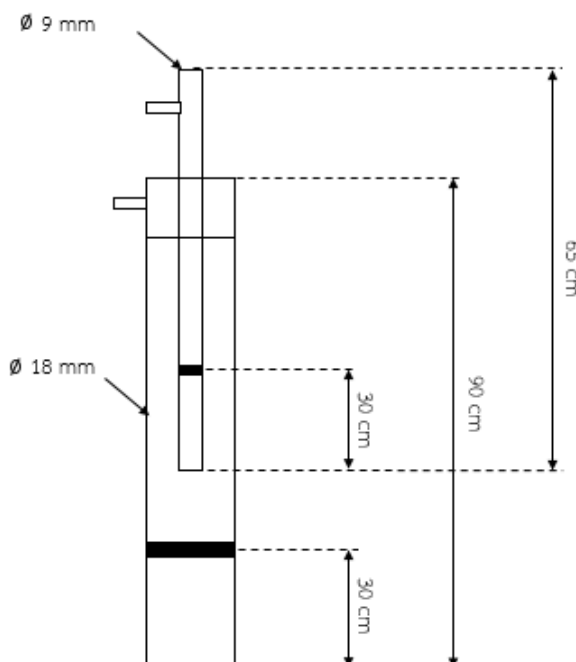


**รูปที่ 3.1** แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น: (1) ถังแก๊สอาร์กอน, (2) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล, (3) เครื่องผลิตไอน้ำ, (4) ป้อนน้ำ, (5) เต้าเผาชนิดท่อ, (6) อุปกรณ์ดักจับทาร์, (7) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สชนิดฟองแก๊ส, (8) ซิลิกาเจล, (9) ถุงเก็บแก๊สตัวอย่าง

### 3.2 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษาแกซิฟิเคชัน

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น (2-stage fixed bed reactor) โดยแยกส่วนปลดปล่อยสารระเหยของชีวมวลและส่วนของแกซิฟิเคชันออกจากกัน ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยของชีวมวล (devolatile temperature) และอุณหภูมิแกซิฟิเคชัน (gasification temperature) ที่แตกต่างกันได้

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยท่อควอทซ์ 2 ขนาด ดังรูปที่ 3.2 ท่อควอทซ์ขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 9 มิลลิเมตร ยาว 65 เซนติเมตร เป็นท่อปลายเปิดทั้ง 2 ด้าน ซึ่งชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ผ่านปลายเปิดด้านบน และปลายท่อด้านบนจะมีปลายเปิดด้านข้างสำหรับป้อนแก๊สตัวพา (carrier gas) ที่ความยาว 30 เซนติเมตรจากปลายเปิดด้านล่างจะมีจุดคอดของท่อควอทซ์ เพื่อเป็นที่รองรับชีวมวลที่ป้อนเข้ามาและเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่บริเวณนี้ ท่อส่วนที่สองคือท่อขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายนอกเท่ากับ 18 มิลลิเมตร ความยาวของท่อ 90 เซนติเมตร ด้านบนของท่อจะมีปลายเปิด 1 ทางสำหรับป้อนไอน้ำเข้าสู่กระบวนการ ที่ความยาว 30 เซนติเมตรที่ปลายท่อด้านล่างจะมีจุดคอดของท่อควอทซ์ เพื่อเป็นที่รองรับตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันที่บริเวณนี้



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น

### 3.3 วิธีกรทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมซีวมวล

นำไปอ้อยไปอบให้แห้ง แล้วบดด้วยเครื่องบดชนิดหยาบและละเอียดตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปแยกขนาดด้วยเครื่องเขย่าแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนหมายเลข 60 และ 100 ซึ่งใบอ้อยที่ได้จะมีขนาด 150 ถึง 250 ไมโครเมตร

#### 3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต

การสังเคราะห์ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตด้วยวิธีการโซลิด-สเตททรานฟอร์มชัน (solid-state transformation) โดยสารตั้งต้น (precursor) ที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ลิเทียมไฮดรอกไซด์และฟลูออซิลิกาและใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับมีดังต่อไปนี้

1. ชั่งลิเทียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 1.754 กรัม ฟลูออซิลิกาปริมาณ 1 กรัมและเอทานอล 10 มิลลิลิตรถูกผสมลงในโถรงบดสาร โดยอัตราส่วนโดยโมลของลิเทียมไฮดรอกไซด์ต่อฟลูออซิลิกาเท่ากับ 4.4 ต่อ 1 เพื่อให้ปริมาณไอออนของลิเทียมเพียงพอต่อการสังเคราะห์สารประกอบลิเทียมอโทซิลิเกต และร้อยละ 10 ของปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้จากปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อชดเชยลิเทียมที่ระเหยออกระหว่างการเตรียมตัวดูดซับ
2. บดของผสมเป็นเวลา 30 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลวข้น (slurry)
3. อบแห้งของเหลวข้นที่ได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำของแข็งที่ได้ไปเผา (calcination) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 ชั่วโมงในเตาเผาที่มีอากาศไหลผ่าน และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนด
5. หลังจากอุณหภูมิของเตาเผาลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นำลิเทียมอโทซิลิเกตที่ได้ออกจากเตาเผาและเก็บในเดซิเคเตอร์ (desiccator) เพื่อป้องกันความชื้น

#### 3.3.3 การเตรียมตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต

การสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตด้วยวิธีการอิมเพรกเนชัน (impregnation) โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่แคลเซียมไนเตรทขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับมีดังต่อไปนี้

1. ชั่งลิเทียมอโทซิลิเกต 3 กรัม ผสมกับสารละลายแคลเซียมไนเตรท เพื่อให้ตัวดูดซับที่ได้มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยมวล

2. ทำการกวนและระเหยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
3. นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำของแข็งที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในเตาเผาที่มีอากาศไหลผ่าน และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนด
5. หลังจากอุณหภูมิของเตาเผาลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากเตาเผาและเก็บในเดซิเคเตอร์เพื่อป้องกันความชื้น และระบุชื่อเป็น CaXLi โดย X แทนค่าร้อยละโดยมวลของแคลเซียมออกไซด์

### 3.3.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตสามารถเตรียมได้ 4 วิธี คือ การอิมเพรกเนชัน (impregnation) ที่มีลำดับการใส่ต่างกัน 2 แบบ การอิมเพรกเนชันร่วม (co-impregnation) และวิธีการผสมทางกายภาพ (physical mixing) โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่นิกเกิลไนเตรทและแคลเซียมไนเตรท

#### 3.3.4.1 วิธีอิมเพรกเนชัน โดยใส่แคลเซียมออกไซด์ก่อนนิกเกิลออกไซด์

1. ชั่ง Ca15Li 3 กรัม ผสมกับสารละลายนิกเกิลไนเตรท เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีปริมาณนิกเกิลออกไซด์ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยมวล
2. ทำการกวนและระเหยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
3. นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำของแข็งที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในเตาเผาที่มีอากาศไหลผ่าน และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนด
5. หลังจากอุณหภูมิของเตาเผาลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากเตาเผาและเก็บในเดซิเคเตอร์เพื่อป้องกันความชื้น และระบุชื่อเป็น NiXCa15Li โดย X แทนค่าร้อยละโดยมวลของนิกเกิลออกไซด์

#### 3.3.4.2 วิธีอิมเพรกเนชัน โดยใส่นิกเกิลออกไซด์ก่อนแคลเซียมออกไซด์

1. ชั่งลิเทียมอโทซิลิเกต 3 กรัม ผสมกับสารละลายนิกเกิลไนเตรท เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีปริมาณนิกเกิลออกไซด์ร้อยละ 5 โดยมวล
2. ทำการกวนและระเหยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3. นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำของแข็งที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในเตาเผาที่มีอากาศไหลผ่าน และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนด
5. หลังจากอุณหภูมิของเตาเผาลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากเตาเผาและเก็บในเดซิเคเตอร์เพื่อป้องกันความชื้น และระบุชื่อเป็น Ni5Li
6. ชั่ง Ni5Li 3 กรัม ผสมกับสารละลายแคลเซียมไนเตรท เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีปริมาณนิกเกิลออกไซด์ร้อยละ 15 โดยมวล
7. ทำการกวนและระเหยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
8. นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
9. นำของแข็งที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในเตาเผาที่มีอากาศไหลผ่าน และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนด
10. หลังจากอุณหภูมิของเตาเผาลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากเตาเผาและเก็บในเดซิเคเตอร์เพื่อป้องกันความชื้น และระบุชื่อเป็น Ca15Ni5Li

#### 3.3.4.3 วิธีการอิมเพรกเนชันร่วม

1. ชั่งลิเทียมออกไซด์ 3 กรัม ผสมกับสารละลายนิกเกิลไนเตรทและแคลเซียมไนเตรท เพื่อให้ตัวดูดซับที่ได้มีปริมาณนิกเกิลออกไซด์ร้อยละ 5 โดยมวล และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 15 โดยมวล
2. ทำการกวนและระเหยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
3. นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำของแข็งที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในเตาเผาที่มีอากาศไหลผ่าน และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนด
5. หลังจากอุณหภูมิของเตาเผาลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากเตาเผาและเก็บในเดซิเคเตอร์เพื่อป้องกันความชื้น

### 3.3.4.4 วิธีการผสมทางกายภาพ

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตที่เตรียมด้วยวิธีการผสมทางกายภาพ สามารถทำได้โดยนำ Ni5Li ผสมกับ Ca15Li ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ในโถรงบดสารแล้วบด (mechanically ground) เป็นเวลา 10 นาที

### 3.3.5 ขั้นตอนการทดลองแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ

1. คิวทซ์วูล์ฟปริมาณ 0.1 กรัม ถูกบรรจุลงในท่อคิวทซ์ขนาดใหญ่บริเวณจุดคอดของเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นบรรจุตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1 กรัม ลงไป หรือบรรจุอะลูมินาชนิดกลม (alumina ball) 1 กรัม ลงไปในกรณีศึกษาภาวะไม่มีตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา

2. คิวทซ์วูล์ฟปริมาณ 0.05 กรัม ถูกบรรจุลงในท่อคิวทซ์ขนาดเล็กบริเวณจุดคอดของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อแยกซาร์ที่เกิดจากไฟโรไลซิสออกจากตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา ซาร์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองจะติดอยู่ที่บริเวณนี้

3. เตรียมไบอ้อยปริมาณ 0.2 กรัม บรรจุลงในท่อซิลิโคน (silicone tube) และติดท่อซิลิโคนกับปลายเปิดด้านบนสุดของท่อคิวทซ์ขนาดเล็ก คลิปหนีบโลหะ (metal binder) ถูกใช้ในการป้องกันการร่วนหล่นของซีมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ และถูกปลดออกเมื่อต้องการเริ่มการทดลอง

4. ประกอบท่อคิวทซ์ทั้งสองขนาดเข้าด้วยกัน และติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับเตาเผาชนิดท่อ อุปกรณ์ดักจับซาร์ และสายป้อนเข้าอาร์กอน ดังรูปที่ 3.2

5. ป้อนอาร์กอนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที วัดอัตราการไหลของแก๊สขาออกด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดฟองแก๊สเพื่อตรวจสอบการรั่ว

6. เปิดเตาเผาทั้ง 2 เตาพร้อมกัน โดยเตาด้านบนซึ่งเป็นส่วนที่เกิดไฟโรไลซิสจะถูกตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 700 องศาเซลเซียสในทุกการทดลอง เตาเผาด้านล่างจะเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันของไอระเหยกับสารร่วมแกซีฟาย และปฏิกิริยาของไอระเหยกับตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส

7. จับเวลา 30 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึงที่กำหนด เพื่อไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์และกำจัดความชื้นและสิ่งเจือปนออกจากตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา

8. เมื่อครบ 30 นาที ป้อนไอน้ำเข้าสู่ระบบโดยอัตราการป้อนของไอน้ำมีค่าเท่ากับ 0.1 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้อาร์กอนเป็นแก๊สตัวพาที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที จับเวลา 10 นาที เพื่อให้ไอน้ำกระจายตัวทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์

9. เมื่อครบ 10 นาที ปลดคลิปหนีบโลหะออกเพื่อป้อนไบอ้อยเข้าสู่ระบบ เริ่มจับเวลาและเก็บแก๊สตัวอย่างทันที โดยแก๊สตัวอย่างถูกทำให้เย็นลงเพื่อกำจัดซาร์และน้ำที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกจากแก๊สตัวอย่าง และผ่านซิลิกาเจลเพื่อลดความชื้นก่อนที่แก๊สตัวอย่างจะเข้าสู่ถุงเก็บแก๊ส

10. เก็บแก๊สตัวอย่างทุกๆ 5 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 1 ลิตรเป็นเวลา 30 นาที นำแก๊สตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี
11. เมื่อครบ 30 นาทีปิดเตาเผา ปิดแก๊ส และปิดไอน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบ นำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากเตาเผาเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส
12. เก็บตัวอย่างซาร์ที่ติดอยู่บริเวณจุดคอดของท่อควอทซ์ขนาดเล็กเพื่อวัดปริมาณซาร์ที่เกิดขึ้น
13. เก็บตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการใช้งานในเดซิเคเตอร์เพื่อป้องกันความชื้น ก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะต่าง ๆ ต่อไป

### 3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติของไบอ้อย

ไบอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะถูกวิเคราะห์เพื่อห้องค์ประกอบด้วย 2 เทคนิคได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และวิเคราะห์แบบแยกธาตุห้องค์ประกอบ (ultimate analysis) โดยการวิเคราะห์แบบประมาณจะวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณความชื้น ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุห้องค์ประกอบจะวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ CHN analyzer โดยรุ่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ CHN-2000 ของ Leco โดยห้องค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้คือคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ส่วนห้องค์ประกอบของออกซิเจนเกิดจากการดุลมวลสารบนสมมติฐานว่าปริมาณที่เหลือทั้งหมดของผลวิเคราะห์คือปริมาณของออกซิเจน

#### 3.4.2 แก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography; GC)

แก๊สโครมาโทกราฟีถูกใช้สำหรับวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำเพื่อระบุห้องค์ประกอบและปริมาณของแก๊สแต่ละชนิดในผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ แก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ในงานวิจัยคือรุ่น Shimadzu GC-2014 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี [34]

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สตัวอย่าง

ชนิดของแก๊สตัวพา (carrier gas)	อาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์ (column type)	Unibeads C column
อุณหภูมิการฉีด (injector temperature)	120 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของคอลัมน์ (column temperature)	50 ถึง 180 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD)

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

เทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟลกชันสเปคโตรสโคปีถูกใช้สำหรับวิเคราะห์ตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อระบุวัฏภาค (phase) ที่เกิดขึ้นในตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งก่อนและหลังการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยเอกซ์เรย์-ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยคือรุ่น D8 Discover ของ Bruker โดยใช้รังสีเอกซ์ชนิด คอปเปอร์ (Cu) และอัลฟาโพแทสเซียม ( $K\alpha$ ) ความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตรที่ถูกสร้างจากความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ด้วยกระแส 40 มิลลิแอมแปร์ อัตราการวิเคราะห์เท่ากับ 0.02 องศาต่อนาที และมุมของการเลี้ยวเบน ( $2\theta$ ) ในช่วง 5 ถึง 80 องศา





รูปที่ 3.4 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟลกชันสเปคโตรสโคปี [35]

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

เทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปีถูกใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (morphology) ของตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานวิจัยนี้ ได้แก่ JSM-6480 ของ JEOL InTouchScope™ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 กำลังขายมีค่าเท่ากับ 20,000 เท่าตัว

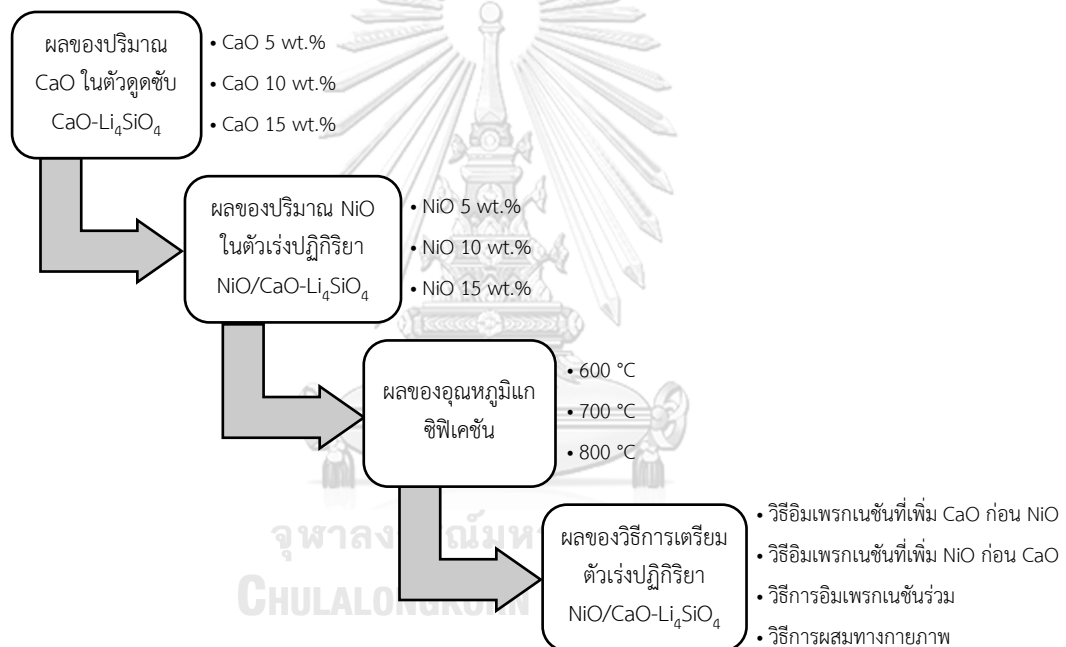


รูปที่ 3.5 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสปี [36]

### 3.5 ตัวแปรที่ศึกษา

ในการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สซิฟิเคชันของไบอ้อยด้วยไอน้ำที่เพิ่มการดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาโดยนิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตมีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้

1. อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อลิเทียมอโทซิลิเกต ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยมวล
2. อัตราส่วนระหว่างนิกเกิลออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยมวล
3. อุณหภูมิแก๊สซิฟิเคชัน 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส
4. วิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต



รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต ( $\text{NiO}/\text{CaO}-\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยโดยทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น ตัวแปรที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ต่อลิเทียมอโทซิลิเกต ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) และอัตราส่วนระหว่างนิกเกิลออกไซด์ ( $\text{NiO}$ ) ต่อแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต ( $\text{CaO}-\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) ที่เหมาะต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และเร่งปฏิกิริยาที่เกิดในการระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย อุณหภูมิแกซิฟิเคชันที่เหมาะสมต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับและผลของวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตที่แตกต่างกัน ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกเป็น 8 ส่วนดังต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไบอ้อย
2. ผลของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตและตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
3. ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
4. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
5. ผลของปริมาณนิกเกิลออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
6. ผลของอุณหภูมิแกซิฟิเคชันต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต
7. เปรียบเทียบผลการทดลองของ  $\text{Ni}_5\text{Ca}_{15}\text{Li}$  และ  $\text{Ca}_{15}\text{Li}$  จากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

8. ผลของวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกไซด์  
 เกิดต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ  
 700 องศาเซลเซียส

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไบอ้อย

จากปริมาณและศักยภาพของไบอ้อยทางด้านพลังงานที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ไบอ้อยจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ ผลการวิเคราะห์แบบประมาณบนฐานข้อมูลที่ได้รับมาของไบอ้อย (proximate analysis, as received basis) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าองค์ประกอบของไบอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยจะมีปริมาณของสารระเหยสูงที่สุดมีค่าสูงถึงร้อยละ 69.5 โดยน้ำหนัก ตามด้วยปริมาณคาร์บอนคงตัว ความชื้นและเถ้า ตามลำดับ การที่ไบอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณของสารระเหยสูง และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและเถ้าที่ต่ำ จึงทำให้มีเหมาะสมต่อการนำมาใช้ศึกษาแกซิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้มีเพียงสารระเหยที่เกิดจากไพโรไลซิสในเตาปฏิกรณ์ชั้นแรกเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ชั้นที่สองและผลิตภัณฑ์ชาร์และเถ้าที่เกิดขึ้นจะติดอยู่บริเวณรอยคอดในเครื่องปฏิกรณ์ชั้นแรก เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์แบบแยกธาตุองค์ประกอบบนฐานแห้งไร้เถ้า (ultimate analysis, dry and ash-free basis) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าองค์ประกอบหลักของไบอ้อยได้แก่คาร์บอนร้อยละ 51.8 โดยมวล และองค์ประกอบของออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน เท่ากับร้อยละ 38 9.3 และ 0.9 โดยมวล ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณบนฐานข้อมูลที่ได้รับมาของไบอ้อย (proximate analysis, as received basis)

องค์ประกอบ (compositions)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%)
ความชื้น (moisture)	10
สารระเหย (volatile)	69.5
คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)	12.9
เถ้า (ash)	7.6

**ตารางที่ 4.2** ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุองค์ประกอบบนฐานแห้งไร้เถ้า (ultimate analysis, dry ash-free basis)

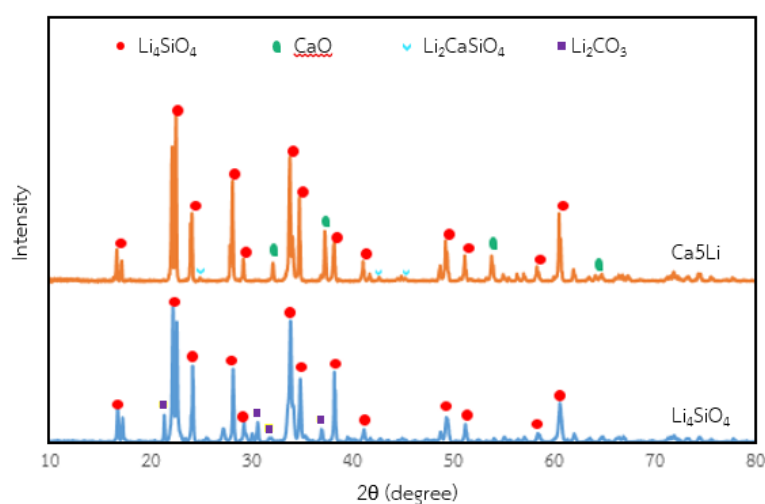
องค์ประกอบ (compositions)	ร้อยละโดยน้ำหนัก(wt.%)
คาร์บอน (carbon)	51.8
ไฮโดรเจน (hydrogen)	9.3
ไนโตรเจน (nitrogen)	0.9
ออกซิเจน (oxygen)*	38

\* by difference

**4.2 ผลของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตและตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส**

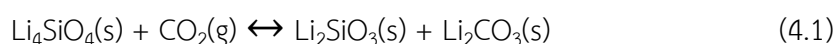
4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต

ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการโซลิด-สเตททราานฟอร์มชันและตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการอิมเพรกเนชัน ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตจะปรากฏความเข้มพีก (intensity peak) ของลิเทียมอโทซิลิเกตและวัฏภาคองค์ประกอบของ  $\text{Ca}_5\text{Li}$  ที่สังเคราะห์ได้จะปรากฏความเข้มพีกของลิเทียมอโทซิลิเกต แคลเซียมออกไซด์ และลิเทียมแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{Li}_2\text{CaSiO}_4$ )



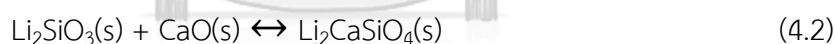
**รูปที่ 4.1** ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  และ  $\text{Ca}_5\text{Li}$  ที่สังเคราะห์ได้

ผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบของลิเทียมอโทซิลิเกตและ  $\text{Ca}_5\text{Li}$  หลังจากผ่านการใช้งานในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าวัฏภาคองค์ประกอบของ ลิเทียมอโทซิลิเกตและ  $\text{Ca}_5\text{Li}$  มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตเมื่อผ่านการใช้งานในแกซีพีเคชันจะปรากฏความเข้มพีคของลิเทียมเมตาซิลิเกต ( $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ) และลิเทียมคาร์บอเนต ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดขึ้นของสารประกอบดังกล่าวได้จากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันของลิเทียมอโทซิลิเกตดังสมการที่ 4.1



การเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของ  $\text{Ca}_5\text{Li}$  หลังผ่านแกซีพีเคชันคือ สัดส่วนความเข้มของพีคลิเทียมอโทซิลิเกตต่อลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตลดลง ไม่ปรากฏพีคความเข้มของแคลเซียมออกไซด์และปรากฏพีคความเข้มของลิเทียมคาร์บอเนต ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถอธิบายผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ  $\text{Ca}_5\text{Li}$  ได้ดังนี้ [37]

ลิเทียมอโทซิลิเกตสามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์หรือปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและเกิดผลิตภัณฑ์เป็นลิเทียมเมตาซิลิเกตและลิเทียมคาร์บอเนตขึ้นดังสมการที่ 4.1 จากนั้นลิเทียมเมตาซิลิเกตที่ได้สามารถเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์เกิดเป็นสารประกอบของลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตดังที่แสดงในสมการที่ 4.2

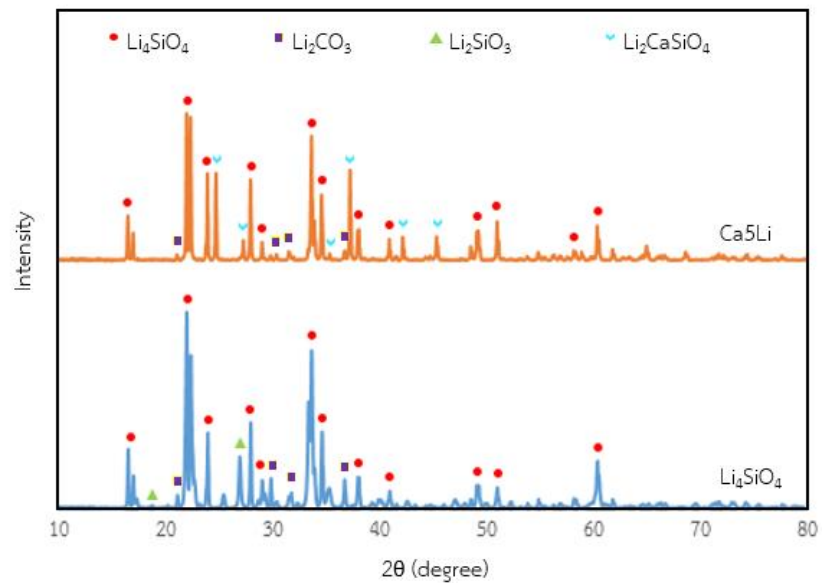


ในขณะเดียวกันแคลเซียมออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์หรือปฏิกิริยาคาร์บอเนชันเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ดังสมการที่ 4.3



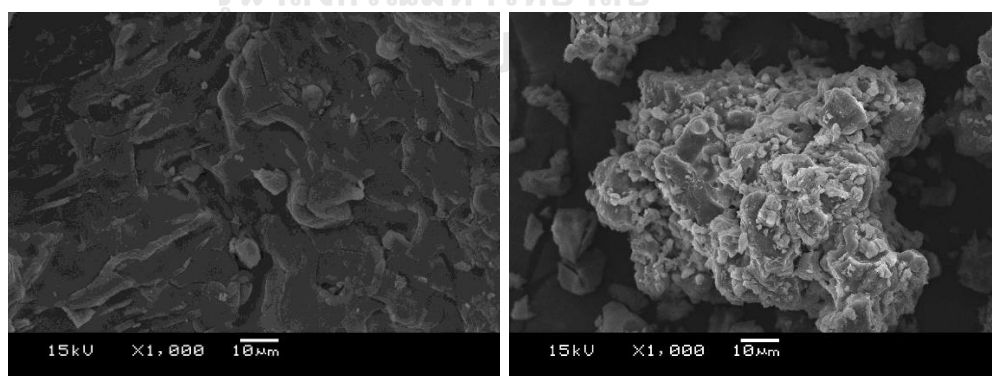
จากนั้นแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับลิเทียมอโทซิลิเกตที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นสารประกอบของลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตและลิเทียมคาร์บอเนตดังสมการที่ 4.4





รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  และ  $\text{Ca}_5\text{Li}$  ที่ผ่านแก๊สฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตและ  $\text{Ca}_5\text{Li}$  แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าพื้นผิวของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบและขนาดใหญ่ เมื่อมีการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงไปจะเห็นว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ  $\text{Ca}_5\text{Li}$  จะมีลักษณะขรุขระและจะสังเกตเห็นว่ามีอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิว



ก)

ข)

รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานของตัวดูดซับ ก)  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  และ ข)  $\text{Ca}_5\text{Li}$

การวิเคราะห์เพื่อหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุนของตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยการใช้เทคนิคไนโตรเจนฟิซิชอร์พชันเมเชอร์เมนต์ (Nitrogen physisorption measurement; BET) ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ จากข้อจำกัดของเครื่องมือวิเคราะห์ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทดสอบผลผลิตมาจากวัสดุประเภทควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับลิเทียมคาร์บอเนตที่อยู่ภายในตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้อุปกรณ์เกิดการชำรุดและเสียหายได้ [38]

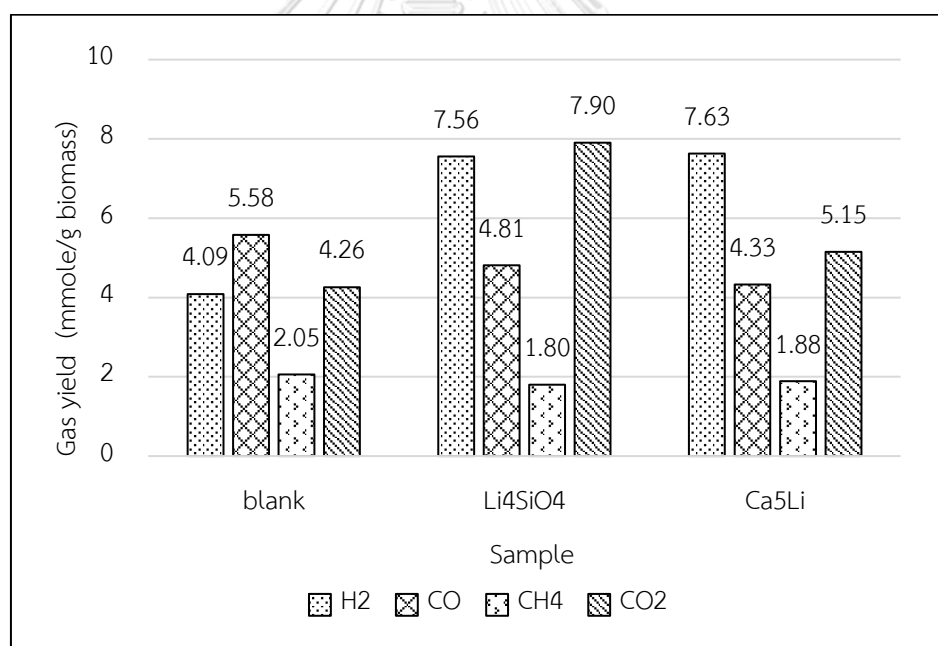
4.2.2 ผลของตัวดูดซับลิเทียมออกโทซิลิเกต และแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตต่อแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

รูปที่ 4.4 แสดงผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากแก๊สซิเคชันของลิเทียมออกโทซิลิเกต แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตและการทดลองที่ไม่มีตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิแก๊สซิเคชัน 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้ลิเทียมออกโทซิลิเกตในแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยจะส่งผลให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้นจาก 15.98 เป็น 22.07 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย การเพิ่มขึ้นของผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการใช้ตัวดูดซับลิเทียมออกโทซิลิเกตเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีตัวดูดซับสามารถสันนิษฐานได้จากคุณสมบัติความเป็นเบส (basicity) ของลิเทียมออกโทซิลิเกตซึ่งส่งผลเชิงเร่งปฏิกิริยาแตกตัวของสารระเหยจากขั้นตอนไพโรไลซิสหรือเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (dehydrogenation) อาทิ ปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก (steam reforming of light hydrocarbons) [39-41] ส่งผลให้ปริมาณของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นมาก นอกจากนี้จะเห็นว่าผลได้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.09 และ 4.26 เป็น 7.56 และ 7.9 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ ในขณะที่ผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจาก 5.58 เป็น 4.81 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย การเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งการลดลงของคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถอธิบายได้ด้วย 2 สาเหตุหลัก สาเหตุแรกคือ ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาเคมี และสาเหตุที่สองคือ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออกโทซิลิเกตตามสมการที่ 4.1 ส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาอวเตออร์-แก๊สซิฟิเคชัน ตามสมการที่ 2.11 [27, 42] เลื่อนไปข้างหน้า นอกจากนี้การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออกโทซิลิเกตสามารถยืนยันได้ด้วยผลวิเคราะห์วัฏภาคหลังผ่านแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยด้วยเทคนิค XRD ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1

การเพิ่มตัวดูดซับ  $\text{Ca}_5\text{Li}$  ลงในแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยเมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่มีตัวดูดซับ พบว่าผลได้รวมของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 3.01 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย เมื่อเพิ่ม  $\text{Ca}_5\text{Li}$  ลงในกระบวนการ การเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์แก๊สรวม เป็นผลมาจากปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่ม



สูงขึ้นถึง 7.63 มิลลิโมลต่อกรัมไบโอมัส ซึ่งสามารถอธิบายสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้จากผลเชิงเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของลิเทียมออกโทซิลิเกตและคุณสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์สำหรับการแตกตัวของทาร์และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของทาร์ อีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ผลได้ของไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้นคือการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาอวอเทอร์-แก๊สซิฟท์ ในสมการที่ 2.11 ที่เป็นผลมาจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์[9, 32, 43, 44] สามารถสังเกตได้จากผลได้ไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น 3.54 มิลลิโมลต่อกรัมไบโอมัส ซึ่งมากกว่าผลได้ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 0.89 มิลลิโมลต่อกรัมไบโอมัส รวมทั้งปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดลง 1.24 มิลลิโมลต่อกรัมไบโอมัส นอกจากนี้ยังยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ Ca5Li หลังการแก๊สซิฟเคชันด้วยไอน้ำของไบโอมัส ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า Ca5Li หลังแก๊สซิฟเคชันจะเกิดพีคความเข้มของลิเทียมคาร์บอเนต ลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตในสัดส่วนที่ชัดเจน ซึ่งสารประกอบดังกล่าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ Ca5Li ตามกลไกที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1

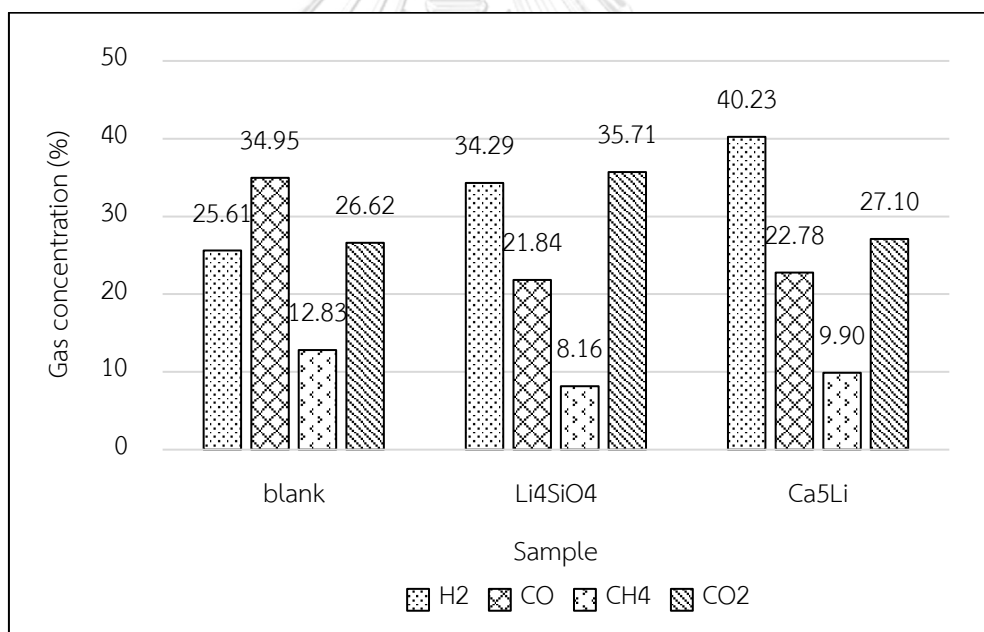


รูปที่ 4.4 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> Ca<sub>5</sub>Li และ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (blank) ที่อุณหภูมิแก๊สซิฟเคชัน 700 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการเพิ่มตัวดูด Ca<sub>5</sub>Li เทียบกับการทดลองที่เพิ่มเพียงตัวดูดซับลิเทียมออกโทซิลิเกต พบว่าผลได้ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีการเพิ่มตัวดูดซับ

Ca5Li มีค่าต่ำกว่าการเพิ่มตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มเข้าไปใน Ca5Li ส่งผลเสริมกันอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ Ca5Li [26, 37]

รูปที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันของลิเทียมอโทซิลิเกต Ca5Li และการทดลองที่ไม่มีตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อใช้ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตและ Ca5Li ร้อยละโดยปริมาตรของไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและร้อยละโดยปริมาตรของคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเร่งปฏิกิริยาเคมีและการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตและ Ca5Li เมื่อเปรียบเทียบการใช้ตัวดูดซับ ลิเทียมอโทซิลิเกตและ Ca5Li พบว่าการใช้ตัวดูดซับ Ca5Li จะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีร้อยละโดยปริมาตรของไฮโดรเจนที่สูงกว่าและร้อยละโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานร่วมกันระหว่างลิเทียมอโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ [37]

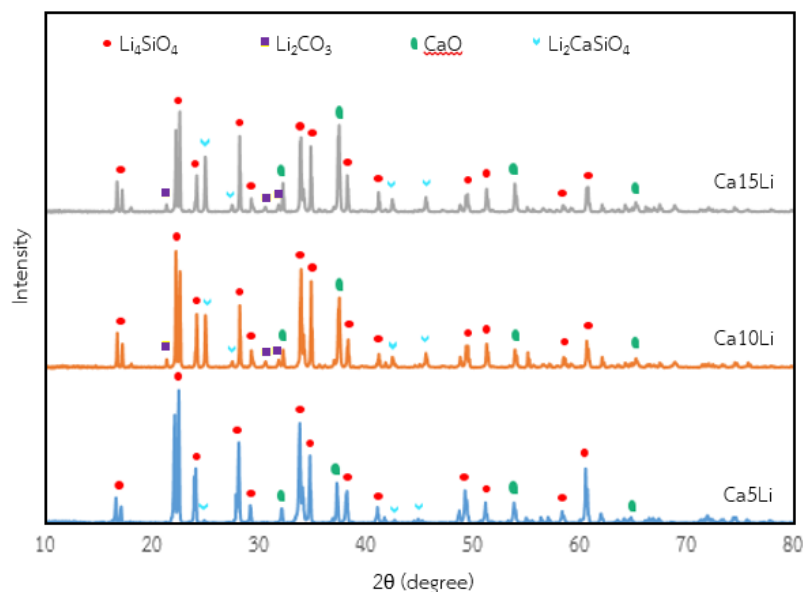


รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของ  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  Ca5Li และ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชันที่ 700 องศาเซลเซียส

#### 4.3 ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

4.3.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่างกัน

ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตถูกนำมาศึกษาในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยเพื่อศึกษาผลการทำงานร่วมกัน (synergistic) และอิทธิพลต่อผลได้และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊ส ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการอิมเพรกเนชัน โดยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เท่ากับร้อยละ 5 10 และ 15 โดยมวล ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคองค์ประกอบของ Ca5Li Ca10Li และ Ca15Li แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์ลงในลิเทียมอโทซิลิเกต จะทำให้สัดส่วนฟิคของแคลเซียมออกไซด์ต่อลิเทียมอโทซิลิเกตและสัดส่วนฟิคของลิเทียมแคลเซียมซิลิเกตต่อลิเทียมอโทซิลิเกตเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิค XRD ของ Ca5Li Ca10Li และ Ca15Li ที่สังเคราะห์ได้

4.3.2 ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

ตารางที่ 4.3 แสดงผลได้ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต Ca5Li Ca10Li Ca15Li และแคลเซียมออกไซด์ในหน่วยมิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองของ Ca5Li และ Ca10Li จะพบว่าผลิตภัณฑ์ของแก๊สรวมเพิ่มขึ้น เป็นผล

มาจากผลได้ของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้น 1.21 0.25 และ 0.21 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการทดลองที่ใช้ Ca10Li มีความสามารถในการกระตุ้นให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ได้ดีกว่าการทดลองที่ใช้ Ca5Li และผลได้ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่าลดลง 0.26 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย แสดงให้เห็นถึงความสามารถในกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองที่ใช้ Ca10Li ที่ดีกว่าการทดลองที่ใช้ Ca5Li

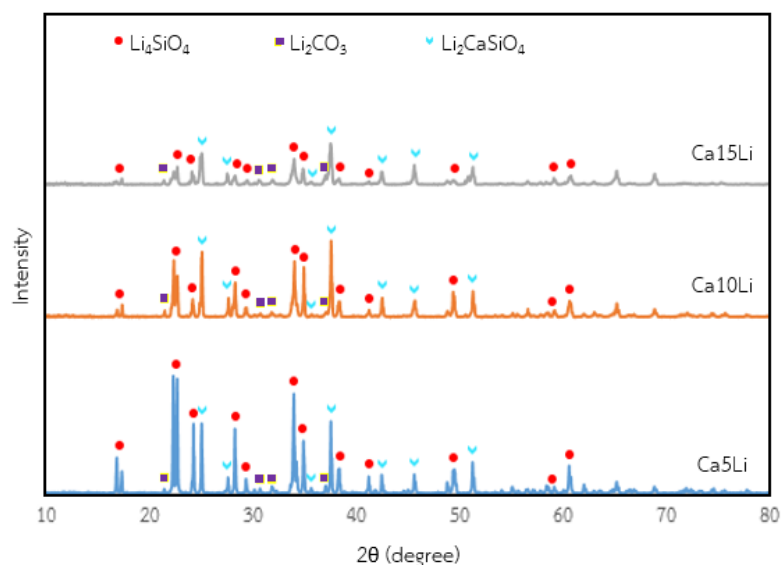
เมื่อพิจารณาผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองของ Ca15Li เทียบกับการทดลองของ Ca10Li พบว่าผลิตภัณฑ์ของแก๊สรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สต่างกัน โดยผลได้ของไฮโดรเจน และมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้น 1.19 และ 0.27 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ ในขณะที่ผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่าลดลง 0.11 และ 0.77 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ

**ตารางที่ 4.3** ผลได้ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกต Ca5Li Ca10Li Ca15Li และแคลเซียมออกไซด์

องค์ประกอบ	ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย)				
	Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	Ca5Li	Ca10Li	Ca15Li	CaO
ไฮโดรเจน	7.56	7.63	8.84	10.03	10.54
คาร์บอนมอนอกไซด์	4.81	4.33	4.58	4.47	4.84
มีเทน	1.80	1.88	2.09	2.36	2.14
คาร์บอนไดออกไซด์	7.90	5.15	4.89	4.12	6.73
รวม	22.07	18.99	20.41	20.98	24.25

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าผลได้ของไฮโดรเจนได้จากการทดลองที่มีตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตทุกอัตราส่วนผสมมีค่าสูงกว่าการทดลองของลิเทียมอโทซิลิเกต โดยเมื่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 5 10 และ 15 โดยมวล ผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 7.63 8.84 และ 10.03 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย นอกจากนั้นผลได้ของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ในการทดลองของแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตทุกอัตราส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าการทดลองของลิเทียมอโทซิลิเกต เนื่องจากความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากของแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์รวมของแก๊สของการทดลองที่ใช้ Ca5Li Ca10Li และ Ca15Li มีค่าลดลง 3.08 1.66 และ 1.09 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ เมื่อเทียบกับการทดลองของลิเทียมอโทซิลิเกต นอกจากนั้น

ผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD ของ Ca5Li Ca10Li และ Ca15Li หลังแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.7 สามารถยืนยันการเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้จากการปรากฏความเข้มพีคของวัฏภาคของลิเทียมคาร์บอเนตและลิเทียมแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ตามกลไกที่ได้เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ Ca5Li Ca10Li และ Ca15Li ที่ผ่านแกซีพีเคชัน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สที่ผลิตได้จากการทดลองกับค่าผลได้ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.5 [43, 45] ซึ่งเป็นการประมาณการผลได้ที่ควรจะเกิดขึ้นในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลจากการทำงานร่วมกันของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ จะเห็นว่าผลได้ของไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณทุกอัตราส่วนผสมของตัวดูดซับ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีในการทำงานร่วมกันของลิเทียมออกโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ในการส่งเสริมการผลิตไฮโดรเจนการแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย นอกจากนั้นผลได้ของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ยังมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณ จากการทดลองดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ลงในลิเทียมออกโทซิลิเกตไม่เพียงแต่ส่งเสริมผลเชิงเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวในแกซีพีเคชันแต่ยังส่งผลต่อการส่งเสริมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาอวเทอร์-แก๊สซิฟท์ ตามสมการที่ 2.11

สมการคำนวณผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สขององค์ประกอบต่าง ๆ :

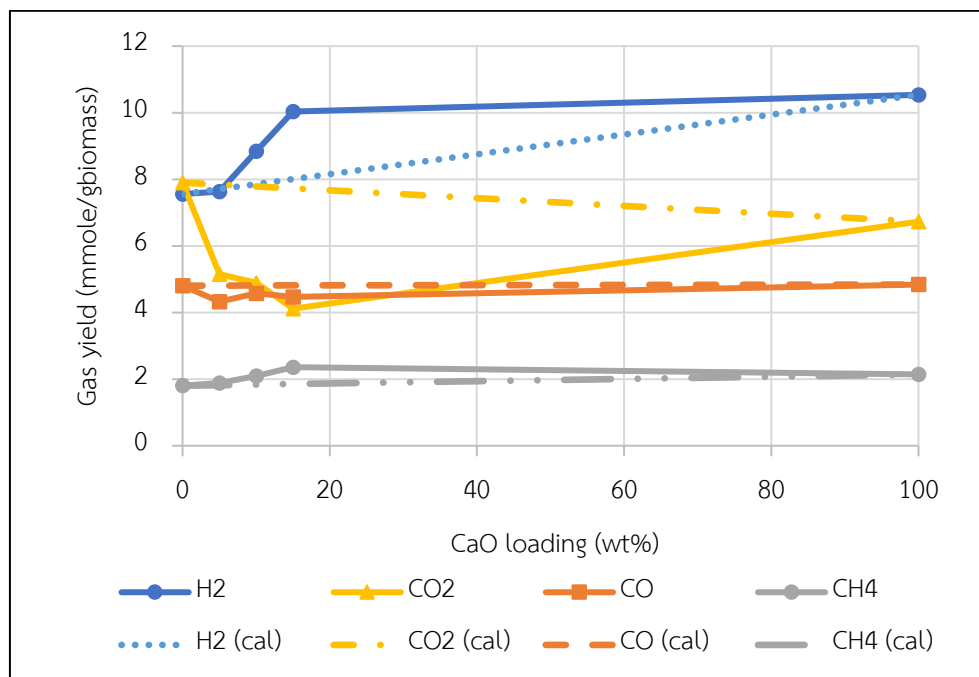
$$Y_{cal} = X_{Li_4SiO_4} \times Y_{Li_4SiO_4} + (1 - X_{Li_4SiO_4}) \times Y_{CaO} \quad (4.5)$$

โดย  $Y_{cal}$  คือ ค่าผลได้ทำนาย

$X_{Li_4SiO_4}$  คือ ค่าอัตราส่วนโดยมวลของลิเทียมอโทซิลิเกต

$Y_{Li_4SiO_4}$  คือ ผลได้ของการทดลองลิเทียมอโทซิลิเกตเพียงอย่างเดียว

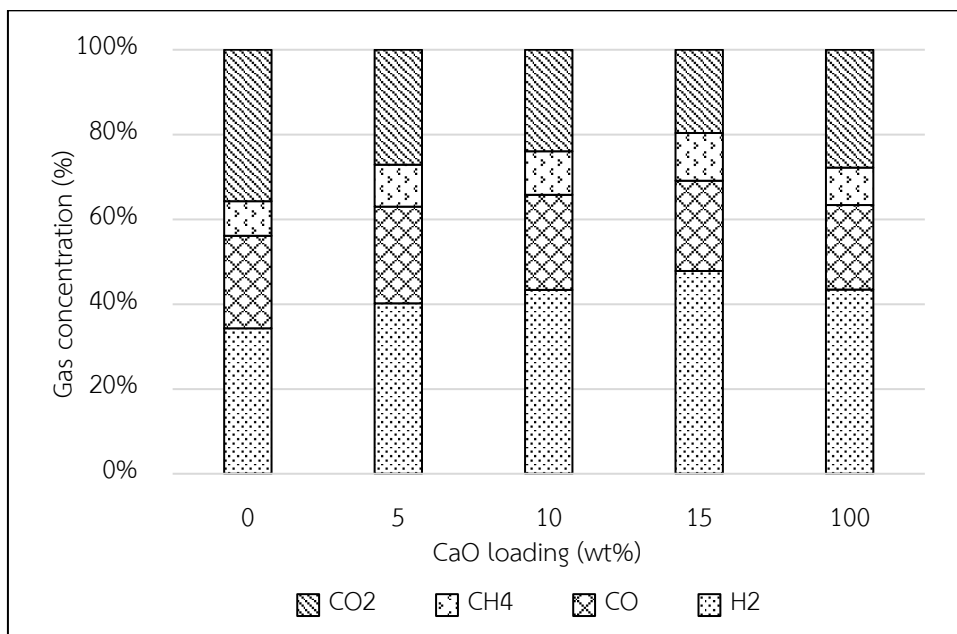
$Y_{CaO}$  คือ ผลได้ของการทดลองของแคลเซียมออกไซด์เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.8 ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลอง (เส้นทึบ) และผลได้จากการทำนาย (เส้นปะ)

เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 0 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีแนวโน้มสูงขึ้นร้อยละ 34.90 40.23 43.34 และ 47.82 โดยปริมาตร ในขณะที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงร้อยละ 35.71 27.10 23.95 และ 19.66 โดยปริมาตร จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าลิเทียมอโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของลิเทียมอโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ส่งผลให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง นอกจากนั้นยังยืนยันได้จากผลการทดลองของแคลเซียมออกไซด์ที่มีค่า

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนร้อยละ 43.44 โดยปริมาตร ซึ่งต่ำกว่าการทดลองของ Ca15Li และมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 27.77 โดยปริมาตร ซึ่งสูงกว่าการทดลองของ Ca5Li Ca10Li และ Ca15Li



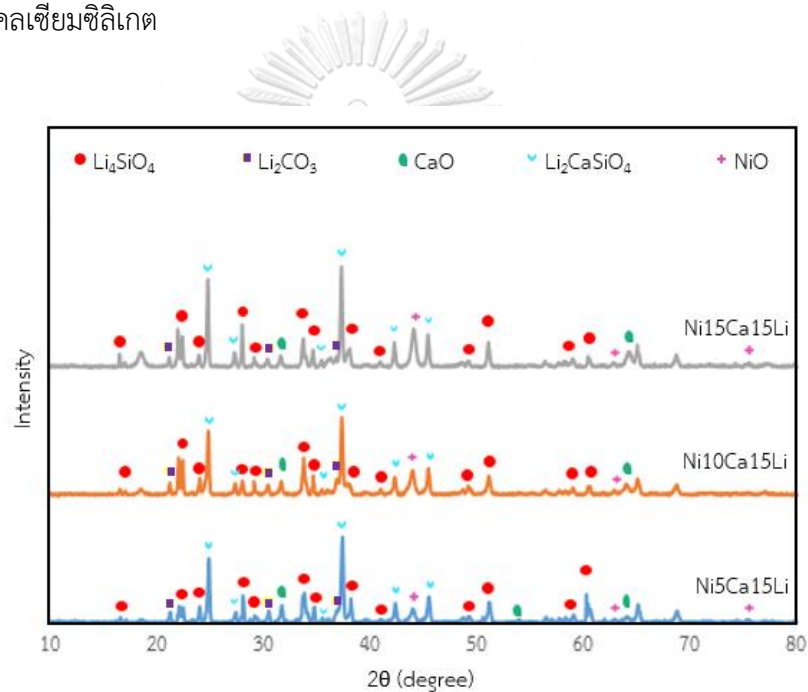
รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

#### 4.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นว่าตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตที่เพิ่มด้วยแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 15 โดยมวล เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนสูงที่สุด ดังนั้นตัวดูดซับ Ca15Li จึงถูกนำมาเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

#### 4.4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต

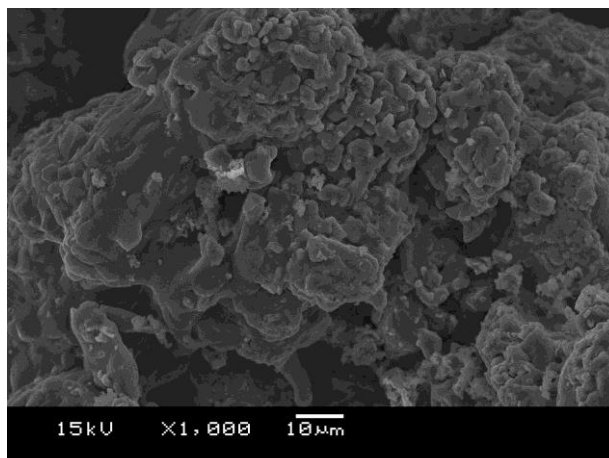
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการอิมเพรกเนชัน เพื่อศึกษาผลได้และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากแก๊สซิเคชันที่เพิ่มด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต ผลการวิเคราะห์วัฏภาคองค์ประกอบของ Ni5Ca15Li Ni10Ca15Li และ Ni15Ca15Li แสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตทุกตัวจะปรากฏความเข้มพีคของ ลิเทียมอโทซิลิเกต แคลเซียมออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ ลิเทียมคาร์บอเนต และลิเทียมแคลเซียมซิลิเกต



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิค XRD ของ Ni5Ca15Li Ni10Ca15Li และ Ni15Ca15Li ที่สังเคราะห์ได้

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีลักษณะจะมีลักษณะขรุขระและจะสังเกตเห็นว่ามีอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิว แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับ Ca15Li ที่แสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า เมื่อเติมนิกเกิลออกไซด์ลงไปจะทำให้พื้นผิวขรุขระน้อยลงและอัดแน่นกว่าตัวดูดซับ Ca15Li ซึ่งอาจมีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์





รูปที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li

ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดผลึกเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกไซด์-โทซิลิเกต พบว่าเมื่อปริมาณของนิกเกิลออกไซด์ที่เติมลงไปเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดผลึกเฉลี่ยของนิกเกิลออกไซด์เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของขนาดผลึกเฉลี่ยอาจเกิดจากการรวมกลุ่มของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นและมีการกระจายตัวที่ลดลง [8] โดยขนาดผลึกเฉลี่ยของนิกเกิลออกไซด์สามารถคำนวณได้จากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) [39]

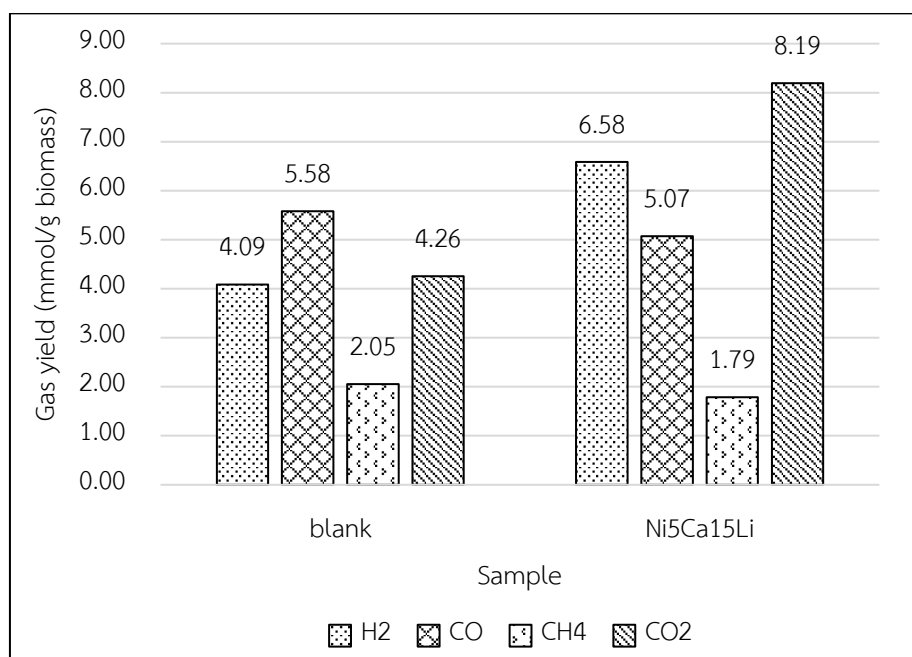
ตารางที่ 4.4 ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกไซด์-โทซิลิเกต

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)
Ni5Ca15Li	3.17
Ni10Ca15Li	8.77
Ni15Ca15Li	18.10

4.4.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกไซด์-โทซิลิเกตต่อแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย

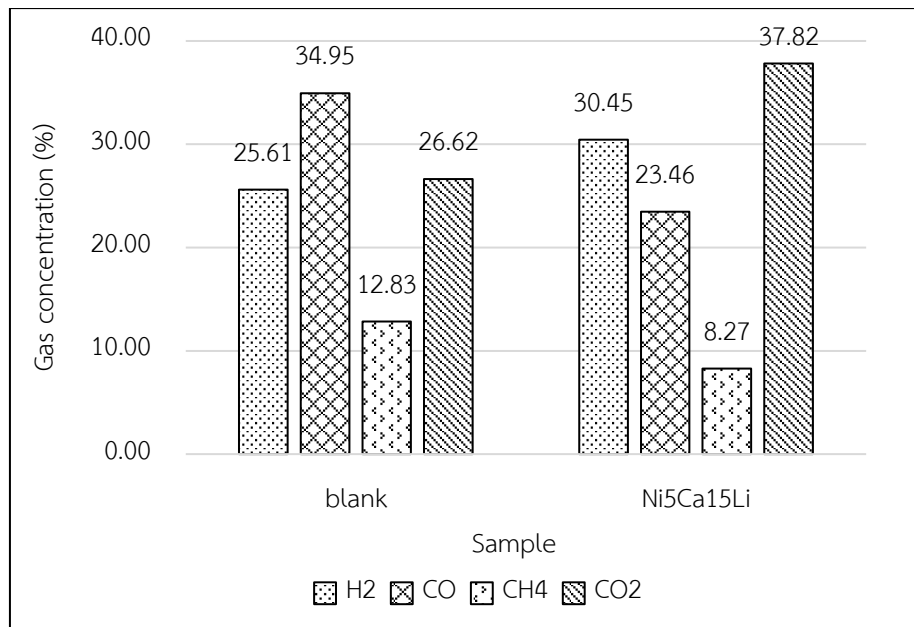
รูปที่ 4.12 แสดงผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากแกซิฟิเคชันของ Ni5Ca15Li และการทดลองที่ไม่มีตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้ Ni5Ca15Li ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยจะส่งผลให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้นจาก 15.98 เป็น 21.64 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยเมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มขึ้นของผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สสามารถสันนิษฐานได้จากคุณสมบัติของนิกเกิลออกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วย

ไอน้ำ และการแตกตัวของสารระเหยที่ได้จากไพโรไลซิสในขั้นแรก [7] รวมทั้งยังมีคุณสมบัติเชิงเร่งการแตกตัวของทาร์จากแคลเซียมออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกตที่ช่วยส่งเสริมให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4. 12 ผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สของ Ni<sub>5</sub>Ca<sub>15</sub>Li และการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (blank) ที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากแกซิฟิเคชันของ Ni<sub>5</sub>Ca<sub>15</sub>Li และการทดลองที่ไม่มีตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าในการทดลองที่ใช้ Ni<sub>5</sub>Ca<sub>15</sub>Li เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละโดยปริมาตรของไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีค่าสูงขึ้นร้อยละ 4.84 เมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และร้อยละโดยปริมาตรของคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงร้อยละ 11.49 ซึ่งเป็นผลมาจากการเร่งปฏิกิริยาเคมีและการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ที่มีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา Ni<sub>5</sub>Ca<sub>15</sub>Li



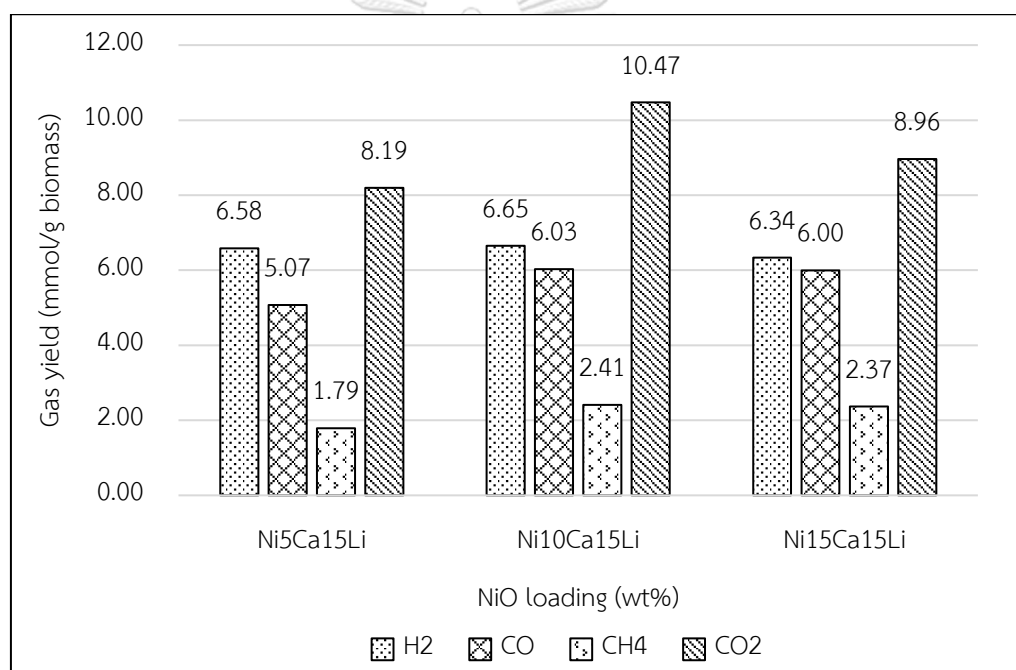
รูปที่ 4. 13 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของ Ni5Ca15Li และ การทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (blank) ที่อุณหภูมิแกซีฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

#### 4.5 ผลของปริมาณนิกเกิลออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกไซด์เกิดต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ปริมาณการใส่นิกเกิลออกไซด์ลงใน Ca15Li ถูกนำมาศึกษาในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสมต่อผลได้และองค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส นิกเกิลออกไซด์ถูกใส่ลงใน Ca15Li ด้วยวิธีการอิมเพกเนชัน ในอัตราส่วนเท่ากับร้อยละ 5 10 และ 15 โดยมวล

รูปที่ 4.14 แสดงผลได้ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li Ni10Ca15Li และ Ni15Ca15Li ในหน่วยมิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลจากการทดลองของ Ni5Ca15Li และ Ni10Ca15Li พบว่าผลิตภัณฑ์ของแก๊สรวมเพิ่มขึ้นจาก 21.64 เป็น 25.57 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย เป็นผลมาจากผลได้ของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และ คาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการทดลองที่ใช้ Ni10Ca15Li มีความสามารถในการกระตุ้นให้เกิดการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ได้ดีกว่าการทดลองที่ใช้ Ni5Ca15Li เนื่องจากมีตำแหน่งกัมมันต์ (active sites) ในการเร่งปฏิกิริยาในแกซีฟิเคชันเพิ่มขึ้นจากปริมาณนิกเกิลออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น [8]

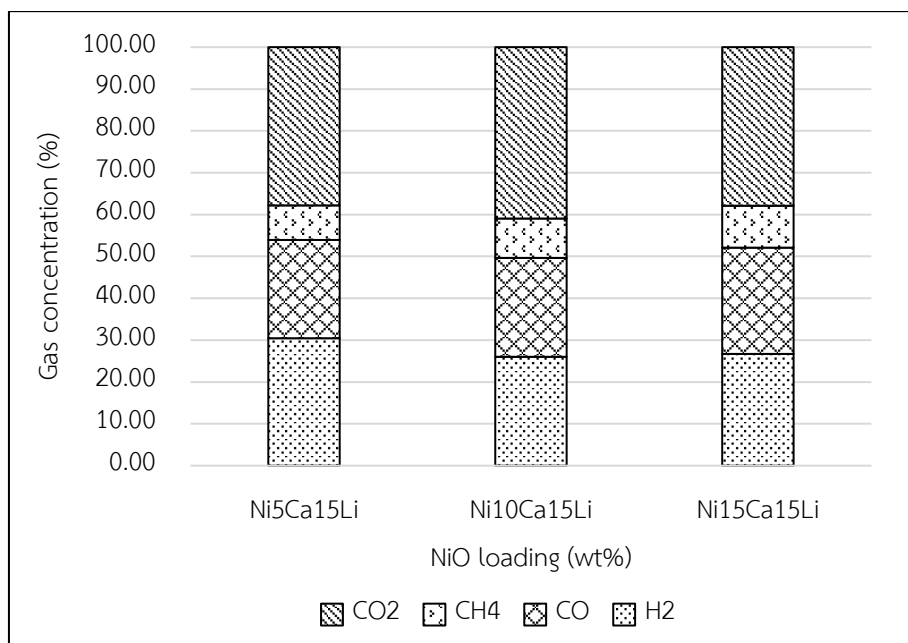
เมื่อพิจารณาผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองของ Ni10Ca15Li เทียบกับการทดลองของ Ni15Ca15Li พบว่าผลิตภัณฑ์ของแก๊สรวมลดลงจาก 25.57 เป็น 23.66 มิลลิโมลต่อกรัมไบโอสลัด เป็นผลมาจากผลได้ของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบผลได้รวมของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองของ Ni15Ca15Li กับ Ni5Ca15Li ยังคงมีค่าสูงกว่า แสดงให้เห็นว่าการทดลองที่ใช้ Ni15Ca15Li มีความสามารถในการกระตุ้นให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาฟอรัมมิงด้วยไอน้ำ และปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ แต่ด้วยปริมาณของนิกเกิลออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดผลึกเฉลี่ยของนิกเกิลออกไซด์เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของขนาดผลึกเฉลี่ยอาจเกิดจากการรวมกลุ่มของอนุภาค และส่งผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาและลดพื้นที่ผิวที่มีมันต์ [8]



รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณนิกเกิลออกไซด์ที่มีต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบโอสลัด ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.15 แสดงองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li Ni10Ca15Li และ Ni15Ca15Li เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของไฮโดรเจนจะเห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิลออกไซด์ร้อยละ 5 โดยมวลจะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนสูงสุดที่ร้อยละ 30.45 โดยปริมาตร ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองของ Ni10Ca15Li และ Ni15Ca15Li มีค่าใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 26.03 และ 26.73 โดยปริมาตร สันนิษฐานว่าเกิดจาก

ปริมาณนิกเกิลออกไซด์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์เกิดได้ยากขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับลิเทียมอโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์ลดลง และสมดุลของปฏิกิริยาแวนเดอร์-แก๊สซิฟท์ตามสมการที่ 2.11 เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย



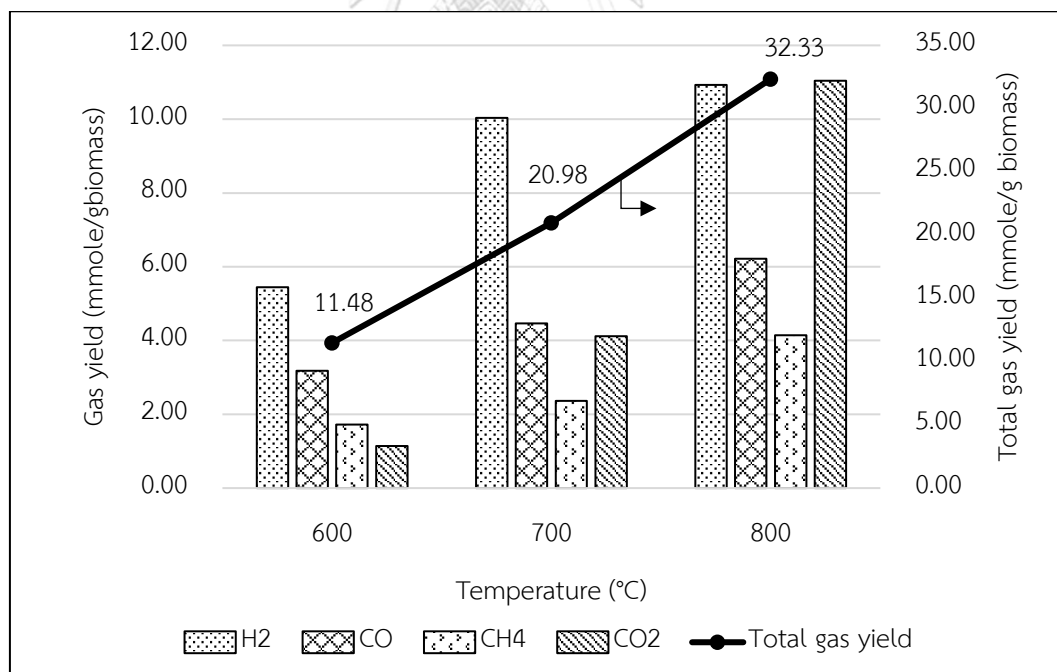
รูปที่ 4.15 ผลของปริมาณนิกเกิลออกไซด์ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.6 ผลของอุณหภูมิแกซิฟิเคชันต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต

อุณหภูมิแกซิฟิเคชันถูกนำมาศึกษาในแกซิฟิเคชันด้วยน้ำของไบอ้อย โดยใช้ Ca15Li และ Ni5Ca15Li ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้อัตราความเข้มข้นของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่สุดจากการทดลองก่อนหน้า เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพเชิงเร่งปฏิกิริยาของ Ca15Li และ Ni5Ca15Li ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ รวมถึงศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดำเนินกระบวนการอุณหภูมิที่ใช้ศึกษาได้แก่ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส

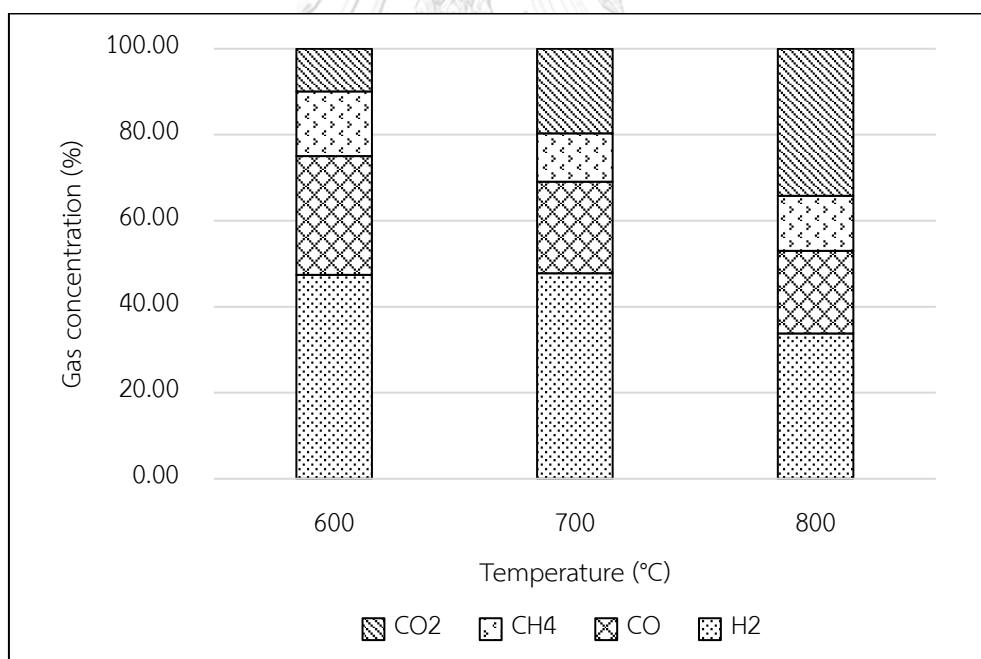
4.6.1 ผลของอุณหภูมิแกซิฟิเคชันต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยโดยใช้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออร์โทซิลิเกต

รูปที่ 4.16 แสดงผลได้ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส จากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับ Ca5Li โดยมีอุณหภูมิแกซิฟิเคชันที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวม พบว่าเมื่ออุณหภูมิแกซิฟิเคชันเป็น 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมที่ได้จากการทดลองเป็น 11.48 20.98 และ 32.33 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ จะเห็นว่าผลได้รวมของผลิตภัณฑ์แก๊สจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแกซิฟิเคชันเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาผลได้ของแก๊สแต่ละชนิดจะเห็นว่าผลได้ของแก๊สทุกชนิดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแกซิฟิเคชันสูงขึ้นเช่นกัน การเพิ่มขึ้นของผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของการแตกตัวของสารระเหยที่ควบแน่นได้หรือทาร์ที่ได้จากไพโรไลซิส หรือเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งคืออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแกซิฟิเคชัน เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ ยกตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และปฏิกิริยาบูควาร์ด ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ปฏิกิริยาเหล่านี้จึงเกิดได้ดียิ่งขึ้น [32, 44, 46]



รูปที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิแกซิฟิเคชันที่มีต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย โดยใช้ตัวดูดซับ Ca5Li

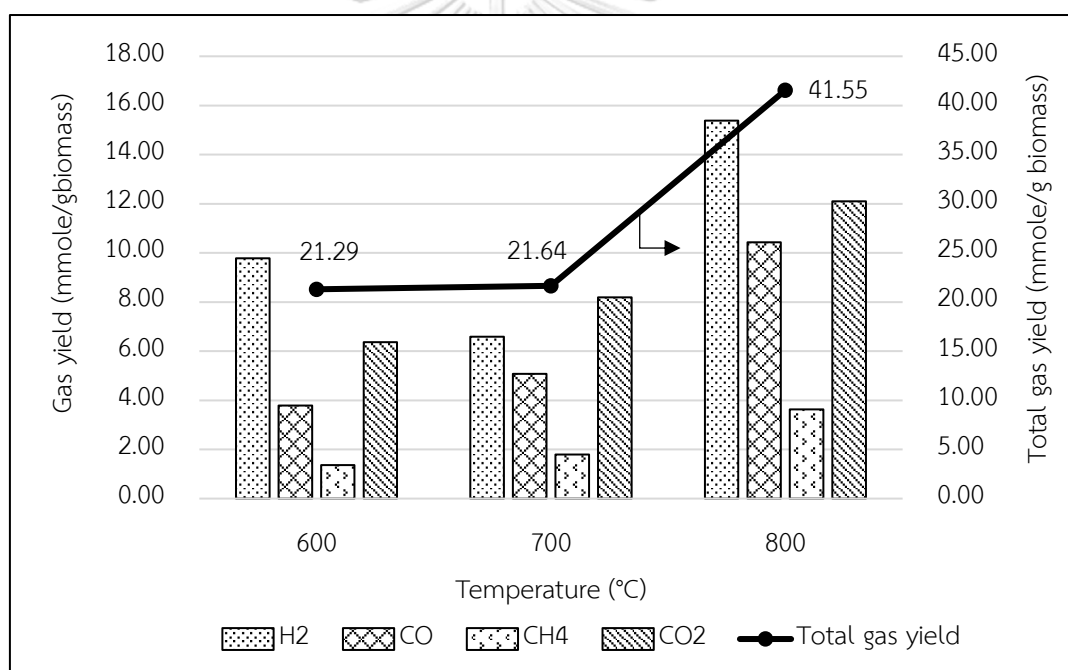
เมื่อพิจารณาผลขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จะพบว่าร้อยละความเข้มข้นโดยปริมาตรของไฮโดรเจนที่ได้จากแก๊สที่เคชันที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียสมีค่าใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 47.39 และ 47.82 โดยปริมาตรตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิแก๊สที่เคชัน 800 องศาเซลเซียส จะมีค่าลดลงเป็นร้อยละ 33.81 โดยปริมาตร ในขณะที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 9.92 19.66 และ 34.25 โดยปริมาตร เมื่ออุณหภูมิแก๊สที่เคชันเพิ่มขึ้นจาก 600 เป็น 700 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ การลดลงของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์สามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาคาร์บอนชันของลิเทียมอโทซิลิเกตและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิแก๊สที่เคชันเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จึงลดลง การเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนสามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาอวอเตอร์-แก๊สชิฟต์ตามสมการที่ 2.11 เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับทำให้สมดุลเปลี่ยนไปในทางที่ช่วยเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจน อีกทั้งปฏิกิริยาอวอเตอร์-แก๊สชิฟต์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นที่อุณหภูมิแก๊สที่เคชันที่ต่ำจึงพบความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สูงกว่า [32]



รูปที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิแก๊สที่เคชันที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแก๊สที่เคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย โดยใช้ตัวดูดซับ Ca15Li

4.6.2 ผลของอุณหภูมิแกซีฟิเคชันต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออร์โทซิลิเกต

รูปที่ 4.18 แสดงผลได้ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca5Li โดยมีอุณหภูมิแกซีฟิเคชันที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวม พบว่าเมื่ออุณหภูมิแกซีฟิเคชันเพิ่มขึ้นเป็น 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมที่ได้จากการทดลองจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 21.29 21.64 และ 41.55 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนของสารระเหยที่ได้จากไพโรไลซิสและปฏิกิริยารีดิวซ์ด้วยไอน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นได้ดีเมื่ออุณหภูมิแกซีฟิเคชันสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันได้จากปริมาณมีเทนที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น [32]

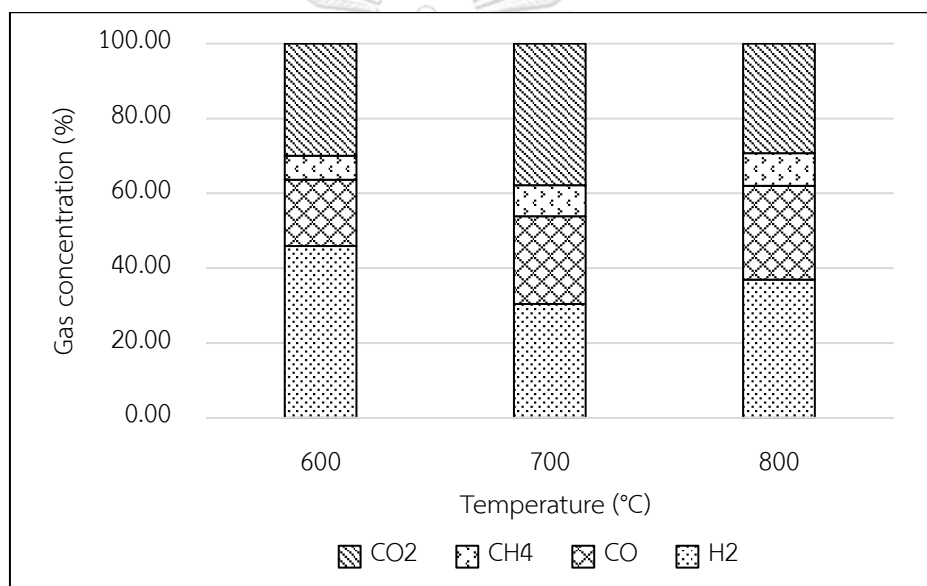


รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิแกซีฟิเคชันที่มีต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca5Li

รูปที่ 4.19 แสดงองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li โดยมีอุณหภูมิแกซีฟิเคชันที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลงจากร้อยละ 45.88 โดยปริมาตร เป็นร้อยละ 30.45 โดยปริมาตร ในขณะที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์



ออกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 29.97 โดยปริมาตร เป็นร้อยละ 37.82 โดยปริมาตร เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30.45 โดยปริมาตร เป็นร้อยละ 36.91 โดยปริมาตร ในขณะที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 37.82 โดยปริมาตร เป็นร้อยละ 29.24 โดยปริมาตร จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้อุณหภูมิแกซิฟิเคชันเป็น 600 องศาเซลเซียส เป็นผลมาจากการทำงานของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชันเป็น 800 องศาเซลเซียสจะให้ร้อยละความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สูงกว่าอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นผลมาจากการแตกตัวและปฏิกิริยารีดิวซ์ด้วยไอน้ำที่เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง [32]

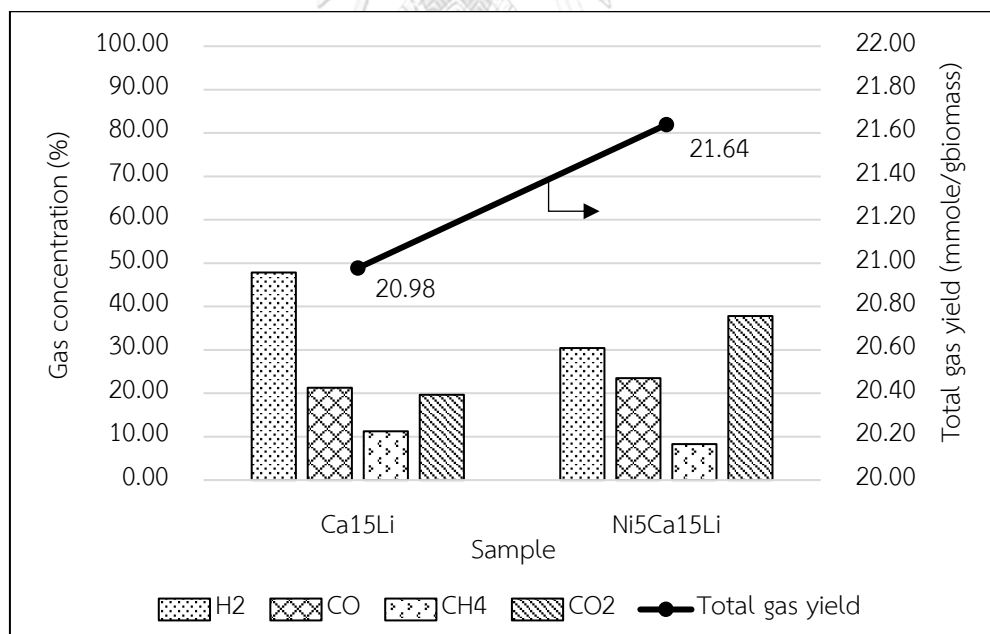


รูปที่ 4.19 ผลของอุณหภูมิแกซิฟิเคชันที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย โดยใช้ตัวดูดซับ Ni<sub>5</sub>Ca<sub>15</sub>Li

#### 4.7 เปรียบเทียบผลการทดลองของ Ni<sub>5</sub>Ca<sub>15</sub>Li และ Ca<sub>15</sub>Li จากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

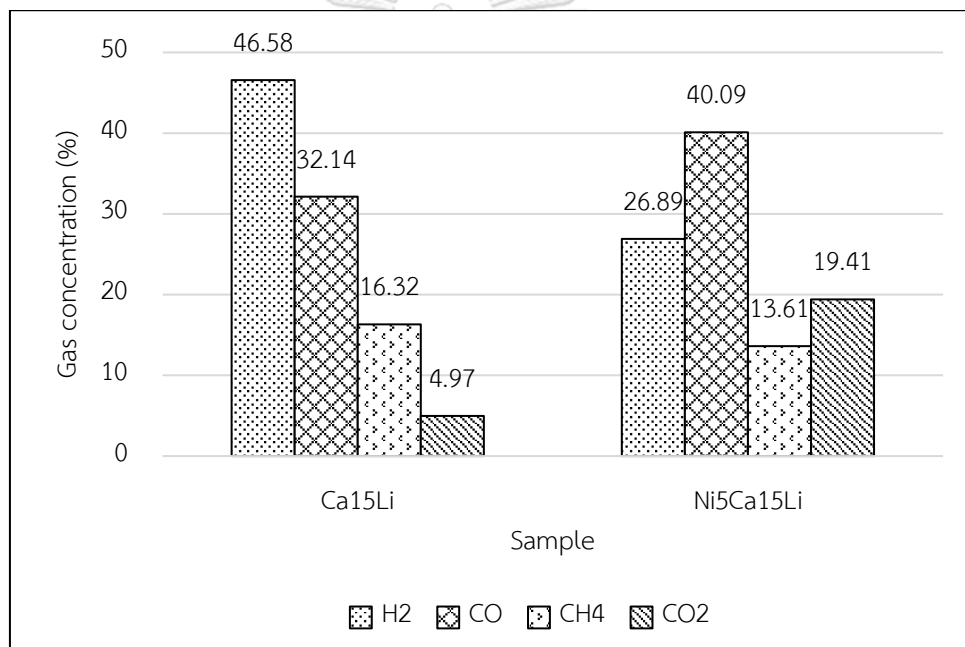
จากการทดลองก่อนหน้า เมื่อพิจารณาผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Ca<sub>15</sub>Li และ Ni<sub>5</sub>Ca<sub>15</sub>Li ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Ni<sub>5</sub>Ca<sub>15</sub>Li และ Ca<sub>15</sub>Li มีค่าเท่ากับ 21.64 และ 20.91 มิลลิโมลต่อกรัมใบอ้อย จะเห็นว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมที่ได้จากการทดลองของ Ni<sub>5</sub>Ca<sub>15</sub>Li มีค่าสูงกว่า Ca<sub>15</sub>Li

เล็กน้อย สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li ที่มีนิกเกิลออกไซด์จะเข้าไปช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวและปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในแกซิฟิเคชัน ส่งผลให้ผลได้รวมของแก๊สเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของไฮโดรเจนพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li จะได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 30.45 โดยปริมาตร ซึ่งมีความเข้มข้นน้อยกว่าการทดลองของ Ca15Li ที่ได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 47.82 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองของ Ni5Ca15Li จะมีค่าสูงกว่าการทดลองของ Ca15Li อยู่ร้อยละ 18.16 และ 2.18 โดยปริมาตร สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li เกิดได้ยากขึ้น โดยคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับที่บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทันที แต่ต้องเกิดการแพร่ผ่านชั้นของนิกเกิลออกไซด์เพื่อเข้าไปสู่ชั้นที่เป็นแคลเซียมออกไซด์และลิเทียมออกไซด์เพื่อให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งต้องใช้เวลาในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นการทดลองที่ใช้ Ca15Li จึงเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า ส่งผลให้ปฏิกิริยาแวนเดอร์-แก๊สซิฟิเคชันเกิดได้ดีขึ้นและให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีร้อยละความเข้มข้นของไฮโดรเจนสูงและร้อยละความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ



รูปที่ 4.20 ผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของ Ca5Li และ Ni5Ca15Li ที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.21 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของ Ca5Li และ Ni5Ca15Li ที่เวลา 5 นาทีแรกของการทดลอง พบว่าการทดลองของ Ni5Ca15Li มีค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 26.89 โดยปริมาตร และมีค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 19.41 โดยปริมาตร ในขณะที่การทดลองของ Ca15Li มีค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 46.58 โดยปริมาตร และมีค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 4.97 โดยปริมาตร จะเห็นว่าการทดลองของ Ni5Ca15Li มีค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนต่ำกว่าการทดลองของ Ca15Li และ มีค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการทดลองของ Ca15Li แสดงว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ Ni5Ca15Li เกิดขึ้นได้ช้ากว่าการทดลองของ Ca15Li เนื่องจากต้องใช้เวลาในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปสู่ตัวดูดซับ



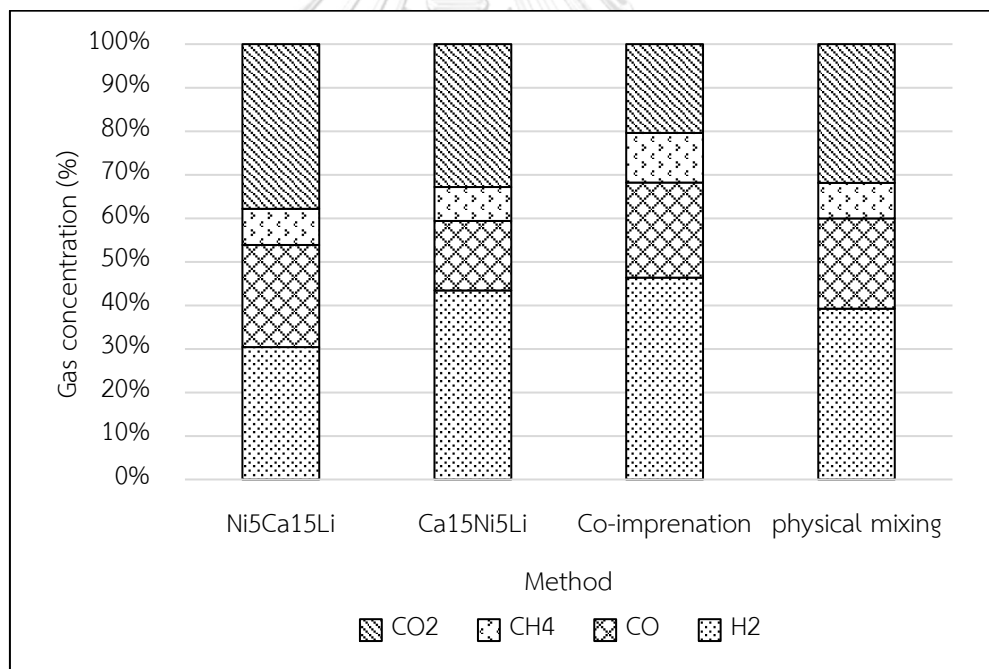
รูปที่ 4.21 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของ Ca5Li และ Ni5Ca15Li ที่เวลา 5 นาทีแรก

#### 4.8 ผลของวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกไซด์ที่เกิดต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของใบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากการทดลองก่อนหน้า พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนต่ำ ดังนั้นจึงทำการทดลองหาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกไซด์ที่มีนิกเกิลออกไซด์ร้อยละ 5 โดยมวล และมี

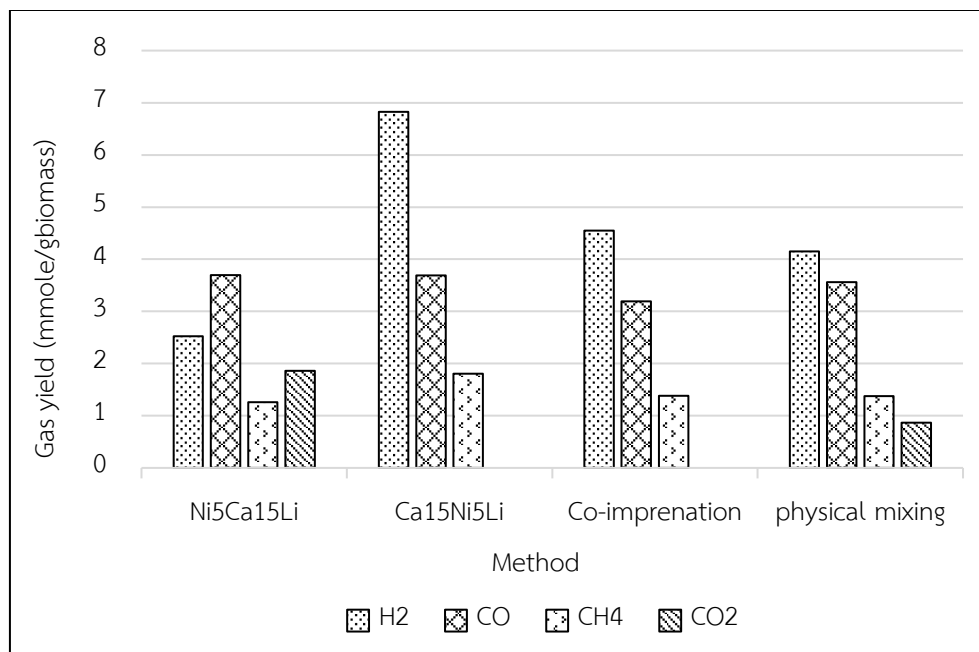
แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 15 โดยมีวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน 4 วิธี คือ วิธีอิมเพรกเนชันที่เพิ่มแคลเซียมออกไซด์ก่อนนิกเกิลออกไซด์ วิธีอิมเพรกเนชันที่เพิ่มนิกเกิลออกไซด์ก่อนแคลเซียมออกไซด์ วิธีการอิมเพรกเนชันร่วม และวิธีการผสมทางกายภาพ เพื่อหาวิธีสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แล้วให้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนสูงสุด

ผลของวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.22 จากผลการทดลองพบว่า วิธีการอิมเพรกเนชันร่วมจะให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สสูงสุดที่ร้อยละ 46.36 โดยปริมาตร ตามด้วยวิธีอิมเพรกเนชันที่เพิ่มนิกเกิลออกไซด์ก่อนแคลเซียมออกไซด์ (Ca15Ni5Li) วิธีการผสมทางกายภาพ และ วิธีอิมเพรกเนชันที่เพิ่มแคลเซียมออกไซด์ก่อนนิกเกิลออกไซด์ (Ni5Ca15Li) ซึ่งให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สสูงสุดที่ร้อยละ 43.43 39.22 และ 30.45 โดยปริมาตรตามลำดับ



รูปที่ 4.22 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li ที่มีวิธีการเตรียมต่างกัน

รูปที่ 4.23 แสดงผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่เวลา 5 นาทีแรก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li ที่มีวิธีการเตรียมต่างกัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีอิมเพรกเนชันร่วม และวิธีอิมเพรกเนชันที่เพิ่มนิกเกิลออกไซด์ก่อนแคลเซียมออกไซด์จะไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบ แสดงให้เห็นว่า การเตรียมด้วย 2 วิธีนี้จะช่วยให้การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงให้ผลได้ของไฮโดรเจนที่มีค่าสูงกว่าการเตรียมด้วยวิธีอื่น



รูปที่ 4.23 ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่เวลา 5 นาทีแรก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li ที่มีวิธีการเตรียมต่างกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตในแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย โดยศึกษาผลของ อัตราส่วนผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อลิเทียมออกโทซิลิเกตและอัตราส่วนระหว่างนิกเกิลออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตที่เหมาะสมต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และเร่งปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย อุณหภูมิแกซีพีเคชันที่เหมาะสมต่อแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และผลของวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การใช้ตัวดูดซับลิเทียมออกโทซิลิเกตและแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกโทซิลิเกตจะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้ตัวดูดซับ การเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ลงไปในลิเทียมออกโทซิลิเกต จะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สูงกว่าการทดลองที่ใช้เพียงตัวดูดซับลิเทียมออกโทซิลิเกต และให้ผลได้และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำงานร่วมกันของแคลเซียมออกไซด์และลิเทียมออกโทซิลิเกต ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารระเหย ปฏิกิริยารีดิวซ์ด้วยไอน้ำที่สูงขึ้น ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5 10 และ 15 จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีแนวโน้มของผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สูงขึ้นและผลได้ของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีแนวโน้มที่ลดลง ผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สจะสูงสุดในการทดลองของ Ca15Li โดยผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 10.03 มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อยและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 47.82

5.1.2 ผลของปริมาณนิกเกิลออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตจะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีผลได้และความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นผลมาจากความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของนิกเกิลออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และลิเทียมอโทซิลิเกต รวมทั้งผลจากความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกต ปริมาณนิกเกิลออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดผลึกเฉลี่ยใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และลงพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นความเข้มข้นของไฮโดรเจนจะมีค่าสูงสุดในการทดลองของ Ni5Ca15Li โดยมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 30.45 ถึงแม้ว่าผลได้ของไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองของ Ni10Ca15Li จะมีค่าสูงกว่า

5.1.3 ผลของอุณหภูมิแกซิฟิเคชันต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกต

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน และความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้การทำงานของปฏิกิริยาโดยรวมในแกซิฟิเคชันเกิดได้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์และลิเทียมอโทซิลิเกต รวมทั้งปฏิกิริยาวอเตอร์-แก๊สชิฟท์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จึงส่งผลให้การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นความเข้มข้นของไฮโดรเจนจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อยโดยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li จะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิแกซิฟิเคชันเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส โดยมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 45.88

5.1.4 ผลของวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมอโทซิลิเกตต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไบอ้อย ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni5Ca15Li ที่ได้จากการเติมนิกเกิลออกไซด์ลงใน Ca15Li จะทำให้ได้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมสูงกว่าการทดลองของ Ca15Li แต่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ได้มีค่าน้อยกว่าการทดลองของ Ca15Li อยู่มาก เนื่องจาก

คาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ निकेलออกไซด์ที่เพิ่มเข้าไปทำให้การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต้องใช้เวลานานและเกิดได้ยากขึ้น ซึ่งวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันจะให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สต่างกัน ความเข้มข้นของไฮโดรเจนจะมีค่าสูงสุดเมื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni<sub>5</sub>Ca<sub>15</sub>Li ด้วยวิธีการอิมเพรกเนชันร่วม ที่โดยมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 46.36

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจะเห็นว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์-ลิเทียมออกไซด์สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ลงไปกลับส่งผลให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ได้ลดลง แม้ว่าจะมีผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สสูงกว่า แต่เมื่อเปลี่ยนวิธีการเตรียมจะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการเตรียมที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อโครงสร้างหรือองค์ประกอบที่เกิดขึ้นภายในตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงควรศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการที่ต่างกันเพิ่มเติม เพื่อหาความสัมพันธ์คือการเร่งปฏิกิริยาและการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สพีเคชันของชีวมวล



## บรรณานุกรม

- [1] Nikolaidis, P., Poullikkas, A. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;67:597-611.
- [2] Qian, K., Kumar, A. Catalytic reforming of toluene and naphthalene (model tar) by char supported nickel catalyst. *Fuel*. 2017;187:128-36.
- [3] Shahbaz, M., Yusup, S., Inayat, A., Patrick, D.O., Ammar, M. 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;73:468-76.
- [4] Sutton, D., Kelleher, B., Ross, J.R.H. Review of literature on catalysts for biomass gasification. *Fuel Processing Technology*. 2001;73(3):155-73.
- [5] Lu, Y., Jin, H., Zhang, R. Evaluation of stability and catalytic activity of Ni catalysts for hydrogen production by biomass gasification in supercritical water. *Carbon Resources Conversion*. 2019;2(1):95-101.
- [6] Jin, F., Sun, H., Wu, C., Ling, H., Jiang, Y., Williams, P.T., et al. Effect of calcium addition on Mg- $\text{AlO}_x$  supported Ni catalysts for hydrogen production from pyrolysis-gasification of biomass. *Catalysis Today*. 2018;309:2-10.
- [7] Li, B., Yang, H., Wei, L., Shao, J., Wang, X., Chen, H. 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):5840-8.
- [8] Abedi, A., Dalai, A.K. Steam gasification of oat hull pellets over Ni-based catalysts: Syngas yield and tar reduction. *Fuel*. 2019;254:115585.
- [9] Li, B., Wei, L., Yang, H., Wang, X., Chen, H. The enhancing mechanism of calcium oxide on water gas shift reaction for hydrogen production. *Energy*. 2014;68:248-54.
- [10] Voldsund, M., Jordal, K., Anantharaman, R. Hydrogen production with  $\text{CO}_2$  capture. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(9):4969-92.
- [11] Salaudeen, S.A., Acharya, B., Dutta, A. CaO-based  $\text{CO}_2$  sorbents: A review on

- screening, enhancement, cyclic stability, regeneration and kinetics modelling. *Journal of CO2 Utilization*. 2018;23:179-99.
- [12] Shokrollahi Yancheshmeh, M., Radfarnia, H.R., Iliuta, M.C. High temperature CO2 sorbents and their application for hydrogen production by sorption enhanced steam reforming process. *Chemical Engineering Journal*. 2016;283:420-44.
- [13] Bonechi, C., Consumi, M., Donati, A., Leone, G., Magnani, A., Tamasi, G., et al. 1 - Biomass: An overview. In: Dalena F, Basile A, Rossi C, editors. *Bioenergy Systems for the Future*: Woodhead Publishing; 2017. p. 3-42.
- [14] ประพันธ์ คูชลธรราร, ศศิธร สรรพอค์. พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2015.
- [15] de Jong, W. Biomass Composition, Properties, and Characterization. *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future*. 2014:36-68.
- [16] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. *Thailand Alternative Energy Situation*. 2561;16.
- [17] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. *สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม-ธันวาคม 2562*. 2562.
- [18] International Renewable Energy Agency. *Renewable Energy Outlook Thailand*. 2017.
- [19] Yoovatana, L. Biomass raw material suitability assessment used in fuel pellet production against green productivity principle. Thailand: Chulalongkorn University; 2017.
- [20] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. *คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 4 พลังงานชีวมวล*. กรุงเทพฯ 2554.
- [21] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. *รายงานพื้นที่ปลูกอ้อย ปีการผลิต 2561/62*. ประเทศไทย 2562. p. 8-11.
- [22] Basu, P. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*: Elsevier.
- [23] Gao, N., Li, A., Quan, C., Gao, F. 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):5430-8.
- [24] de Lasa, H., Salices, E., Mazumder, J., Lucky, R. Catalytic Steam Gasification of Biomass: Catalysts, Thermodynamics and Kinetics. *Chemical Reviews*.

- 2011;111(9):5404-33.
- [25] Göransson, K., Söderlind, U., He, J., Zhang, W. Review of syngas production via biomass DFBGs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(1):482-92.
- [26] Chen, X., Xiong, Z., Qin, Y., Gong, B., Tian, C., Zhao, Y., 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):13077-85.
- [27] Kim, H., Jang, H.D., Choi, M. 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;280:132-7.
- [28] Wang, J., Huang, L., Yang, R., Zhang, Z., Wu, J., Gao, Y., et al. Recent Advances in Solid Sorbents for CO<sub>2</sub> Capture and New Development Trends. *Energy Environ Sci*. 2014;7.
- [29] Dou, B., Wang, C., Song, Y., Chen, H., Jiang, B., Yang, M., 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;53:536-46.
- [30] Yan, X., Li, Y., Ma, X., Zhao, J., Wang, Z. Performance of Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> Material for CO<sub>2</sub> Capture: A Review. *Int J Mol Sci*. 2019;20(4):928.
- [31] Wang, Q., Luo, J., Zhong, Z., Borgna, A. CO<sub>2</sub> capture by solid adsorbents and their applications: Current status and new trends. *Energy Environ Sci*. 2010;4:42-55.
- [32] Wei, L., Yang, H., Li, B., Wei, X., Chen, L., Shao, J., 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):15416-23.
- [33] Hu, R., Li, D., Xue, H., Zhang, N., Liu, Z., Liu, Z. Hydrogen production by sorption-enhanced steam reforming of acetic acid over Ni/Ce<sub>x</sub>Zr<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub>-CaO catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(12):7786-97.
- [34] Gas Chromatograph (GC) [Internet]. 2018 [cited 7 October 2020]. Available from: <https://www.chemeng.uq.edu.au/icss/capability/carbon-dioxide-capture-and-utilisation>.
- [35] X-Ray Diffraction – XRD [Internet]. [cited 7 October 2020]. Available from:

<http://www.strec.chula.ac.th/base/equipments-rates/x-ray-diffraction-xrd>.

- [36] Instrument Database: JEOL - JSM-6480LV [Internet]. [cited 7 October 2020]. Available from: <http://www.speciation.net/Database/Instruments/JEOL/JSM6480LV-i47>.
- [37] Yang, Y., Liu, W., Hu, Y., Sun, J., Tong, X., Li, Q., et al. Novel low cost Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>-based sorbent with naturally occurring wollastonite as Si-source for cyclic CO<sub>2</sub> capture. *Chemical Engineering Journal*. 2019;374:328-37.
- [38] Xu, H., Cheng, W., Jin, X., Wang, G., Lu, H., Wang, H., et al. Effect of the Particle Size of Quartz Powder on the Synthesis and CO<sub>2</sub> Absorption Properties of Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> at High Temperature. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013;52:1886-91.
- [39] นพิตา ทิภูชีระนันท์ และ ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย. เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2014.
- [40] Anis, S., Zainal, Z.A. Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(5):2355-77.
- [41] Chiodo, V., Urbani, F., Zafarana, G., Prestipino, M., Galvagno, A., Maisano, S. Syngas production by catalytic steam gasification of citrus residues. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(46):28048-55.
- [42] Amorim, S.M., Domenico, M.D., Dantas, T.L.P., José, H.J., Moreira, R.F.P.M. 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;283:388-96.
- [43] Bunma, T., Kuchonthara, P. 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;118:188-94.
- [44] Florin, N.H., Harris, A.T. Enhanced hydrogen production from biomass with in situ carbon dioxide capture using calcium oxide sorbents. *Chemical Engineering Science*. 2008;63(2):287-316.
- [45] Kerkkaiwan, S., Fushimi, C., Tsutsumi, A., Kuchonthara, P. Synergetic effect during co-pyrolysis/gasification of biomass and sub-bituminous coal. *Fuel Processing Technology*. 2013;115:11-8.

- [46] Zhang, B., Zhang, L., Yang, Z., Yan, Y., Pu, G., Guo, M. Hydrogen-rich gas production from wet biomass steam gasification with CaO/MgO. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(29):8816-23.



## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของไบอ้อย

#### 1. การวิเคราะห์แบบปริมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์แบบปริมาณสามารถวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้ประกอบด้วย ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณความชื้น โดยวิธีการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบต่างๆมีดังนี้

##### 1.1 ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3173 ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. นำถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดไปอบแห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 104 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำถาดอะลูมิเนียมและฝาปิดเก็บในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 15 นาที เพื่อลดอุณหภูมิลง หลังจากนั้นนำถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาไปชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก
2. ชั่งตัวอย่างไบอ้อยประมาณ 1 กรัมลงในถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด ชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก
3. นำถาดอะลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างไบอ้อยพร้อมฝาปิดไปอบด้วยเตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 104 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักของตัวอย่างไบอ้อยจะมีค่าคงที่
4. นำถาดอะลูมิเนียมออกจากเตาอบแล้วเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อลดอุณหภูมิเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำถาดอะลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างไบอ้อยและฝาปิดไปชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = \frac{W_1 - W_2}{W} \times 100$$

โดย M คือ ร้อยละโดยมวลของความชื้นในตัวอย่างไบอ้อย

$W_1$  คือ น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียม ฝา และตัวอย่างไบอ้อยก่อนเริ่มทำการอบ (กรัม)

- $W_2$  คือ น้ำหนักของธาตุอะลูมิเนียม ผา และตัวอย่างใบอ้อยหลังทำการอบ (กรัม)  
 $W$  คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

## 1.2 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)

ปริมาณสารระเหยถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3175 ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. เเผาครุชชีเบล (Crucible) พร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสในเตาเผา (Muffle furnace) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวในเดซิเคเตอร์ จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก
2. ชั่งตัวอย่างใบอ้อยประมาณ 1 กรัมลงในครุชชีเบลพร้อมฝาปิด จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก
3. นำครุชชีเบลวางบริเวณเหนือเตาเผา (Turbular furnace) ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
4. หย่อนครุชชีเบลลงไปในเตาเผาบริเวณส่วนบนของเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
5. หย่อนครุชชีเบลลงไปในเตาเผาบริเวณกึ่งกลางของเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
6. นำครุชชีเบลออกจากเตาเผาแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = \frac{W_3 - W_4}{W} \times 100$$

- โดย  $V$  คือ ร้อยละโดยมวลของปริมาณสารระเหยในตัวอย่างใบอ้อย  
 $W_3$  คือ น้ำหนักของครุชชีเบล ผา และตัวอย่างใบอ้อยก่อนทำการเผา (กรัม)  
 $W_4$  คือ น้ำหนักของครุชชีเบล ผา และตัวอย่างใบอ้อยหลังทำการเผา (กรัม)  
 $W$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างใบอ้อย (กรัม)

### 1.3 ปริมาณเถ้า (Ash content)

ปริมาณเถ้าถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3174 ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. เผาครุชิเบิล (Crucible) พร้อมฝาปิดในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดสารปนเปื้อน จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก
2. ชั่งตัวอย่างไบอ้อยประมาณ 1 กรัมลงในครุชิเบิลพร้อมฝาปิด จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก
3. นำครุชิเบิลไปเผาด้วยตะเกียงเบนเซนจนกว่าไอระเหยจะหมดไป
4. เผาครุชิเบิลที่ผ่านการเผาด้วยตะเกียงเบนเซนในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. นำครุชิเบิลออกจากเตาเผาแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = \frac{W_5 - W_6}{W} \times 100$$

โดย	A	คือ ร้อยละโดยมวลของปริมาณเถ้าในตัวอย่างไบอ้อย
	$W_5$	คือ น้ำหนักของครุชิเบิล ฝา และเถ้าหลังการเผา (กรัม)
	$W_6$	คือ น้ำหนักของครุชิเบิล ฝา (กรัม)
	W	คือ น้ำหนักของตัวอย่างไบอ้อย (กรัม)

### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)

ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างไบอ้อยสามารถคำนวณได้จากร้อยละโดยน้ำหนักทั้งหมดหักลบกับร้อยละของความชื้น สารละลาย และปริมาณเถ้า ดังสมการด้านล่าง

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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



- โดย C คือ ร้อยละโดยมวลของคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างใบอ้อย  
M คือ ร้อยละโดยมวลของความชื้นในตัวอย่างใบอ้อย  
V คือ ร้อยละโดยมวลของสารระเหยในตัวอย่างใบอ้อย  
A คือ ร้อยละโดยมวลของเถ้าในตัวอย่างใบอ้อย



## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณผลได้และองค์ประกอบของแก๊ส

ตัวอย่างการคำนวณผลได้และความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลองแก๊สพีเคชั่นด้วยไอ้ของโบอ้อยที่เพิ่มด้วยตัวดูดซับของ Ca5Li โดยมีภาวะที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

- ปริมาณโบอ้อย	0.217 กรัม
- ปริมาณตัวดูดซับ	1.003 กรัม
- อุณหภูมิไฟโรไลซิส	700 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิแก๊สพีเคชั่น	700 องศาเซลเซียส
- เวลาในการทดลอง	30 นาที
- เวลาในการเก็บตัวอย่างแต่ละถุงเก็บแก๊ส	5 นาที
- อัตราการป้อนเข้าของแก๊สอาร์กอน	30 มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการป้อนเข้าของน้ำ	0.1 มิลลิลิตรต่อนาที
- รัศมีภายในของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊ส	0.5 เซนติเมตร
- ช่วงความสูงที่พิจารณาในการวัดอัตราการไหลของแก๊ส	10 เซนติเมตร

#### 1. การคำนวณปริมาตรของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ปริมาตรของผลิตภัณฑ์แก๊สคำนวณได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับปริมาตรในช่วงที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สในอุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่มีรัศมีภายใน 0.5 เซนติเมตร ในช่วงความสูง 10 เซนติเมตร ดังสมการ

$$V = \frac{\pi \times 0.5^2 \times 10 \times T \times 60}{Y}$$

โดย V คือ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิลิตร)

Y คือ ระยะเวลาเฉลี่ยของฟองแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านความสูง 10 เซนติเมตร (นาที)

T คือ ระยะเวลาที่เก็บแก๊สตัวอย่าง (นาที)

**ตารางที่ ข1** การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ถุงเก็บแก๊ส	ระยะเวลาเฉลี่ย (วินาที)	ปริมาตรผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิลิตร)
1	9.20	$471 / 9.20 \times 5 = 256.13$
2	8.81	$471 / 8.81 \times 5 = 267.45$
3	9.74	$471 / 9.74 \times 5 = 241.84$
4	9.04	$471 / 9.04 \times 5 = 260.72$
5	9.07	$471 / 9.07 \times 5 = 259.74$
6	9.42	$471 / 9.42 \times 5 = 250.22$

2. การคำนวณร้อยละความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ร้อยละความเข้มข้นโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส สามารถคำนวณได้จากผลการวิเคราะห์ GC ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ GC ของแก๊สมาตรฐานร้อยละ 1 โดยปริมาตรดังที่แสดงในตารางที่ ข2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สถุงที่ 1 ได้แสดงดังตารางที่ ข3

**ตารางที่ ข2** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานด้วยเทคนิค GC

องค์ประกอบ	พื้นที่	ร้อยละความเข้มข้น
ไฮโดรเจน	24752.3	1
คาร์บอนมอนอกไซด์	1325.9	1
มีเทน	4765.5	1
คาร์บอนไดออกไซด์	1502.3	1

**ตารางที่ ข3** การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส

องค์ประกอบ	พื้นที่	ร้อยละความเข้มข้นเทียบกับ แก๊สมาตรฐาน (โดยปริมาตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
ไฮโดรเจน	116569.8	$116569.8/24752.3 = 4.71$	$4.71 \times 256.13 / 100 = 12.06$
คาร์บอนมอนอกไซด์	6372.2	$6372.2/1325.9 = 4.81$	$4.81 \times 256.13 / 100 = 12.31$
มีเทน	9306.2	$9306.2/4765.5 = 1.95$	$1.95 \times 256.13 / 100 = 5.00$
คาร์บอนไดออกไซด์	1694.5	$1694.5/1502.3 = 1.13$	$1.13 \times 256.13 / 100 = 2.89$

3. การคำนวณความเข้มข้นรวมขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส

**ตารางที่ ข4** การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส

องค์ประกอบ	ปริมาตรรวมทุกถุง (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น (ร้อยละโดยปริมาตร)
ไฮโดรเจน	33.41	$33.41 / 80.45 \times 100 = 41.53$
คาร์บอนมอนอกไซด์	18.04	$18.04 / 80.45 \times 100 = 22.42$
มีเทน	7.39	$7.39 / 80.45 \times 100 = 9.19$
คาร์บอนไดออกไซด์	21.62	$21.62 / 80.45 \times 100 = 26.87$
รวม	80.45	100

4. การคำนวณหาผลได้ขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ปริมาณผลได้ขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์แก๊ส สามารถคำนวณได้จากจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์แก๊สหารด้วยน้ำหนักของไบอ้อยที่หักปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้าออก ภายใต้สมมติฐานของแก๊สอุดมคติ ดังสมการ

$$PV = nRT$$

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

ผลการคำนวณผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่ 1 ที่ได้รับการทดลองแกซีพีเคชัน ด้วยไอน้ำของไบอ้อยด้วย Ca5Li แสดงดังตารางที่ ข5

ตารางที่ ข5 การคำนวณผลได้ขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่ 1

องค์ประกอบ	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	จำนวนโมล (มิลลิโมล)	จำนวนโมลต่อกรัมไบอ้อย (มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย)
ไฮโดรเจน	12.06	$(1 \times 12.06)/(0.082057 \times 298) = 0.49$	$0.49/(0.217 \times 0.824) = 2.75$
คาร์บอนมอนอกไซด์	12.31	$(1 \times 12.31)/(0.082057 \times 298) = 0.50$	$0.50/(0.217 \times 0.824) = 2.81$
มีเทน	5.00	$(1 \times 5.00)/(0.082057 \times 298) = 0.20$	$0.20/(0.217 \times 0.824) = 1.14$
คาร์บอนไดออกไซด์	2.89	$(1 \times 2.89)/(0.082057 \times 298) = 0.12$	$0.12/(0.217 \times 0.824) = 0.66$
รวม	32.26	1.32	7.36

## 5. การคำนวณผลได้รวมขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ตารางที่ ข6 การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊ส

องค์ประกอบ	จำนวนโมลรวมทุกฤง (มิลลิโมล)	จำนวนโมลต่อกรัมไบอ้อย (มิลลิโมลต่อกรัมไบอ้อย)
ไฮโดรเจน	1.37	$1.37 / (0.217 \times 0.824) = 7.63$
คาร์บอนมอนอกไซด์	0.74	$0.74 / (0.217 \times 0.824) = 4.12$
มีเทน	0.30	$0.30 / (0.217 \times 0.824) = 1.69$
คาร์บอนไดออกไซด์	0.88	$0.88 / (0.217 \times 0.824) = 4.93$
รวม	3.29	18.37



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวเพชร ชุณะเกียรติ
วัน เดือน ปี เกิด	11 มิถุนายน 2538
สถานที่เกิด	พัทลุง
วุฒิการศึกษา	ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	17/1 ถนนคูหาสวรรค์ ตำบลคูหาสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดพัทลุง
ผลงานตีพิมพ์	Chunakiat, P., & Kuchonthara, P. [2020]. Hydrogen production from steam gasification of sugarcane leaves using CaO-Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> . In The 29th TIChE Conference (TIChE2020) "Bio-economy for sustainable future" [pp. 153-158]. Bangkok: Chulalongkorn University.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**