

ไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลและพลาสติกด้วยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบน Ni/Ca-MOF



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROGEN FROM GLYCEROL AND PLASTICS BY SORPTION-ENHANCED STEAM  
REFORMING OVER Ni/Ca-MOF



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 2022  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลและพลาสติกด้วยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบน Ni/Ca-MOF
โดย	น.ส.จิรัชมา เก้าเอี้ยน
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

จรัชฌา เก้าเอี้ยน : ไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลและพลาสติกด้วยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบน Ni/Ca-MOF. ( HYDROGEN FROM GLYCEROL AND PLASTICS BY SORPTION-ENHANCED STEAM REFORMING OVER Ni/Ca-MOF) อ.  
ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ซึ่งการทดลองถูกดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น โดยศึกษาผลของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยเปรียบเทียบการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ, ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ และไม่ใช้ตัวดูดซับ จากผลการทดลองพบว่า การใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ ส่งผลให้อัตราการเกิดและผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้การศึกษาค้นคว้าผลของการใช้พลาสติกที่แตกต่างกันสามชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน ที่ใช้เป็นสารป้อนร่วมกับกลีเซอรอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ พบว่าการผลิตไฮโดรเจนจากพอลิเอทิลีนร่วมกับ กลีเซอรอล ให้อัตราการเกิดและผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็นพอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีนตามลำดับ นอกจากนี้ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ พบว่า อัตราการเกิดของไฮโดรเจนและผลได้ไฮโดรเจนมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 46.76 โดยโมล และ 22.91 มิลลิโมลต่อกรัม แต่อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ให้ผลได้และอัตราการเกิดของไฮโดรเจนมีคาลดลง เนื่องจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6370054423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Hydrogen production Sorption-enhanced steam reforming Two-stage fixed bed reactor

Jiratcha Kao-ian : HYDROGEN FROM GLYCEROL AND PLASTICS BY SORPTION-ENHANCED STEAM REFORMING OVER Ni/Ca-MOF. Advisor: Assoc. Prof. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D.

This work aimed to study the hydrogen production from sorption-enhanced steam reforming over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaMOF. Experiments were carried out using a two-stage fixed-bed reactor. The effect of CaMOF sorbents on hydrogen production by adsorption-enhanced steam reforming was compared with CaMOF sorbent, calcium oxide sorbent, and without sorbent. The result indicated that CaMOF sorbent significantly increased the composition and yield of hydrogen. Moreover, the effects of using three different plastics: polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polystyrene (PS) used as co-feed with glycerol by Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaMOF catalyst showed that the hydrogen production of glycerol with PE gave the highest composition and yield of hydrogen followed by polypropylene and polystyrene respectively. Furthermore, the effect of pyrolysis temperature at 600 and 700 °C using Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaMOF catalyst found that hydrogen composition and hydrogen yield were increased up to 46.76 and 22.91 mmol/g. On the other hand, the effect of steam reforming temperatures at 700 and 800 °C was studied by using Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaMOF catalyst. It was found that gas composition and hydrogen yield were decreased because of the sintering of catalysts.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

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

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology; PETROMAT) สำหรับทุนการศึกษา และทุนสนับสนุนงานวิจัย

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

สุดท้ายนี้ขอแสดงความดีความชอบทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้แก่บุคคลดั่งที่กล่าวข้างต้น รวมถึงผู้มีพระคุณท่านอื่นที่ยังไม่ได้กล่าวนามมา ณ โอกาสนี้

จิรัชมา เก้าเอี้ยน

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
2.1. พลาสติก.....	1
2.2. ไบโอดีเซล.....	14
2.3. ก๊าซเซอรอล.....	16
2.4. ไฮโดรเจน.....	21
2.5. ไพโรไลซิส.....	26
2.6. รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ.....	29

2.7. ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ.....	33
2.8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	34
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง .....	38
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	38
3.2 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ	
40	
3.3 วิธีการทดลอง .....	41
3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	45
3.5 ตัวแปรที่ศึกษา.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	50
4.1 ผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ .....	51
4.2 ผลของการใช้ตัวดูดซับต่อผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส .....	55
4.3 ผลของชนิดพลาสติกต่อผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส .....	63
4.4 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส.....	69
4.5 ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส .....	72
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	75
5.1. สรุปผลการทดลอง.....	75



5.2. ข้อเสนอแนะ.....	77
บรรณานุกรม.....	79
ภาคผนวก ก.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	87



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปรภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ลูกบิลเลียด .....	2
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเบคเคอร์ไลต์ .....	3
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก .....	4
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเมลามีน .....	5
รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก .....	8
รูปที่ 2.6 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน .....	9
รูปที่ 2.7 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน .....	10
รูปที่ 2.8 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน .....	11
รูปที่ 2.9 วัฏจักรของไบโอดีเซล .....	15
รูปที่ 2.10 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริเฟเคชันในการผลิตไบโอดีเซล .....	16
รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล .....	17
รูปที่ 2.12 การใช้กลีเซอรอลในอุตสาหกรรมต่าง ๆ .....	19
รูปที่ 2.13 เส้นทางการเปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นสารเคมี .....	20
รูปที่ 2.14 ไอโซโทปที่เสถียรที่สุดของไฮโดรเจน .....	22
รูปที่ 2.15 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว .....	28
รูปที่ 3.1 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตดิ่งชนิดสองชั้น .....	40
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตดิ่งชนิดสองชั้น .....	41
รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี .....	45
รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี .....	46
รูปที่ 3.5 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟลกชันสเปกโตรสโคปี .....	47
รูปที่ 3.6 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสปี .....	48

รูปที่ 3.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิว.....	48
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟด้วยเทคนิค FT-IR.....	51
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หาวัฏภาคองค์ประกอบของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟด้วยเทคนิค XRD.....	52
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของแคลเซียมมอฟ (ก), (ข) และตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียม-มอฟ (ค), (ง) ด้วยเทคนิค SEM.....	53
รูปที่ 4.4 ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้พลาสติกที่แตกต่างกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ.....	56
รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้พลาสติกที่แตกต่างกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ.....	57
รูปที่ 4.6 ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนที่แตกต่างกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ.....	59
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนที่แตกต่างกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ.....	59
รูปที่ 4.8 ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยตัวดูดซับที่แตกต่างกันและไม่ใช้ตัวดูดซับในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ.....	60
รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยตัวดูดซับที่แตกต่างกันและไม่ใช้ตัวดูดซับในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ.....	61
รูปที่ 4.10 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟก่อนการใช้งาน.....	62
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์หาวัฏภาคองค์ประกอบของแคลเซียมมอฟหลังการใช้งานด้วยเทคนิค XRD.....	62
รูปที่ 4.12 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟหลังการใช้งาน.....	63
รูปที่ 4.13 ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	64
รูปที่ 4.14 องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	65

- รูปที่ 4.15** ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกัน  
ในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียม  
มอฟ..... 66
- รูปที่ 4.16** องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่าง  
ชนิดกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-  
แคลเซียมมอฟ..... 68
- รูปที่ 4.17** ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอ  
ทิลีนในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ต่างกัน  
และอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส..... 70
- รูปที่ 4.18** องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิด  
พอลิเอทิลีนในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่  
แตกต่างกัน และอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส..... 71
- รูปที่ 4.19** ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอ  
ทิลีน ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยใช้อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ต่างกัน  
และอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส ..... 73
- รูปที่ 4.20** องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิด  
พอลิเอทิลีน ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยใช้อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่  
แตกต่างกัน และอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส ..... 74

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ประเภทของพลาสติกกรีโซเคิล .....	13
ตารางที่ 2.2	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล .....	18
ตารางที่ 2.3	สมบัติทั่วไปของไฮโดรเจน .....	23
ตารางที่ 3.1	ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สตัวอย่าง .....	46
ตารางที่ 4.1	พื้นที่ผิวของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟ .....	54
ตารางที่ ก.1	การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์ .....	85
ตารางที่ ก.2	ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานด้วยเทคนิค GC .....	85
ตารางที่ ก.3	การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์ .....	86
ตารางที่ ก.4	การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์ .....	86
ตารางที่ ก.5	การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์ .....	86

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันมีความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานจากถ่านหิน แก๊สธรรมชาติและน้ำมันหมดไปในอนาคต ซึ่งพลังงานดังกล่าว นอกจากจะเป็นพลังงานสิ้นเปลืองแล้วยังก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ส่งผลกระทบต่อ การทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) ด้วยเหตุนี้พลังงานทางเลือกอย่างไฮโดรเจนจึง จัดเป็นพลังงานที่มีความน่าสนใจ เพราะไฮโดรเจนสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบธรรมชาติ หลากหลายประเภท อีกทั้งยังให้ค่าพลังงานเชื้อเพลิงที่สูงกว่าค่าพลังงานชนิดอื่นโดยไม่ก่อให้เกิด กลุ่มควันฝุ่นละอองและสามารถประยุกต์ใช้กับงานที่ใช้พลังงานดั้งเดิมได้ รวมไปถึงการนำไปผลิต กระแสไฟฟ้าโดยป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ได้อีกด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังถือเป็น พลังงานเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงทำการผลิตไฮโดรเจนโดยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ (Sorption-enhanced steam reforming) โดยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ คือ กระบวนการ ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อผลิต ไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงและได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการ ขนส่งหรือจัดเก็บทางธรณีวิทยา (หรืออาจนำกลับมาใช้ใหม่) ด้วยเหตุนี้การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่ เสริมด้วยการดูดซับจึงสามารถนำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจนในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ไบโอดีเซลก็ ถือเป็นพลังงานที่น่าสนใจอีกชนิดหนึ่ง เนื่องจากเป็นพลังงานทางเลือกที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ เช่น ปาล์ม น้ำมัน น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือสาหร่าย โดยผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งในการผลิตไบโอดีเซลจะมีผลพลอยได้อย่าง กลีเซอรอล ( $C_3H_8O_3$ ) จำนวนมาก และกลีเซอรอลที่ได้มาจากการผลิตพลังงานไบโอดีเซลไม่ค่อย นำมาใช้ประโยชน์ จึงทำให้กลีเซอรอลมีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิต ไฮโดรเจนเพื่อเป็นการลดปริมาณกลีเซอรอลที่ได้มาจากอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล ยิ่งไป กว่านั้นในทุก ๆ ปีจะมีการทิ้งพลาสติกเป็นขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม มากมาย เช่น มลพิษต่อน้ำ มลพิษต่อดิน เป็นต้น ซึ่งการกำจัดขยะพลาสติกเหล่านี้มักใช้วิธีการ เผาหรือการฝังกลบ ส่งผลให้เกิดมลพิษต่ออากาศ โดยขยะพลาสติกเหล่านี้เป็นพอลิเมอร์ที่มี ไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก จึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจน

เพื่อเพิ่มมูลค่าของขยะพลาสติกและทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำอีกด้วย จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำกลีเซอรอลและขยะพลาสติกเหล่านี้มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนผ่านการรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1] ระบุว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีนิกเกิล (Ni) เป็นองค์ประกอบร่วมกับตัวดูดซับที่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบในการรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับ จะทำให้กลีเซอรอลเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนลดลง โดยการใช้ตัวดูดซับจะทำให้ได้ผลผลิตของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงและได้ไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีความบริสุทธิ์มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีอีกงานวิจัย [2] ระบุว่าตัวดูดซับ Ca-MOF มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่มีความเสถียรสูง ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 52 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 10 ครั้ง โดยที่ยังมีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์พบว่าความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์จะลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากมีการนำมาใช้ซ้ำหลายครั้ง จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaMOF ในการผลิตไฮโดรเจนผ่านรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับเพื่อให้ได้ผลผลิตไฮโดรเจนที่สูงขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนด้วยรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยใช้กลีเซอรอลและพลาสติกเป็นสารป้อน และ Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaMOF เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ
- 1.2.2 ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อผลได้ของไฮโดรเจนด้วยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาชนิดของพลาสติกและผลของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaMOF ที่มีต่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ จากการใช้สารป้อนร่วมของวัสดุเหลือทิ้งขยะพลาสติกและกลีเซอรอล และศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิงต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แนวทางในการผลิตไฮโดรเจนที่มีผลได้และความเข้มข้นสูงจากการใช้สารป้อนร่วมของวัสดุเหลือทิ้ง ขยะพลาสติก และกลีเซอรอล ด้วยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ

## 1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี งานวิจัย และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนด้วยรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับและตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

1.5.2 จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และเตรียมเครื่องมือที่ต้องใช้ในการวิจัย

1.5.3 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ (Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaMOF)

1.5.3.1 สังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ (Ca-MOF) ด้วยวิธีการโซลโวลเทอรัมอล

1.5.3.2 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา (Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน

(Impregnation) โดยซังแกมมา-อลูมินา ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 10 กรัม ผสมกับสารละลายนิกเกิลไนเตรดที่เตรียมจากนิกเกิลไนเตรด-6-ไฮเดรต (Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) 4.95 กรัม ที่ผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตรแล้วทำการปั่นกวน และระเหยที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.5.3.3 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับนิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ (Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaMOF) ด้วยวิธีการผสมทางกายภาพ (Physical mixing) โดยใช้นิกเกิล/อลูมินาและแคลเซียมมอฟที่สังเคราะห์มา

1.5.4 วิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ (Ca-MOF)

1.5.4.1 วิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

1.5.4.2 วิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน (BET)

1.5.4.3 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



- 1.5.4.4 วิเคราะห์หาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุล ด้วยเครื่องวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (FT-IR)
- 1.5.5 เตรียมสารละลายกลีเซอรอลมีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร
- 1.5.5.1 ผสมกลีเซอรอลที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่มีความเข้มข้น 99.5 ร้อยละโดยปริมาตร และน้ำในอัตราส่วนเป็น 1:4
- 1.5.5.2 ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที ให้สารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน
- 1.5.6 ศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น โดยใช้พลาสติก 0.2 กรัม และสารละลายกลีเซอรอลที่เตรียมไว้เป็นสารป้อนร่วมที่ใช้ในการป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ โดยสารละลายกลีเซอรอลจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ปั๊ม (HPLC pump) ที่มีอัตราการไหล 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที ในส่วนแรกจะเป็นขั้นตอนการเกิดโฟโรไลซิสของพลาสติกและกลีเซอรอล ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารระเหยและซาร์ จากนั้นสารระเหยที่เกิดขึ้นจะถูกแก๊สอาร์กอน (Ar) ซึ่งเป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) ที่มีอัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที พาเข้าสู่ส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นขั้นตอนการเกิดรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ที่มีอัตราการไหลของน้ำ 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ 0.4 กรัมรองรับอยู่ จากนั้นไอรระเหยจะถูกทำให้เย็นลงเพื่อกำจัดน้ำและน้ำที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ แล้วผ่านซิลิกาเจลเพื่อลดความชื้นก่อนเก็บแก๊สด้วยถุงเก็บแก๊ส โดยจะวัดปริมาณแก๊สด้วยการวัดอัตราการไหลแบบฟองอากาศ (Bubble flow meter) ถุงละ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) เพื่อคำนวณหาผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์
- 1.5.7 ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ
- 1.5.7.1 เปรียบเทียบเมื่อใช้ตัวดูดซับและไม่ใช้ตัวดูดซับในการผลิตไฮโดรเจนด้วยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ

- 1.5.7.2 ชนิดของพลาสติก ได้แก่ โพลีเอทิลีน (PE), โพลีโพรพิลีน (PP) และโพลิสไตรีน (PS)
- 1.5.7.3 อุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส
- 1.5.7.4 อุณหภูมิในการรีฟอร์มมิงที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส
- 1.5.8 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1. พลาสติก

พลาสติกเป็นวัสดุที่มนุษย์คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นเพื่อช่วยให้เรามีชีวิตที่สะดวกสบายยิ่งขึ้น ในอดีตเราไม่เคยรู้จักพลาสติกเลยจนกระทั่งกลางศตวรรษที่ 19 วัสดุดั้งเดิมที่มนุษย์ค้นพบและใช้อยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวันในยุคก่อนหน้านี้นั้นล้วนเป็นวัสดุจากธรรมชาติทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็น แก้ว ไม้ กระดาษ โลหะ ยาง หรือ ขนสัตว์ สิ่งเหล่านี้เคยเป็นวัสดุที่ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามมนุษย์ยังคงพยายามค้นหาวัสดุใหม่ ๆ มาใช้งานอยู่เสมอ

##### 2.1.1. ประวัติของพลาสติก

พลาสติกทั่วไปที่เราคุ้นเคยและใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยฝีมือมนุษย์ในช่วงร้อยกว่าปีที่ผ่านมาสำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์ของใช้ และเครื่องมือต่าง ๆ ปี ค.ศ. 1863 บริษัทผลิตลูกบิลเลียดในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ประกาศให้รางวัล 10,000 เหรียญแก่ผู้ที่สามารถหาวัสดุทดแทนงาช้างเพื่อใช้ในการทำลูกบิลเลียด ซึ่งเป็นกีฬาที่ได้รับความนิยมสูงในขณะนั้น จึงเป็นเหตุให้ช่างป่าในแถบแอฟริกาจำนวนมากถูกล่าเพื่อเอางาจนเกือบสูญพันธุ์ นายจอห์น เวสลีย์ ไฮเอตต์ (John Wesley Hyatt) ช่างไม้ชาวอเมริกาก็เป็นบุคคลหนึ่งที่สนใจและพยายามค้นหาวัสดุที่สามารถนำมาใช้แทนงาช้าง หลังจากทำการทดลองอยู่หลายปี คืบหน้าเขาได้รับอุบัติเหตุจากของมีคมบาดมือขณะทำการผสมขี้ผึ้งกับกาว เขาจึงใส่แผลด้วยคอลอเดียน (Colodion) ยาสมานแผลซึ่งทำจากไนโตรเซลลูโลสละลายอยู่ในอีเทอร์และแอลกอฮอล์ และด้วยความบังเอิญเขาได้ทำยาทาลงบนพื้นโต๊ะ เมื่อกลับมาดูอีกครั้งพบว่า ยาแห้งเป็นแผ่นเหนียว ๆ ต่อมา นายไฮเอตต์ทำการทดลองต่อจนพบว่าหากเติมการบурลงไปในของผสมอีเทอร์จะได้วัสดุที่เรียกว่า เซลลูลอยด์ (Celluloid) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมในการนำมาทำเป็นลูกบิลเลียด และผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เนื่องจากมีสมบัติทนทานต่อน้ำมัน น้ำและกรด ไส หรือทำให้มีสีสนสวยงามได้ง่าย และมีราคาถูก นิยมนำมาทำเป็นลูกบิลเลียด และคีย์เปียโนแทนงาช้างหรือทำหวีแทนกระดูกสัตว์ นอกจากนี้ยังนิยมนำมาทำเป็นเครื่องประดับ ปกเสื้อ กระดุม ของเล่นเด็ก และฟิล์มภาพยนตร์และถ่ายภาพ จึงถือว่าเซลลูลอยด์เป็นพลาสติกที่สังเคราะห์ชนิดแรกของโลกที่เกิดจากการปรับปรุงโครงสร้างของเซลลูโลสซึ่งเป็นวัสดุจาก

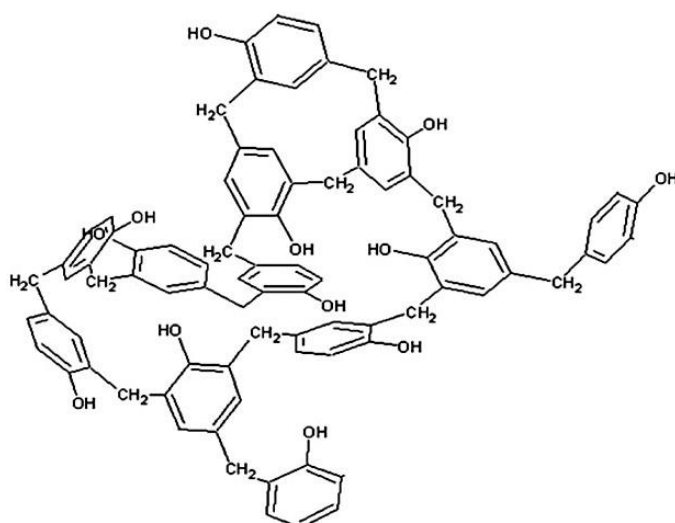
ธรรมชาติ และนับเป็นจุดเริ่มต้นของอุตสาหกรรมพลาสติก แต่เนื่องจากเซลลูลอยส์ เป็นพลาสติกที่ติดไฟง่ายและระเบิดได้หากมีปริมาณหมู่ไนโตร (NO<sub>2</sub>) สูง จึงไม่เป็นที่นิยมในเวลาต่อมา ทำให้วัสดุที่ทำจากเซลลูลอยส์หาได้ไม่มากนักในปัจจุบัน แต่ยังคงนิยมนำมาทำเป็นลูกปิงปอง เซลลูลอยส์ที่ยังมีให้เห็นกันอยู่ส่วนใหญ่จะเป็นของเก่า ซึ่งเป็นที่ต้องการของนักสะสม [3]



รูปที่ 2.1 ลูกบิลเลียด [4]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1907 นายลีโอ เบคแลนด์ (Leo Baekeland) ได้ค้นพบวิธีการผลิตเบคเคอไลต์ (Bekelite) ซึ่งได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกสังเคราะห์ชนิดแรกของโลกขึ้นเป็นครั้งแรกจากสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์และฟีนอล เบคเคอไลต์ เป็นพลาสติกแข็ง ทนความร้อนได้ดี และสามารถขึ้นรูปให้มีรูปร่างต่าง ๆ ได้ตามแม่พิมพ์โดยใช้ความร้อน ทำให้มีสีสันทนสวยงามได้และมีราคาไม่แพง ในช่วงแรกเบคเคอไลต์ถูกนำมาทำเป็นฉนวนเคลือบสายไฟและชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ต่อมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในครัวเรือน ของใช้ และเครื่องประดับต่าง ๆ มากมายที่มีสีสันทนสวยงาม และราคาไม่แพง และกลายเป็นวัสดุที่ได้ชื่อว่าคุณนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ นับพันอย่าง "The material of a thousand uses"

ในช่วงทศวรรษที่ 30-40 จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1942 เบคเคอไลต์ถูกนำมาผลิตเป็นโทรศัพท์ แวนตาสำหรับนักบิน และด้ามอาวุธต่าง ๆ จากผลิตภัณฑ์ที่มีสีสันทนต่าง ๆ ที่เคยมีมากมายกลับ กลายเป็นสีดำ จนกระทั่งสงครามสิ้นสุดลง เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection mold) ได้ถูกพัฒนาขึ้น ทำให้เกิดพลาสติกชนิดใหม่ ๆ จากการค้นคว้าวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ เช่น ไนลอน (Nylon) ไวนิล (Vinyl) หรืออะคริลิก (Acrylic) จึงมีการใช้เบคเคอไลต์น้อยลงอย่างมาก อย่างไรก็ตามปัจจุบันยังคงมีการใช้เบคเคอไลต์เป็นสารเคลือบผิว และผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีคุณภาพและทนทานต่อความร้อนเป็นพิเศษ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเบคเคอร์ไลต์ [5]

### 2.1.2. ประเภทของพลาสติก

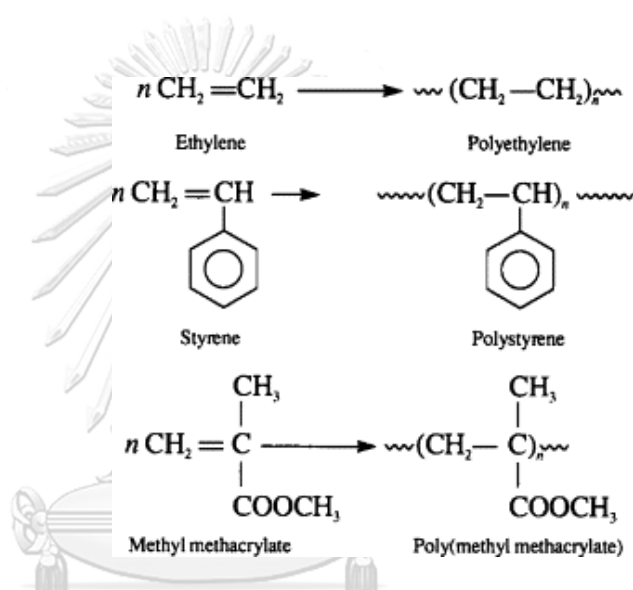
พลาสติกถูกแบ่งตามประเภทการใช้งานได้ 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset) [6]

#### 1) เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics)

เทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ (Polymer) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรงหรือแบบกิ่งสั้น ๆ โครงสร้างภายในโมเลกุลยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะทุติยภูมิ สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เช่น โทลูอิน (Toluene) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride) เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้ และเมื่อเย็นจะแข็งตัว สามารถนำกลับมาหลอมและทำให้แข็งตัวได้หลายครั้ง โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพเปลี่ยนไป สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยได้ 2 กลุ่ม คือ เทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastics) และ เทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Partial crystalline thermoplastics)

เทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน เป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแข็งและเปราะ เช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride) พอลิคาร์บอนเนต (Polycarbonate) เป็นต้น

เทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบ ทำให้เรียงตัวได้ดี จึงมีความเป็นผลึก ส่วนที่เป็นอสัณฐาน ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเหนียวและยืดหยุ่น เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) พอลิเอไมด์ (Polyamide) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาลเลต (Polyethylene terephthalate) เป็นต้น ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดนี้มีข้อเสียและข้อจำกัดของการใช้งาน คือ ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะอาจเกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปทรงได้ง่าย

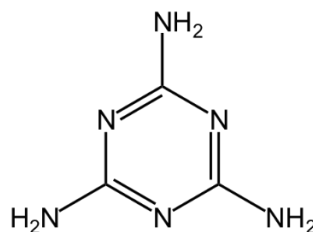


รูปที่ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก [7]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2) เทอร์โมเซต (Thermoset)

พลาสติกเทอร์โมเซต (Thermoset plastic) หมายถึงพลาสติกที่คงรูปหลังการผ่านความร้อน หรือแรงดันเพียงครั้งเดียวเมื่อเย็นลงจะแข็งมาก ทนความร้อนและความดัน ไม่อ่อนตัวและไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงจะแตกและไหม้เป็นขี้เถ้า สีดำ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของโครงสร้างในสายโซ่โมเลกุล โดยมีการสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล โดยพลาสติกประเภทนี้จะมีโครงสร้างโมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห จับกันแน่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมากจึงไม่สามารถนำมาหลอมเหลวได้ ตัวอย่างเช่น เมลามีน พอลิยูรีเทน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเมลามีน [6]

### 2.1.3.ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ [8]

การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์จะทำให้เกิดผลผลิตที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์แต่ละโมเลกุลมาเชื่อมต่อกัน ถ้ามอนอเมอร์สองมอนอเมอร์มาเชื่อมต่อกัน เรียกว่า ไดเมอร์ และเมื่อไดเมอร์เชื่อมต่อกับมอนอเมอร์อีกหนึ่งโมเลกุล เรียกว่า ไตรเมอร์ โดยปกติแล้วไดเมอร์จะมีโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรง ส่วนไตรเมอร์ (trimer) เทตระเมอร์ (tetramer) และเพนตะเมอร์ (pentamer) จะสามารถมีโครงสร้างเป็นไปได้ทั้งแบบเส้นตรง (linear) และแบบวงแหวน (cyclic)

พอลิเมอร์ (Polymer) หมายถึง การที่มอนอเมอร์หลาย ๆ หน่วยมาเชื่อมต่อซ้ำ ๆ กันจนเกิดเป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลสูง ซึ่งจะเรียกสายโซ่โมเลกุลยาว ๆ นี้ว่า พอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามการให้นิยามพอลิเมอร์มักจะพิจารณาจากน้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างของพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์มวลโมเลกุลต่ำ (Low polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลตั้งแต่ 10,000-20,000 g/mol ส่วนพอลิเมอร์มวลโมเลกุลสูง (High polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลเริ่มตั้งแต่ 20,000 g/mol เป็นต้นไป

ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ เรียกว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) คือกระบวนการสร้างสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ จากสารที่มีโมเลกุลเล็ก (Monomer) ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะเกิดภายใต้สภาวะต่าง ๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น ทำให้เกิดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ขึ้นมากมาย ทั้งที่เป็นพอลิเมอร์ในธรรมชาติ และพอลิเมอร์สังเคราะห์

การแบ่งประเภทของพอลิเมอร์ตามชนิดของปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ มีปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ

1) ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติม (Addition polymerization)

ปฏิกิริยานี้เกิดกับมอนอเมอร์ที่ไม่อ้อมตัว เช่น เอทิลีน โพรพิลีน อะไครล-โลไนทริล สไตรีน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิที่เหมาะสมทำให้พันธะคู่แตกออก แล้วเกิดการสร้างพันธะกับโมเลกุลข้างเคียงต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น สายพอลิเมอร์ยาวขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งมอนอ-เมอร์หมดไป ปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดปฏิกิริยาที่พันธะคู่ของคาร์บอน ไม่มีการสูญเสียของอะตอมใด ๆ ทำให้ไม่มีผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ข้างเคียงเกิดขึ้น ตัวอย่าง พอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาชนิดนี้ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene), เทฟลอน (Teflon), พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride)

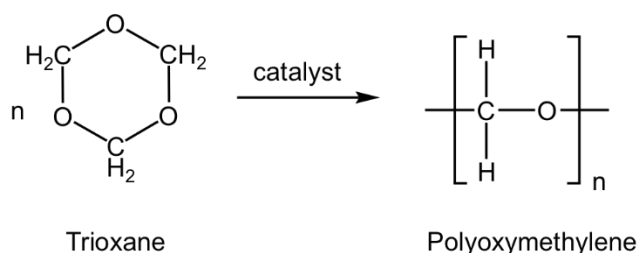
2) ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization)

ปฏิกิริยานี้เกิดกับมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ อยู่ด้านซ้ายและขวาของมอนอเมอร์ เพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาควบแน่นกับโมเลกุลข้างเคียงได้ทั้งสองด้าน และต่อขยายความยาวสายโมเลกุลออกไป โดยในปฏิกิริยาจะกำจัดโมเลกุลขนาดเล็กออกมาจากปฏิกิริยา เช่น  $H_2O$   $NH_3$   $HCl$  หรือ  $CH_3OH$  เป็นต้น ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาชนิดนี้ได้แก่ พอลิเอสเทอร์ (Polyester), พอลิยูรีเทน (Polyurethane), พอลิเอไมด์ (Polyamide)

3) การเกิดพอลิเมอร์แบบเปิดวง (Ring-opening polymerization)

เป็นการเกิดพอลิเมอร์ที่มีการเปิดวงของมอนอเมอร์ ซึ่งการเปิดวงจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลสูง ตัวอย่างการสังเคราะห์พอลิฟอร์มมาลดีไฮด์ โดยการเกิดปฏิกิริยาของไตรออกเซน (Trioxane) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย สำหรับการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์โดยการเกิดพอลิเมอร์แบบเปิดวงของอีพอกไซด์ (Epoxides) แสดงดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ [9]



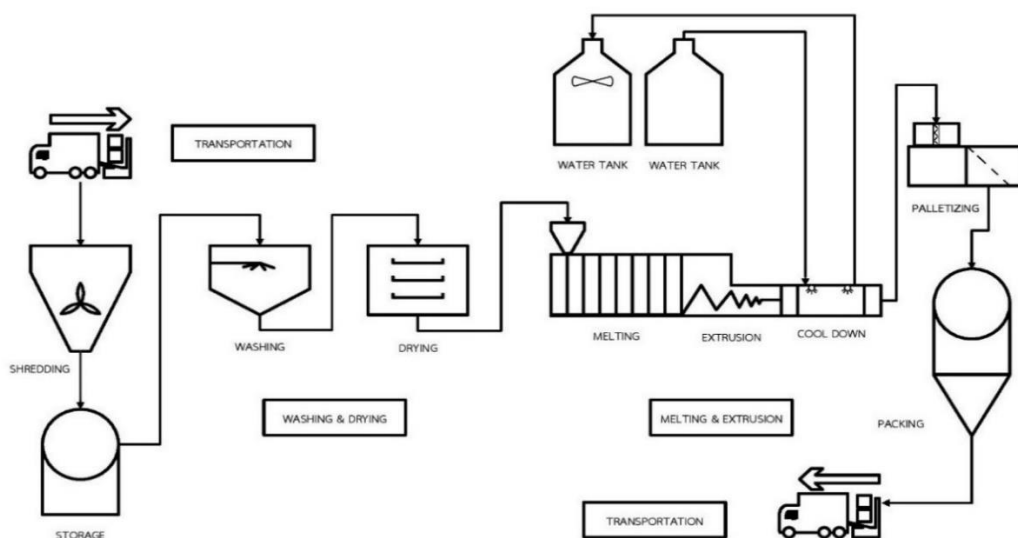


#### 2.1.4. กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก

พลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติใต้ผิวดิน เมื่อมีการขุดน้ำมันดิบจากแท่นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะนำน้ำมันดิบมากลั่นลำดับส่วน และแยกผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยทำการส่งน้ำมันดิบเข้าไปในเตาเผา จากนั้นน้ำมันดิบจะกลายเป็นไอเข้าไปในหอกลั่นและควบแน่นจนได้สารต่าง ๆ โดยส่วนที่เบาสุดจะเป็นแก๊สหุงต้ม ส่วนที่หนักขึ้นมักจะนำไปผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเครื่องบิน และน้ำมันก๊าด และส่วนที่หนักที่สุดจะกลายเป็นของแข็งอย่างน้ำมันเตาและยางมะตอย

การกลั่นน้ำมันดิบจะมีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสายยาวเกินการใช้งานจำนวนมาก จึงได้มีการนำมาผ่านกระบวนการทำให้ความยาวสายสั้นลง จนได้สารประกอบที่เล็กลง เรียกว่า ก๊าซเอทิลีนและโพรพิลีน ซึ่งเป็นส่วนที่นำไปผลิตเป็นเม็ดพลาสติก โดยขั้นตอนการผลิตทำได้โดยการนำสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้เข้าไปในหม้อปฏิกริยา และเติมสารเคมีเข้าไป จากนั้นจะก่อปฏิกริยาจนกลายเป็นสสารที่มีลักษณะคล้ายแป้งฝุ่น เมื่อผงพลาสติกแห้งสนิท และมั่นใจว่าไม่มีความชื้นจะถูกหลอมมาเป็นเม็ดพลาสติกเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

เม็ดพลาสติกจะถูกแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ และมีคุณสมบัติตามสารเคมีตั้งต้นที่ใส่ลงไปในการปฏิกริยา โดยในประเทศไทยมีพลาสติกที่ใช้งานทั้งหมด 6 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ โพลีเอทิลีน (PE), โพลีโพรพิลีน (PP), โพลีสไตรีน (PS), โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC), ABS/SAN,AS และเม็ดพลาสติกที่นำมาใช้งานเฉพาะด้านที่เกรดสูงและทนทาน [10]



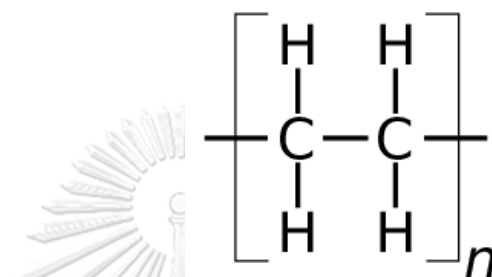
รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก [11]

#### 2.1.5. ชนิดของพลาสติก

##### 1) พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติสำคัญ คือ ทนทานต่อทุกสภาวะอากาศและสารเคมีหลายชนิด จึงนิยมนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร, ฟิล์มยืด, ฟิล์มหัด, และใช้งานที่เกี่ยวข้องกับอาหารมากมาย มีความยืดหยุ่นที่ดี และเมื่ออยู่ในอุณหภูมิต่ำจะมีความเหนียวสูง สามารถทำสีหรือปริ้นท์ตัวอักษรต่าง ๆ ลงไปได้ เพราะอากาศสามารถซึมผ่านได้ดี ใช้งานกับแม่พิมพ์ได้โดยไม่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องติดแม่พิมพ์ ทนทานต่อความร้อนได้พอประมาณและเป็นฉนวนกันไฟฟ้าได้ดี จึงไม่ทำให้ติดไฟง่ายจนเกินไป สามารถผลิตออกมาเป็นฟิล์มยืดเพื่อใช้ในครัวเรือนได้อย่างปลอดภัยทั้งแบบใสหรือแบบที่มีสีสันโดยที่สีจะไม่ซึมลงสู่อาหาร สามารถนำไปใช้ผลิตเป็นฟิล์มยืดพันพาเลทในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างดีเยี่ยม ทำให้ผู้ประกอบการไม่ต้องกังวลเรื่องสินค้าเสียหายจากการขนส่ง เพราะเนื้อฟิล์มมีความยืดหยุ่น ป้องกันการตกหล่นหรือกระแทกกันจนเสียหายได้ดีมาก อีกทั้งยังมีความทนทานแข็งแรง ไม่ละลายง่าย พวกที่มีความหนาแน่นต่ำจะใสมากแต่จะขุ่นเมื่อความหนาแน่นสูง ปกติจะไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียสจะเริ่มละลาย พอลิเอทิลีนได้ถูกจำแนกเป็นหลายชนิดตัวหลัก ๆ ที่ใช้กันมากคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low

density polyethylene; LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene; HDPE) ตัวอย่างการใช้งานของพอลิเอทิลีนในชีวิตประจำวัน เช่น ถังพลาสติก ขวด ชิ้นส่วนรถยนต์ เชือก แห อวน ฉนวนหุ้มสายไฟ ฝ้าใบบพลาสติก ส่วนมากขึ้นรูปด้วย การฉีด หรือเป่า



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน [12]

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE) เป็นเม็ดพลาสติกที่มีความหนาแน่นต่ำ เบาบาง จนสามารถที่จะทำออกมาเป็นแผ่นแล้วใช้งานได้ง่าย ฉีกขาดได้ แต่ก็มี ความทนทานในระดับหนึ่ง ทนต่อสารเคมีได้ดี มีความยืดหยุ่นในเนื้อพลาสติกสูงจนสามารถที่จะป้องกันการขาดหรือที่มทะเล่ได้ ทั้งที่มีความบางแต่ก็แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงได้ดี ราคาไม่สูงมากจนเกินไป สามารถใช้งานได้ทั้งภายในครัวเรือนและงานอุตสาหกรรม เพราะส่วนใหญ่จะถูกนำมาผลิตเป็นฟิล์มยืด, ฟิล์มหัด, ขวดน้ำ, ฝาขวดน้ำ และของเล่นรูปแบบต่าง ๆ ช่วงความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจะอยู่ที่ 0.91-0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene; HDPE) เป็นเม็ดพลาสติกที่มีความแข็งแรงและทนทานเพราะมีโมเลกุลภายในที่ยึดเกาะตัวกันและเชื่อมโยงกันอย่างหนาแน่น มีความทึบแสง ทนทานต่อสารทำลายต่าง ๆ จึงนิยมนำมาทำเป็นวัสดุ เช่น ถังน้ำมันรถ, ท่อส่งสารเคมี, ท่อส่งแก๊สธรรมชาติ, หนีบท่อที่มีความแข็งแรงสูง, ขวดน้ำยาหลากหลายชนิด, โตะหรือเก้าอี้พลาสติกที่ใช้ภายในครัวเรือน, งานหรือขามที่ทนความร้อนได้ดี เป็นต้น โดยความหนาแน่นของ HDPE จะอยู่ในช่วง 0.95-0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

## 2) พอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ โดยมีความหนาแน่น 0.90-0.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความแข็งและเหนียว คงรูปดี มีจุดหลอมเหลว 160-170 องศาเซลเซียส ทนต่อการหักงอได้ปานกลาง ทนต่อความร้อนและสารเคมี มีความใสและโปร่งแสงมากกว่าพอลิเอทิลีน ป้องกันการผ่านของความร้อนได้ดีแต่ป้องกันการผ่านของอากาศได้ต่ำและไม่ทนต่อความเย็น พอลิโพรพิลีนมักนิยมนำมาผลิตเป็นเครื่องมือแพทย์, ภาชนะบรรจุอาหารที่สามารถเข้าเครื่องล้างจาน และเข้าไมโครเวฟได้, ขวดบรรจุสารเคมี และอะไหล่รถยนต์ เป็นต้น [13]

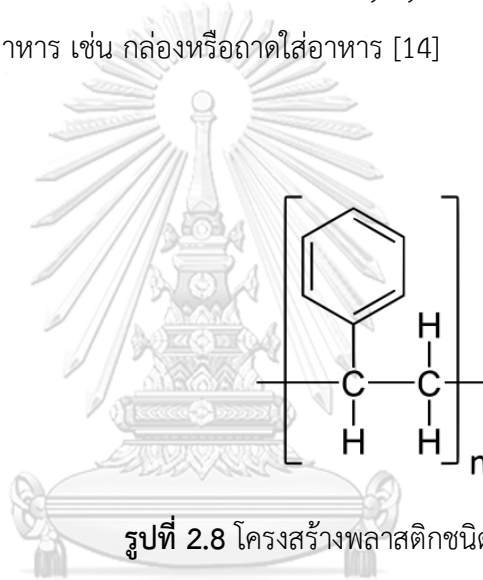


รูปที่ 2.7 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน [12]

## 3) พอลิสไตรีน

พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกที่ผลิตขึ้นมาจากสไตรีนมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปิโตรเลียม ถูกผลิตออกขายครั้งแรกในช่วงปี 1930-1939 ช่วงแรกสไตรีนที่ผลิตขึ้นมาถูกนำไปใช้ในสงครามโลกครั้งที่ 2 เป็นหลัก หลังจากสงครามจบลงจึงเปลี่ยนมาผลิตเป็นพลาสติกพอลิสไตรีนออกขายแทน ในการผลิตพอลิสไตรีนยังมีวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ใช้ร่วมด้วยได้แก่ เบนซีน เอทิลีน และบิวทาไดอีน มีคุณสมบัติ คือ มีลักษณะใสไม่มีสี แต่สามารถทำเป็นสีต่าง ๆ ได้ และยืดหยุ่นได้จำกัด

พอลิสไตรีนที่ใช้กันอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นชนิดที่เรียกว่า Expanded polystyrene (EPS) เป็นชนิดที่ได้จากการผสมพอลิสไตรีนร้อยละ 90-95 กับสารทำให้ขยายตัว (ที่ใช้กันมากคือเพนเทนหรือคาร์บอนไดออกไซด์) เมื่อก่อนใช้ ซีเอฟซี ซึ่งเป็นสารทำลายชั้นโอโซน) ร้อยละ 5-10 พลาสติกที่เป็นของแข็งถูกทำให้เป็นโฟมโดยการใช้ความร้อน (มักเป็นไอน้ำ) พอลิสไตรีนอีกชนิดหนึ่งคือ Extruded polystyrene (XPS) มีชื่อทางการค้าที่แพร่หลายคือ Styrofoam เป็นชนิดที่มีการเติมอากาศไว้ในช่องว่างตามเนื้อโฟมทำให้มีค่าการนำความร้อนต่ำ ใช้ในงานก่อสร้าง และใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในอาคาร และยังมีชนิดที่เป็นแผ่นเรียกว่า Polystyrene Paper Foam (PSP) ใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่องหรือถาดใส่อาหาร [14]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 2.1.6. การเปลี่ยนขยะพลาสติกเป็นพลังงาน

พลังงานทดแทนจากขยะจากการนำขยะพลาสติกที่สามารถนำกลับมาสู่กระบวนการรีไซเคิลได้ เช่น พลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) ขวดบรรจุน้ำดื่ม ขวดน้ำมันพืช และยางรถยนต์เหลือใช้ มาผ่านกระบวนการเปลี่ยนพลาสติกให้กลายเป็นน้ำมัน โดยใช้ระบบกลั่นน้ำมันแบบสุญญากาศไพโรไลซิส (Pyrolysis) เเผาผลาญแบบสุญญากาศในอุณหภูมิ 300 - 500 องศาเซลเซียส เป็นการเผาโดยให้ความร้อนกับขยะในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน เพื่อเปลี่ยนสถานะพลาสติกให้ระเหิดเป็นไอน้ำมันที่มีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันหล่อลื่นในโรงงานอุตสาหกรรมและก๊าซสังเคราะห์ และต่อจากนั้น จะต้องนำเข้าสู่โรงกลั่นน้ำมัน โดยกรองน้ำมันที่ได้จากขั้นตอนแรก เพื่อแยกประเภทเชื้อเพลิงเป็นน้ำมันดีเซลที่นำมาใช้สำหรับเครื่องยนต์ กระบวนการแปร

รูปดังกล่าวอาจจะเข้ามาช่วยลดปัญหาการกำจัดขยะพลาสติกด้วยการใช้แล้ว และไม่ได้นำไปใช้ซ้ำ เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และยังสามารถนำแปรรูปเป็นพลังงานได้อีก [15]

### 2.1.7. การรีไซเคิลพลาสติก

การรีไซเคิลพลาสติก คือกระบวนการแปรรูปขยะพลาสติกให้อยู่ในรูปแบบที่นำไปใช้งานต่อได้ โดยในบางครั้ง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุรีไซเคิลนั้นมีรูปแบบการใช้งานที่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์เดิมที่มีอยู่ เช่น การนำขวดพลาสติกมาหลอมและฉีดขึ้นรูปใหม่เป็นชุดโต๊ะและเก้าอี้ในกระบวนการรีไซเคิล

การรีไซเคิลพลาสติกสามารถทำได้โดยการแยกประเภทพลาสติกก่อน เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีลักษณะพิเศษคือ มีน้ำหนักและความซับซ้อนทางโครงสร้างโมเลกุลสูง ทำให้พลาสติกแต่ละชนิดไม่สามารถผสมเข้าด้วยกันได้เหมือนสารชนิดอื่น เช่น แก้วหรือโลหะ หลังจากผ่านกระบวนการแยกประเภทพลาสติกแล้ว ขยะพลาสติกจะถูกส่งเข้าโรงงานรีไซเคิล โดยกระบวนการรีไซเคิลนั้นสามารถแยกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ [16]

- 1) กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal depolymerization) โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการแปรรูปขยะพลาสติกกลับสู่รูปของน้ำมันปิโตรเลียมโดยใช้ความร้อน ซึ่งกระบวนการนี้มีข้อดีคือ สามารถรีไซเคิลพลาสติกทุกชนิดได้ แต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างระบบที่สูง
- 2) กระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน (Heat compression) โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการแปรรูปขยะให้กลับสู่สถานะวัตถุดิบตั้งต้นโดยเริ่มจากการทำความสะอาด, อบแห้ง, บด, หลอม และแปรรูปพลาสติกกลับสู่รูปแบบเม็ดพลาสติก ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแปรรูปได้เฉพาะพลาสติกที่ไม่ทนความร้อน (เช่น PET, PE และพลาสติกชนิดอื่น ๆ ที่หลอมตัวได้) กระบวนการนี้มีข้อเสียที่มีต้นทุนพลังงานที่ใช้ในกระบวนการที่สูง
- 3) กระบวนการอื่น ๆ กระบวนการนี้จะใช้กรรมวิธีอื่น ๆ ที่ไม่เข้าพวกกับ 2 วิธีแรก เช่น บดและอัดขยะพลาสติกให้กลายเป็นแผ่นปูทางเท้า หรือนำขยะพลาสติกมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น

ขยะพลาสติกที่สามารถนำไปรีไซเคิลและเข้าสู่กระบวนการผลิตกลับมาเป็นข้าวของเครื่องใช้ใหม่ได้ ถูกแบ่งเป็น 7 ประเภทด้วยกัน ดังนิตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทของพลาสติกรีไซเคิล [17]

สัญลักษณ์	ชนิดพลาสติก	คุณสมบัติ	ประโยชน์
	พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate; PETE)	พลาสติกพอลิเมอร์ใส เนื้อเหนียว มีความทนทานต่อแรงกระแทก และมีคุณสมบัติในการป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซได้ดี	นำมาใช้ในการผลิตขวดเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุแอลกอฮอล์ เช่น ขวดน้ำดื่มและขวดน้ำมันพืช
	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene; HDPE)	พลาสติกชนิดนี้มีความหนาแน่นสูง ทำให้แข็งแรง แต่โปร่งแสง น้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ทนกรดและด่าง ทั้งยังป้องกันการแพร่ผ่านของความชื้นได้ดี	นำมาใช้ในการผลิตขวดนม ขวดเครื่องสำอาง ถังพลาสติก ถังขยะ ถึงบรรจุสารเคมี เช่น ถังน้ำมันรถ
	พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride; PVC)	เป็นพลาสติกใสที่มีความแข็งแรงมาก ใสและอากาศซึมผ่านได้พอสมควร แต่ป้องกันไขมันได้ดี	นำมาใช้ในการผลิตท่อประปา ผนังเทียม ฉนวนหุ้มสายไฟ ขวดเครื่องดื่ม แอลกอฮอล์ และอุปกรณ์การแพทย์
	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene; LDPE)	เป็นพลาสติกโปร่งแสง ที่มีปริมาตรสูง แต่ความหนาแน่นต่ำ	นำไปใช้ในการผลิตถุงบรรจุอาหารแช่แข็ง แผ่นฟิล์ม ถุงใส่ของ และสายหุ้มทองแดง

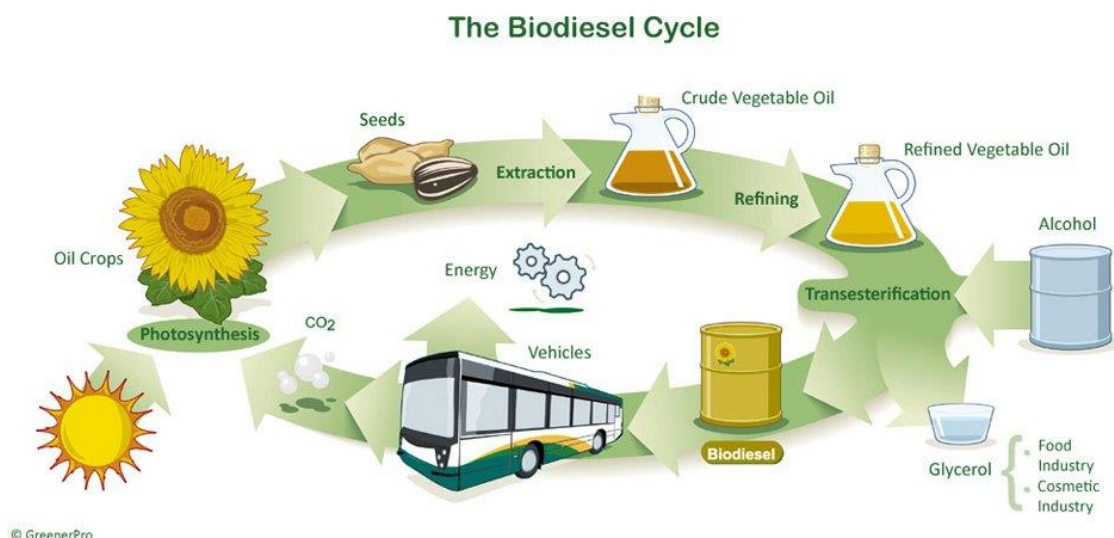
	<p>พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP)</p>	<p>เป็นพลาสติกที่มีน้ำหนักเบาที่สุด แต่มีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระแทก และความร้อนสูง</p>	<p>นำไปใช้ในการผลิตฉนวนไฟฟ้า บานพับ ฝาขวด ภาชนะบรรจุอาหาร ถูร้อน และหลอดดูด</p>
	<p>พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS)</p>	<p>เป็นพลาสติกที่มีความโปร่งใส เพราะบาง แต่ทนต่อการขีดและด่าง ผลิตเป็นรูปต่าง ๆ ได้ง่าย ใส น้ำและอากาศซึมผ่านได้พอสมควร</p>	<p>นำมาผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ภาชนะ เช่น ถ้วยจาน และกล่องโฟม</p>
	<p>พลาสติกอื่น ๆ (Other)</p>	<p>พลาสติกชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ 6 ชนิดแรก เช่น โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate; PC) เป็นพลาสติกโปร่งใส มีความแข็งแรง ทนต่อความร้อน กรด และแรงกระแทกได้ดี</p>	<p>นำมาใช้ในการผลิตปากกา ขวดนมเด็ก หมวกนิรภัย ไฟจราจร ป้ายโฆษณา</p>

## 2.2. ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิงดีเซลที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือสาหร่าย ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก นอกเหนือจากดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียม โดยมีคุณสมบัติการเผาไหม้ เหมือนกับดีเซลจากปิโตรเลียมมาก และสามารถใช้ทดแทนกันได้

คุณสมบัติสำคัญของไบโอดีเซลคือ สามารถย่อยสลายได้เอง ตามกระบวนการชีวภาพในธรรมชาติ และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม





รูปที่ 2.9 วัฏจักรของไบโอดีเซล [18]

### 2.2.1. การผลิตไบโอดีเซล

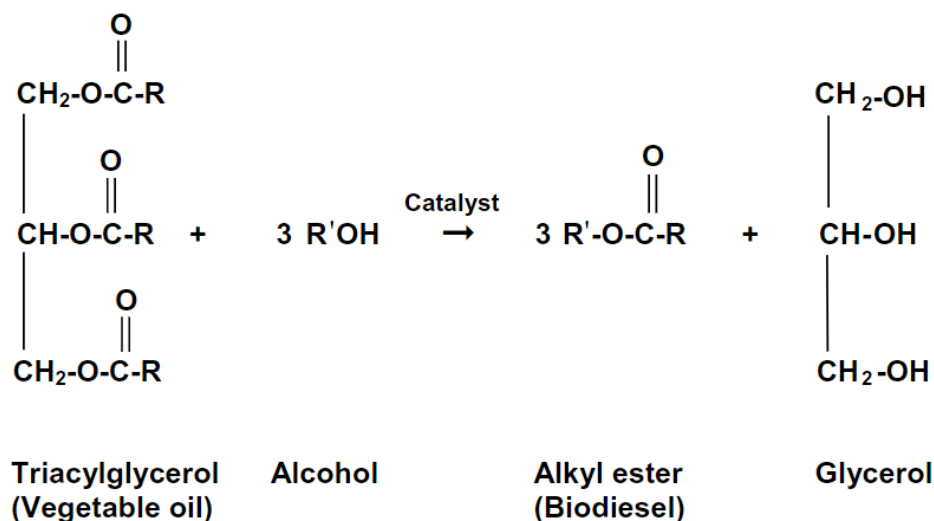
ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบตั้งต้นที่หลากหลาย วัตถุดิบตั้งต้นเหล่านี้ประกอบด้วยน้ำมันพืชทั่วไป (ถั่วเหลือง, เมล็ดฝ้าย, ปาล์ม, ถั่วลิสง, เรพซีด/คาโนลา, ดอกทานตะวัน, ดอกคำฝอย, มะพร้าว ฯลฯ) และไขมันสัตว์ (มักจะเป็นไข) รวมทั้งน้ำมันเสีย (น้ำมันทอดที่ใช้แล้ว) ซึ่งเป็นสารจำพวกไตรกลีเซอไรด์ นำมาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification Process) โดยนำน้ำมันวัตถุดิบไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอลหรือเมทานอล มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นต่าง เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH) แล้วเกิดเป็น FAME (Fatty Acid Methyl Ester) ซึ่งเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน และมีผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้เป็นกลีเซอรอล จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์จนมีคุณสมบัติเหมือนกับน้ำมันดีเซล หรือนำไบโอดีเซลไปผสมกับดีเซลเป็นสูตรต่าง ๆ ดังนี้ [19]

B100 คือ ไบโอดีเซล 100%

B20 คือ มีส่วนผสมของไบโอดีเซล 20% ผสมกับ ดีเซลจากปิโตรเลียม 80%

B10 คือ มีส่วนผสมไบโอดีเซล 10% ผสมกับ ดีเซลจากปิโตรเลียม 90%

B7 คือ มีส่วนผสมไบโอดีเซล 7% ผสมกับ ดีเซลจากปิโตรเลียม 93%



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล [19]

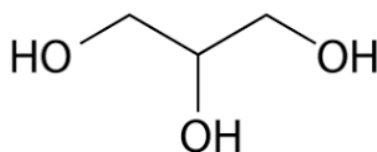
ไบโอดีเซล (Biodiesel) สามารถใช้เผาไหม้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งไบโอดีเซลแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

- 1) ไบโอดีเซลชุมชน ใช้กับเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรทางการเกษตร เครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ สามารถนำไบโอดีเซล 100 หรือ B100 มาใช้กับเครื่องยนต์ชนิดนี้ได้เลย
- 2) ไบโอดีเซลอุตสาหกรรม จะมีคุณภาพที่สูง มีความบริสุทธิ์สูงกว่าไบโอดีเซลชุมชน ซึ่งเป็นการนำไบโอดีเซล (B100) มาผสมกับดีเซลในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งเราจะเห็นจำหน่ายในปั้มน้ำมันเป็น B5, B7, B10 และอัตราผสมสูงสุดของไบโอดีเซลในปัจจุบันอยู่ที่ B20 ไบโอดีเซลชนิดนี้สามารถที่จะนำมาใช้กับรถยนต์เครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วปกติได้

### 2.3. กลีเซอรอล

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerin) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทเดียวกับ แอลกอฮอล์ มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิออล (Polyol) เป็นสารที่เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวานเล็กน้อย (ความหวานสัมพัทธ์ 60) ในโมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 3 หมู่จึงทำให้ละลายในน้ำได้ดี มีสมบัติในการดูดจับน้ำได้ดี (Hydroscopic) กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบหลักในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งได้จากการรวมตัวของ

กลีเซอรอลกับกรดไขมัน (Fatty acid) 3 โมเลกุล ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl) 2 หมู่ และหมู่ไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl) 1 หมู่ มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_3H_8O_3$  [20] ดังรูป 2.11 และมีน้ำหนักโมเลกุล 92.09 กรัมต่อโมล กลีเซอรอล เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยทั่วไป กลีเซอรอลดิบประมาณ 4.53 กิโลกรัม จะถูกสร้างขึ้นสำหรับไบโอดีเซลทุก ๆ 45.3 กิโลกรัม ที่ผลิตได้ [21]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล [21]

### 2.3.1. ที่มาของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลมีการค้นพบครั้งแรกในปีค.ศ. 1779 โดย ซีลี (Scheele) ซึ่งเป็นนักเคมีหรือเภสัชกรชาวสวีเดน พบว่า กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของปฏิกิริยาการผลิตสบู่ระหว่างน้ำมันมะกอกกับออกไซด์ของตะกั่ว ต่อมาในปีค.ศ. 1813 เชฟรูล (Chevreul) นักเคมีชาวฝรั่งเศส ได้พบว่า กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบในไขมัน โดยอยู่ในรูปของกลีเซอรินเอสเทอร์ของกรดไขมัน จึงเรียกว่า กลีเซอริน กลีเซอรินถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมครั้งแรกเมื่อปีค.ศ. 1866 โดย อัลเฟรด โนเบล (Alfred Noble) นักเคมีชาวสวีเดนได้นำกลีเซอรินมาใช้ในการผลิตระเบิดไดนาไมต์ หรือไนโตรกลีเซอริน (Nitroglycerine) ต่อมาช่วงปลายปี ค.ศ. 1930 ฟาร์เบน (Farben) ได้พัฒนาและสังเคราะห์กลีเซอรอลโดยใช้สารตั้งต้นเป็นโพนเพน และตั้งแต่ปีค.ศ. 1980 จนถึงปัจจุบัน การผลิตกลีเซอรอลส่วนใหญ่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันที่ได้จากธรรมชาติมากถึงร้อยละ 75 และจากการสังเคราะห์โพรพินร้อยละ 25 [22]

### 2.3.2. คุณสมบัติของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติโดดเด่นและมีการใช้งานหลากหลายด้าน การผสมผสานระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกลีเซอรอลทำให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เข้ากันได้กับสารอื่น ๆ มากมายและง่ายต่อการจัดการ กลีเซอรอลไม่ค่อยเป็นพิษต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ในทางกายภาพ กลีเซอรอลเป็นของเหลวที่ละลายน้ำได้ ใสไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความหนืด อุ้มน้ำ มีจุดเดือดสูง ในทางเคมี กลีเซอรอลเป็นไตรไฮดริกแอลกอฮอล์ สามารถทำปฏิกิริยาเป็นแอลกอฮอล์ได้ แต่มีความเสถียรภายใต้สภาวะส่วนใหญ่ ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญสำหรับการใช้งานกลีเซอรอลแสดงในตารางที่ 2.2

โมเลกุลของกลีเซอรอลมีกลุ่มไฮดรอกซิลที่ชอบน้ำ 3 กลุ่มที่มีหน้าที่ในการละลายในน้ำ และสามารถดูดความชื้น ทำให้กลีเซอรอลเป็นสารที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย โดยกลีเซอรอลสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และยังพบการใช้งานในกระบวนการกลั่นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย และอาจมีคุณค่าทางสิ่งแวดล้อมสูงซึ่งเป็นที่ต้องการของสังคมสมัยใหม่ซึ่งสนับสนุนการไม่พึ่งพาแหล่งปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงฟอสซิลที่หมดสิ้นลง [23]

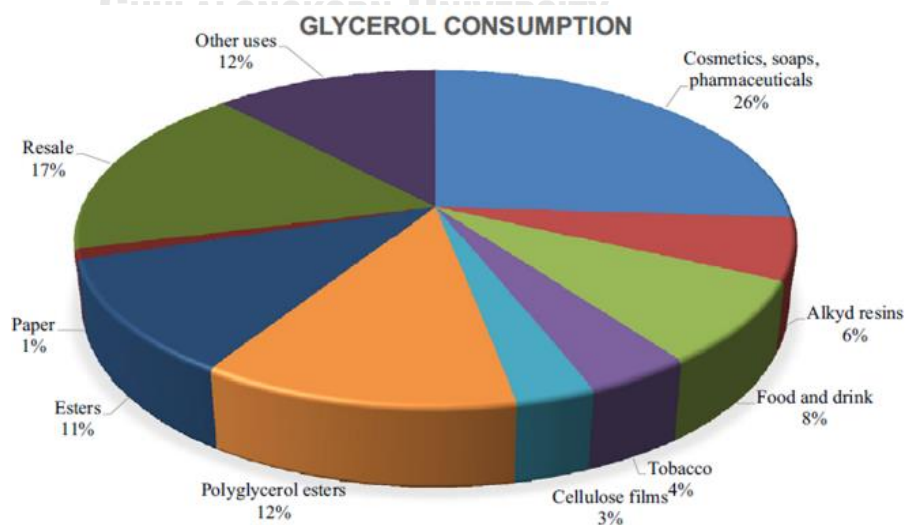
**ตารางที่ 2.2** สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล [24]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ข้อมูล
สูตรโมเลกุล	$C_3H_8O_3$
น้ำหนักโมเลกุล	92.09 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	1.261 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
สถานะ	ของเหลว
สี	ไม่มีสี
ความถ่วงจำเพาะ	1.2605
ค่าดัชนีหักเหแสง	1.4746
จุดหลอมเหลว	17.9 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	290 องศาเซลเซียส
จุดติดไฟ	204 องศาเซลเซียส
จุดวาบไฟ (ระบบเปิด)	177 องศาเซลเซียส
ละลายใน	น้ำและแอลกอฮอล์

ไม่ละลายใน	ตัวทำละลายพวกเฮโลเจน, อีเทอร์, เบนซีน, คลอโรฟอร์มฯ
ความหนืดที่ความบริสุทธิ์ที่ 100%	100 cP
ความหนืดที่ความบริสุทธิ์ที่ 50%	25 cP

### 2.3.3. ประโยชน์ของกลีเซอรอล

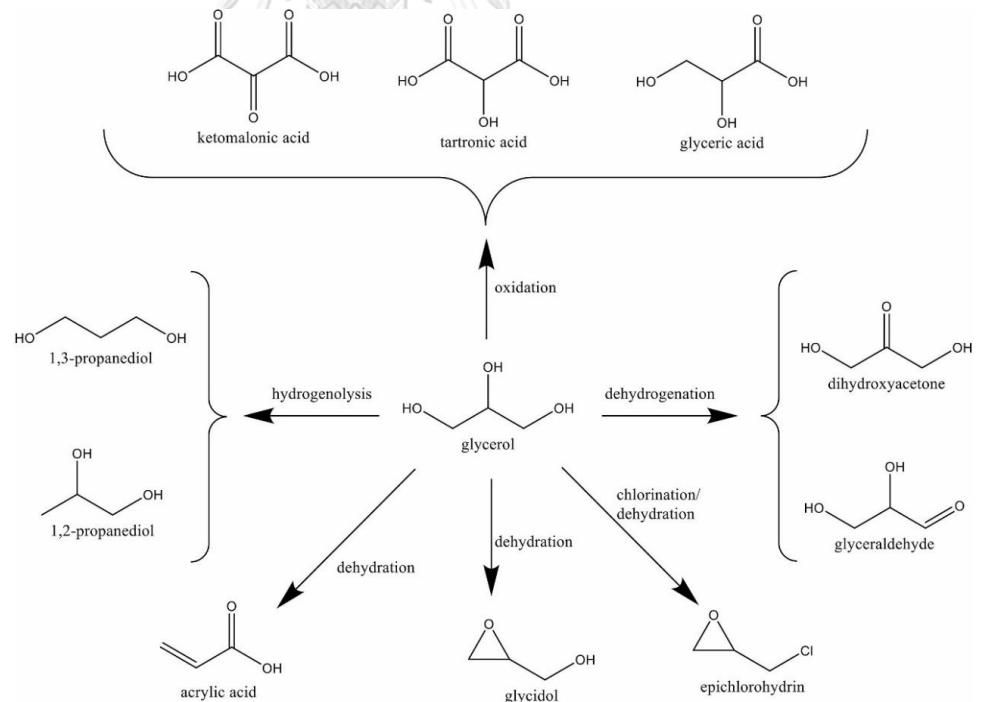
เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล จะมีกลีเซอรอลติดเป็นผลพลอยได้ ซึ่งมีปริมาณถึงร้อยละ 10 ของไบโอดีเซล ทำให้ในแต่ละวันทางโรงงานจะผลิตกลีเซอรอลติดได้หลายตัน ส่งผลให้เกิดเป็นของเสียที่ต้องจัดการอย่างเร่งด่วน ซึ่งหนึ่งในการจัดการกลีเซอรอลติดที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพคือ การทำให้กลีเซอรอลติดมีความบริสุทธิ์เพิ่มมากยิ่งขึ้น จนสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ยา เวชสำอาง หรือใช้เป็นสารเคมีตั้งต้นสำหรับผลิตพอลิเมอร์ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 [25] พบว่า กลีเซอรอลจะถูกนำไปใช้ในกลุ่มเครื่องสำอางมากที่สุดถึงร้อยละ 26 โดยใช้เป็นสารอิมัลชัน (Emulsion) ในผลิตภัณฑ์ครีม และเป็นสารที่ทำหน้ารักษาความชุ่มชื้นทั้งในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์แก้ผิว นอกจากนี้ยังใช้กลีเซอรอลในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิกลีเซอรอลเอสเทอร์ร้อยละ 12, ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเอสเทอร์ร้อยละ 11, ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารและเครื่องดื่มร้อยละ 8 เช่น เป็นสารทดแทนน้ำตาล, ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอัลคิลเรซินร้อยละ 6 เป็นต้น



รูปที่ 2.12 การใช้กลีเซอรอลในอุตสาหกรรมต่าง ๆ [25]

### 2.3.4. การนำกลีเซอรอลจากอุตสาหกรรมไบโอดีเซลมาใช้ในทางเคมี

การผลิตไบโอดีเซล เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจในการผลิตน้ำมันดิบ เนื่องจากราคาน้ำมันดิบที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการผลิตไบโอดีเซลแต่ละครั้ง จะเกิดกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ร้อยละ 10 ของปริมาณไบโอดีเซลทั้งหมด ทำให้กลีเซอรอลมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจากการผลิตไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น โดยกลีเซอรอลดิบที่ได้จากอุตสาหกรรมไบโอดีเซลจะมีความเข้มข้นอยู่ที่ร้อยละ 40 ถึง 85 ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ส่วนใหญ่กลีเซอรอลดิบจะถูกกำจัดทิ้ง โดยจัดว่าเป็นขยะอุตสาหกรรม เนื่องจากกระบวนการทำให้บริสุทธิ์นั้นมีต้นทุนที่สูง ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกลีเซอรอลดิบ ตลอดจนการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าจึงมีศึกษาเพื่อหาวิธีการเปลี่ยนแปลงกลีเซอรอลให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปอื่นด้วยต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก เช่น นำกลีเซอรอลดิบที่เหลือใช้มาทำปฏิกิริยาไกลเซโรไลซิส (Glycerolysis) เพื่อให้ได้ผลผลิตเป็นโมโนกลีเซอไรด์หรือผ่านกระบวนการกลั่นเพื่อทำให้มีความบริสุทธิ์ นอกจากนี้เพิ่มมูลค่าได้แล้วยังสามารถนำกลีเซอรอลไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ดังรูปที่ 2.13 [26]



รูปที่ 2.13 เส้นทางการเปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นสารเคมี [26]

## 2.4. ไฮโดรเจน

### 2.4.1. ความหมายของไฮโดรเจน

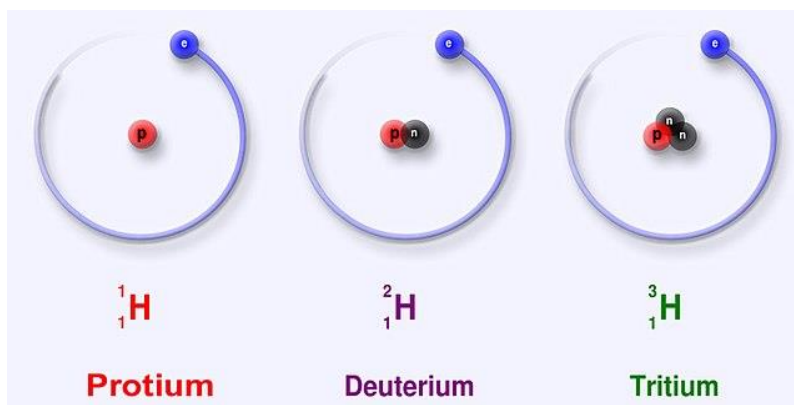
ไฮโดรเจนเป็นธาตุอันดับที่ 1 ของตารางธาตุ มีสัญลักษณ์คือ H เลขอะตอม 1 อะตอมของธาตุไฮโดรเจนมีน้ำหนัก 1.00794 amu เป็นธาตุอโลหะ ธาตุประกอบด้วย นิวเคลียสอยู่ตรงกลางของอะตอม ซึ่งภายในนิวเคลียสประกอบไปด้วยโปรตอนที่มีประจุเป็นบวก และนิวตรอนที่ไม่มีประจุทางไฟฟ้า ด้านนอกจะมีอิเล็กตรอนที่มีประจุเป็นลบ รั้งอยู่รอบ ๆ ไฮโดรเจนนั้นอยู่ได้ทุกสถานะไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว ก๊าซ ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิของธาตุไฮโดรเจน ในขณะนั้น ซึ่งในบรรยากาศของโลกเรานี้จะมีธาตุไฮโดรเจนอยู่ประมาณ 0.1 ppm หรือร้อยละ 75 ของสารชีวมวลที่มีอยู่บนโลก ลักษณะของไฮโดรเจน คือไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟง่าย พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติมี ไม่มีพิษในตัวเอง

ไฮโดรเจน (H) มีไอโซโทปที่รู้จักกันคืออยู่ 3 ไอโซโทป คือ  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  และ  $^3\text{H}$  แต่ไฮโดรเจนมีไอโซโทปอื่น ๆ อีก 4 ไอโซโทป ในบรรดาไอโซโทปทั้งหมดของไฮโดรเจน ทริเทียม ( $^3\text{H}$ ) เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เสถียรที่สุด ด้วยครึ่งชีวิต 12.32 ปี ส่วนไอโซโทปหนักอื่น ๆ มีครึ่งชีวิตไม่ถึง เซปโตวินาที ( $10^{-21}$  วินาที) ส่วนไอโซโทปที่เสถียรน้อยที่สุดคือ  $^7\text{H}$

ไอโซโทปที่เสถียรที่สุดของไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทป ดังนี้ [27]

- 1) โปรเทียม ( $^1\text{H}$ ) เป็นไอโซโทปที่เก่าแก่ที่สุดของไฮโดรเจน ประกอบด้วย 1 โปรตอน และ 1 อิเล็กตรอน ซึ่งเป็นเอกลักษณ์กว่าไอโซโทปอื่น ๆ เพราะไอโซโทปนี้ไม่มีนิวตรอน มีมวลอะตอม เท่ากับ 1.0078 u มีในธรรมชาติมากถึง 99.98% เพราะนิวเคลียสของไอโซโทปนี้มีแต่โปรตอน และเป็นสาเหตุที่ทำให้ชื่อไอโซโทปนี้ว่า โปรเทียม
- 2) ดิวเทอเรียม ( $^2\text{H}$ ) เป็นไอโซโทปหนึ่งที่มีความเสถียร ประกอบด้วย 1 นิวตรอน และ 1 โปรตอน ในนิวเคลียสของมัน ดิวเทอเรียมมีในธรรมชาติอยู่ร้อยละ 0.0026-0.0184 โดยจำนวน ซึ่งไอโซโทปนี้มีสารประกอบอยู่ตัวหนึ่งคือ ดิวเทอเรียมไดออกไซด์
- 3) ทริเทียม ( $^3\text{H}$ ) ประกอบด้วย 1 โปรตอนและ 2 นิวตรอน ในนิวเคลียส ไอโซโทปนี้สามารถสลายด้วยการสลายตัวเบต้าไปเป็น ฮีเลียม-3 ด้วยครึ่งชีวิต 12.32 ปี ทริเทียมในธรรมชาติมีอยู่น้อยมากและนำไปใช้ในการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ และ

สามารถพบได้ในรังสีคอสมิก นอกจากนี้ ทริเทียม สามารถได้มาจากการระดมยิงนิวเคลียสของลิเทียม-6 ( ${}^6\text{Li}$ ) ด้วยนิวตรอน ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์อีกด้วย



รูปที่ 2.14 ไอโซโทปที่เสถียรที่สุดของไฮโดรเจน [27]

นอกจากนี้ยังมีไอโซโทปที่ไม่เสถียรอีก 4 ไอโซโทป ดังนี้

- 1)  ${}^4\text{H}$  ประกอบด้วย 1 โปรตอน และ 3 นิวตรอน ในนิวเคลียส ไอโซโทปนี้ได้จากการระดมยิงทริเทียมด้วยดิวเทอเรียมเคลื่อนที่เร็ว โดยไอโซโทปนี้มีครึ่งชีวิต  $(1.39 \pm 0.10) \times 10^{-21}$  วินาที
- 2)  ${}^5\text{H}$  ประกอบด้วย 1 โปรตอน และ 4 นิวตรอน ในนิวเคลียส ไอโซโทปนี้ได้จากการระดมยิงทริเทียมด้วยทริเทียมเคลื่อนที่เร็ว และไอโซโทปนี้มีครึ่งชีวิต  $9.1 \times 10^{-21}$  วินาที
- 3)  ${}^6\text{H}$  ประกอบด้วย 1 โปรตอน และ 5 นิวตรอน และมีครึ่งชีวิต  $2.90 \times 10^{-22}$  วินาที [28]
- 4)  ${}^7\text{H}$  ประกอบด้วย 1 โปรตอน และ 6 นิวตรอน ไอโซโทปนี้ได้จากการระดมยิงไฮโดรเจน ด้วย ฮีเลียม-8 ( ${}^8\text{He}$ ) [29]



#### 2.4.2. สมบัติของไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นแก๊สไม่มีสีไม่มีกลิ่น เป็นธาตุที่พบได้มากที่สุด ซึ่งพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ เช่น ในบรรยากาศมีแก๊สไฮโดรเจนประมาณ 0.1 ส่วนในล้านส่วน (ppm) พลังงานพันธะสูงเท่ากับ 436 กิโลจูลต่อโมล ต้องใช้พลังงานสลายพันธะระหว่างอะตอมเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา เช่น เพิ่มอุณหภูมิ หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ไฮโดรเจนมีความไวไฟสูงและจะเผาไหม้ในอากาศที่มีช่วงความเข้มข้นกว้างมากระหว่างร้อยละ 4 ถึง 75 โดยปริมาตร โดยเอนทัลปีของการเผาไหม้สำหรับไฮโดรเจนคือ -286 กิโลจูลต่อโมล (kJ/mol) [30] สมบัติทั่วไปของไฮโดรเจนแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของไฮโดรเจน [30]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ข้อมูล
เลขอะตอม	1
พลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในสถานะพื้น	1312 กิโลจูลต่อโมล
มวลโมเลกุล	$2.016 \times 10^{-3}$ กิโลกรัมต่อโมล
สถานะ	ของแข็ง, ของเหลว และแก๊ส
ระยะทางเฉลี่ยระหว่างนิวเคลียส	0.074 นาโนเมตร
พลังงานการสลายพันธะ	436 กิโลจูลต่อโมล
ความนำไอออนของไฮโดรเจนไอออนเจือจางในน้ำที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน	0.035 ตารางเมตรต่อโมลไอออน
ความหนาแน่นที่ 101.33 กิโลปาสกาลและอุณหภูมิ 298 เคลวิน	0.084 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
จุดหลอมเหลวที่ 101.33 กิโลปาสกาล	13.8 เคลวิน
จุดเดือดที่ 101.33 กิโลปาสกาล	20.3 เคลวิน
ความจุความร้อนที่ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ 298 เคลวิน	14.3 กิโลจูลต่อเคลวินกิโลกรัม
การละลายในน้ำที่ 101.33 กิโลปาสกาลและอุณหภูมิ 298 เคลวิน	0.019

### 2.4.3. การผลิตไฮโดรเจน

โดยทั่วไปก๊าซไฮโดรเจนไม่พบอิสระในธรรมชาติ ซึ่งปัจจุบันนี้มีการนำก๊าซธรรมชาติมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เนื่องจากส่วนประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติคือ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ซึ่งสามารถให้ก๊าซไฮโดรเจนได้สูง นอกจากนั้นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน, วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร และแอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักเศษวัสดุทางชีวภาพล้วนแล้วแต่มีไฮโดรเจนอะตอมเป็นองค์ประกอบ ส่วนชีวมวลและแหล่งให้พลังงานอื่น ๆ ที่มาจากธรรมชาติ เช่น แร่ถ่าน, แร่ถ่านหิน และพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น ก็สามารถใช้เป็นแหล่งที่ให้พลังงานเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนได้เช่นกัน กระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่ดีต้องให้ผลคุ้มค่ากับการลงทุนและไม่ยุ่งยากซับซ้อนเกินไป เพื่อลดต้นทุนการผลิต แนวคิดหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน คือการแยกไฮโดรเจนอะตอมออกจากสารตั้งต้นและแหล่งให้ก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นตัวกำหนดกระบวนการที่ใช้ในการผลิต โดยกระบวนการที่ใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในปัจจุบันนิยมใช้ 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการทางความร้อนเคมี (Thermal process), กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrolytic process) และกระบวนการทางชีวเคมี (Photolytic process) ซึ่งแต่ละกระบวนการมีหลักการ ดังนี้

#### 1) กระบวนการทางความร้อนเคมี (Thermal process)

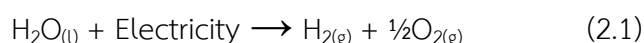
กระบวนการทางความร้อนเคมี ประกอบไปด้วยกระบวนการไพโรไลซิส, กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และกระบวนการลิกวิแฟกชัน โดยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการผลิตที่ให้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลว ถ่านแข็ง และสารประกอบที่เป็นก๊าซจากชีวมวล เช่น น้ำมันชีวภาพ ซึ่งน้ำมันชีวภาพเป็นแหล่งผลิตของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ต่อไป ในระหว่างการไพโรไลซิส จะมีการใช้ความร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 650-800 เคลวิน ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุล หากใช้น้ำมันชีวภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยไอน้ำแรงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่อุณหภูมิ 750-850 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตของไฮโดรเจนสูงสุดจะเท่ากับ 0.172 กรัมไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำมันชีวภาพ ส่วนกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนถ่านหินหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สผสมที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแก๊สชนิดนี้ติดไฟได้ในธรรมชาติและประกอบด้วยไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์,

คาร์บอนมอนอกไซด์, มีเทน และน้ำ โดยในการปรับองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ให้ได้ผลผลิตตามที่ต้องการ สามารถทำได้โดยปรับตัวแปรต่าง ๆ เช่น การกำหนดค่าเครื่องปฏิกรณ์และประเภทของชีวมวลให้เหมาะสม นอกจากนี้ กระบวนการลิกวิแฟกชันเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในน้ำที่อุณหภูมิ 525-600 เคลวิน โดยใช้แรงดัน 50-200 บาร์ในสภาวะที่ไม่มีอากาศ นอกจากนี้การเติมตัวทำละลายหรือตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการสามารถเพิ่มผลผลิตของไฮโดรเจนได้อีกด้วย [31]

## 2) กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrolytic process)

กระบวนการนี้เป็นการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อให้ไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เคลื่อนที่ไปเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า ปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) หรือ รีดักชัน (Reduction Reaction) ในทิศทางที่ไม่สามารถเกิดเองได้ถ้าไม่ให้กระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ให้จะต้องให้มากกว่าค่าโวลต์มาตรฐานที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้น เช่น การแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าจะต้องใช้ค่าโวลต์ที่สูงกว่า 1.229 โวลต์ ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis reaction) โดยที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ของโปรตอน (ไฮโดรเจนไอออน) ในภาวะกรด ส่วนในภาวะเบสจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้แก๊สออกซิเจน ข้อดีของการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากวิธีนี้จะมีความบริสุทธิ์สูง ข้อเสีย คือค่าใช้จ่ายด้านกระแสไฟฟ้าสูง [32] สมการที่ 2.1 แสดงตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้า

เกิดปฏิกิริยาการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ 2.1



## 3) กระบวนการทางชีวเคมี (Photolytic process)

การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้สิ่งมีชีวิตจำพวกยีสต์หรือแบคทีเรียเพื่อทำให้สารอินทรีย์เกิดการย่อยสลายและเปลี่ยนแปลง

กลายเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ชีวมวลหลายชนิดสามารถนำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจนได้ เช่น ของเหลือจากการเกษตร น้ำเสียอินทรีย์ ขยะมูลฝอยชุมชน การหมักแบบมีด การหมักด้วยแสง การสลายด้วยแสงโดยตรง การสลายด้วยแสงทางอ้อม และเซลล์อิเล็กโทรไฮโดรเจนซิสของจุลินทรีย์ (MECs) เป็นวิธีการต่าง ๆ ในการแปลงชีวมวลให้เป็นไฮโดรเจน นอกจากนี้การหมักแบคทีเรียสามารถทำได้โดยการหมักขยะอินทรีย์ให้เป็นไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ซึ่งการหมักจะใช้แสงและการสลายด้วยแสงโดยตรงและโดยอ้อมของน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน [33]

#### 2.4.4. ข้อดีของพลังงานไฮโดรเจน

ข้อดีของการใช้พลังงานไฮโดรเจน คือ เป็นพลังงานสะอาด ปลอดภัยต่อคน และยืดหยุ่นในการใช้งาน การใช้งานเทียบเท่าพลังงานน้ำมัน จึงนิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ของยานพาหนะ ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้ดีขึ้น อีกทั้งยังลดการปล่อยแก๊สพิษ อย่างเช่น  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $VOCs$ ,  $SO_x$ , แก๊สไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่น และเขม่าควันสู่สภาพแวดล้อมได้ ไฮโดรเจนถูกนำไปใช้ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีหรือในงานอุตสาหกรรมเพื่อให้พลังงานกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือรถไฟฟ้า และถูกใช้ในการขับเคลื่อนยานอวกาศ นอกจากนี้ไฮโดรเจนสามารถช่วยในการผลิตกระแสไฟฟ้า และเป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหารได้อีกด้วย ซึ่งไฮโดรเจนสามารถกักเก็บและขนส่งในรูปแบบ ของเหลวหรือก๊าซเมื่อไฮโดรเจนผสมกับคาร์บอนที่ถูกกักเก็บ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ [34]

## 2.5. ไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการทางเคมีความร้อนที่เปลี่ยนรูปของชีวมวลพลาสติก รวมถึงยางที่ใช้แล้ว เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าทางความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมัน (Bio-oil) และก๊าซไม่กลั่นตัว (Non-condensable gas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง 500-800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สภาวะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น

กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis)

### 1) กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบช้ามีสัดส่วนเป็นของเหลวร้อยละ 30-50 และถ่านร้อยละ 25-35 ไพโรไลซิสแบบช้ายังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย คือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (Carbonization pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (Conventional pyrolysis) คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลาสั้น โดยใช้เวลาประมาณหนึ่งวัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลิตภัณฑ์ในสถานะแก๊สจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ ส่วนกระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่า คือ 15-30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ครบทั้ง 3 สถานะ คือ ถ่าน น้ำมัน และแก๊สไม่กลั่นตัว เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จึงถูกใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม เราสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีชีว หรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันได้ โดยสารเคมีที่สามารถสกัดได้จากน้ำมันในส่วนนี้ ได้แก่ อะซิโตน, คีโตน, เมทานอล, กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เป็นต้น

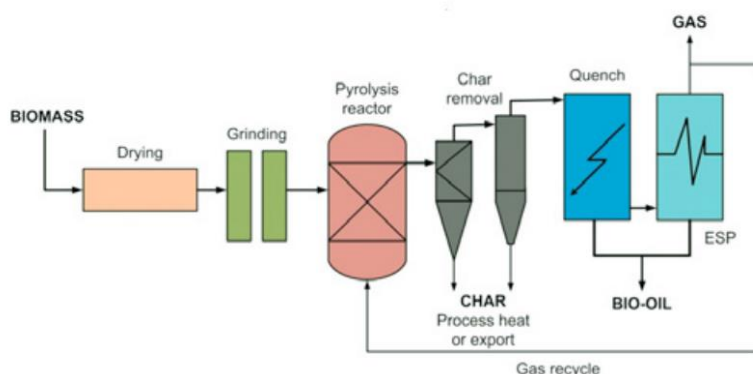
### 2) กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

เป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก มีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปานกลาง (400 - 650 องศาเซลเซียส) เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร มีระยะเวลาของไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 วินาที) เมื่อใช้วัตถุดิบประเภทชีวมวลจะได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลว เรียกว่า น้ำมันชีวภาพ ประมาณร้อยละ 60-75, ของแข็งร้อยละ 15-25เปอร์เซ็นต์ และก๊าซ

ไม่กลั่นตัวร้อยละ 10-15 และมีองค์ประกอบของน้ำในน้ำมันชีวภาพร้อยละ 10-30 ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีในชีวมวลเริ่มต้น นอกจากนี้ น้ำมันชีวภาพยังประกอบด้วยสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อน และการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล องค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพจากวัตถุดิบประเภทชีวมวล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้น น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจึงสามารถปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงและสารเคมีได้หลายประเภท

การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ให้มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง และออกแบบให้ไอกกลั่นตัวเป็นของเหลวโดยเร็วที่สุดเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันร้อยละ 70-80 เป็นสิ่งสำคัญในการไพโรไลซิส นอกจากนี้ยังต้องออกแบบให้มีการกำจัดถ่านและเถ้าออกจากผลิตภัณฑ์ให้มากที่สุด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาด ไม่มีเถ้าเจือปน ซึ่งประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ ได้แก่ หน่วยลดความชื้นและย่อยขนาดชีวมวล (Biomass drying and grinding) หน่วยทำปฏิกิริยา (Fast pyrolysis reactor) หน่วยกำจัดถ่านและเถ้า (Char removal) หน่วยควบแน่นและเก็บผลิตภัณฑ์น้ำมัน (Product collection) ตัวอย่างของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจากวัตถุดิบประเภทชีวมวล แสดงดังรูปที่ 2.15 [35]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



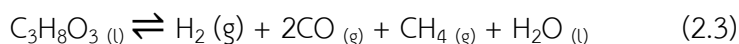
รูปที่ 2.15 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว [35]

การเกิดไพโรไลซิสอย่างง่ายของพลาสติกและกลีเซอรอลเป็นดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 [36]

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของพลาสติก (Plastic pyrolysis) แสดงดังสมการที่ 2.2



ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของกลีเซอรอล (Glycerol pyrolysis) แสดงดังสมการที่ 2.3



## 2.6. รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ

### 2.6.1. รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในเชิงพาณิชย์ที่นิยมในปัจจุบัน คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ซึ่งจะใช้สารตั้งต้นเป็นก๊าซธรรมชาติและเอทานอลหมักจากวัสดุธรรมชาติ เป็นต้น โดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการผลิต ไฮโดรเจน (Hydrogen;  $H_2$ ) สูง แต่เสียค่าใช้จ่ายน้อย จึงนิยมนำมาใช้ในทางการค้า โดยหลักการของกระบวนการนี้คือ การป้อนไอน้ำ (Steam) เข้าสู่ระบบเพื่อทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในสถานะก๊าซ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซชีวภาพ และเอทานอล เป็นต้น ซึ่งจะใช้อุณหภูมิในช่วงประมาณ 700-1,100 องศาเซลเซียส โดยไฮโดรเจนจะถูกดึงออกจากไอน้ำ ( $H_2O$ ) และสารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon; HC) ส่วนออกซิเจนที่เหลือจากน้ำและคาร์บอนที่เหลือจากไฮโดรคาร์บอนจะรวมตัวกันเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide; CO) จะเห็นว่า แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สผสมระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งแก๊สผสมชนิดนี้ เรียกว่า แก๊สสังเคราะห์ หรือซินแก๊ส (Synthesis gas หรือ Syngas) [37] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เม็ดพลาสติกและกลีเซอรอล ซึ่งพลาสติกมีสถานะเป็นของแข็งที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก และกลีเซอรอลมีสถานะเป็นของเหลวซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่น่าสนใจในการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยสรุปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล ได้เป็นสมการต่าง ๆ ดังนี้ [38]

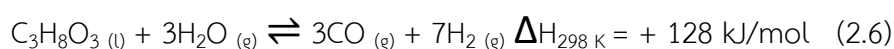
ปฏิกิริยาการสลายตัวของกลีเซอรอลแสดงดังสมการที่ 2.4



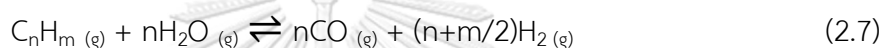
ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water - Gas Shift reaction) แสดงดังสมการที่ 2.5



ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงรวมของกลีเซอรอลแสดงดังสมการที่ 2.6



ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของพลาสติกหรือไฮโดรคาร์บอนแสดงดังสมการที่ 2.7



โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic process) การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่ซับซ้อนมาก ขั้นตอนแรก คือ การสลายตัวของกลีเซอรอล ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.4 จะเห็นว่าในการสลายตัวของกลีเซอรอลจะให้สารผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์จำนวน 3 โมล และไฮโดรเจนจำนวน 4 โมล ขั้นตอนที่สองจะเป็นการเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water - Gas Shift reaction) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.5 จะเห็นว่าปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟเป็นปฏิกิริยาในการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยไอน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยจากสมการที่ 2.6 เป็นปฏิกิริยารวมการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล ซึ่งจากสมการจะเห็นว่ากลีเซอรอล 1 โมลที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ 3 โมล สามารถให้ผลผลิตเป็นซินแก๊ส ซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ 3 โมลและไฮโดรเจน 7 โมล และจากสมการที่ 2.7 จะเป็นปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของพลาสติกหรือไฮโดรคาร์บอน จะเห็นว่ากระบวนการนี้จะเกิดการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างพลาสติกที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนกับน้ำ แล้วเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนได้เช่นเดียวกับการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล

เนื่องจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน จึงจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเร่งปฏิกิริยาและสนับสนุนการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการให้ได้ผลผลิต



มากขึ้น ซึ่งจากสมการที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าในปฏิกิริยาการสลายตัวของกลีเซอรอล, ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงรวมของกลีเซอรอล และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของพลาสติกหรือไฮโดรคาร์บอน ล้วนให้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีประสิทธิภาพลดลง นอกจากนี้คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้น ยังสามารถ ทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงอย่างปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation reaction) แสดงดัง สมการที่ 2.8 และ 2.9 [1]

ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation reaction) แสดงดังสมการที่ 2.8 และ 2.9



มีเทนที่เกิดจากปฏิกิริยาในสมการที่ 2.8 และ 2.9 ไม่ใช่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีประสิทธิภาพมากพอในการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ สูงของมีเทน เพื่อให้ได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.10 และ 2.11

ปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงของมีเทน (Methane dry reforming) แสดงดังสมการที่ 2.10 และ 2.11



นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาข้างเคียงหลายอย่างเกิดขึ้นที่สามารถส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดโค้กหรือการสะสมของคาร์บอนขึ้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Formation of coke) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.12 - 2.15

ปฏิกิริยาการสลายตัวของมีเทน (Methane decomposition หรือ Methane cracking) แสดงดังสมการที่ 2.12



ปฏิกิริยา CO disproportionation หรือ Boudouard แสดงดังสมการที่ 2.13



ปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide reduction) แสดงดังสมการที่ 2.14



ปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide reduction) แสดงดังสมการที่ 2.15



#### 2.6.2. รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ

กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ (Sorption Enhanced Steam Reforming; SESR) เป็นกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก่อนการเผาไหม้ ซึ่งเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำในที่มีตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อผลิตไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) จากการสลายคาร์บอนออก ทำให้ไฮโดรเจนมีความบริสุทธิ์สูง (แสดงดังสมการ (2.16)) และเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการขนส่งและการจัดเก็บทางธรณีวิทยา (หรือใช้ซ้ำ) สมมติอัตราส่วนปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นแต่ละชนิด กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับโดยรวมจะมีการคายความร้อน (exothermic process) เล็กน้อย จากการคายความร้อนของปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ และมีปฏิกิริยาการเกิดมีเทน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนมาสร้างสมดุลของปฏิกิริยารวม

กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ มักใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600-700 องศาเซลเซียส แสดงดังสมการที่ 2.17 ซึ่งการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์จะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟเลื่อนไปข้างหน้ามากขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็น

ไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น [39] ตามที่อธิบายไว้ในหลักการของ Le Chatelier [40] ซึ่งการได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนมากขึ้นเป็นปัจจัยหลักของงานวิจัยนี้

ปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับอย่างง่าย แสดงดังสมการที่

2.16



ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันแบบคายความร้อน แสดงดังสมการที่ 2.17



## 2.7. ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ

### 2.7.1. ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา

กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลและพลาสติกนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากโลหะหลักหลายชนิดเพื่อใช้เป็นเฟสที่ว่องไว (Active phase) นั่นคือนิกเกิล (Ni) และพวกโลหะมีตระกูลอย่าง Pt, Ir, Ru, Rh และ Pd เป็นต้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ Ni ได้รับการศึกษาอย่างมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ซึ่งมักพบการใช้นิกเกิลที่อยู่บนส่วนรองรับ (Support) อย่างอลูมินา (Alumina :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), คาร์บอน (Carbon), อลูมินาที่ถูกดัดแปลงด้วยซีเรียม (Cerium), แลนทานัม (Lanthanum), แมกนีเซียม (Magnesium) หรือเซอร์โคเนียม (Zirconium) โดยแกมมา-อลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) ถือเป็นตัวรองรับ พื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงปานกลาง, มีความเสถียรเชิงกล, มีระดับการกระจายตัวของโลหะสูง และมีความต้านทานต่อการเผาในช่วงอุณหภูมิกว้าง แต่มีข้อเสีย เนื่องจากการใช้ตัวรองรับอลูมินาจะทำให้เกิดการสะสมของคาร์บอนและเกิดโค้กในบริเวณที่เป็นกรดของอลูมินา จากการศึกษาพบว่านิกเกิล มีความสามารถในการทำลายพันธะ C-C, C-H และ O-H สูงและส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาออกเทอร์แกสซิฟให้เปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ แต่สามารถยับยั้งการแตกแยกของพันธะ C=O และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ของคาร์บอนมอนอกไซด์หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะนำไปสู่การก่อตัวของอัลเคนหรือสารประกอบที่มีซัลเฟอร์มากขึ้น นอกจากนี้นิกเกิลมีข้อดีคือ มี

ราคาไม่แพงและสามารถหาได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะมีตระกูลตัวอื่น (Noble metals) ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ निकเกิลจึงเป็นที่นิยมสำหรับปฏิกิริยานี้ [41] งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะใช้ निकเกิล/อลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.7.2. ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ

ตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน แต่กระบวนการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ล้วนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับสารเคมีในตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะได้ผลผลิตเป็นน้ำ, ความร้อน, และคาร์บอนเนต ตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide;  $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่อาศัยเบสแก่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งก่อให้เกิดสารพิษ และลิเทียมไฮดรอกไซด์ (Lithium hydroxide;  $\text{LiOH}$ ) ที่ไม่ต้องอาศัยเบสแก่เร่งปฏิกิริยา จึงไม่ก่อให้เกิดสารพิษ นอกจากนี้ แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide;  $\text{CaO}$ ) ก็เป็นอีกหนึ่งตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับที่เสื่อมสภาพไว ทำให้มีผลการศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับอื่นที่มีความเสถียรมากกว่าแคลเซียมออกไซด์ จากการศึกษาพบว่า แคลเซียมมอฟ (Ca-MOF) มีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีความเสถียรในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะใช้แคลเซียมมอฟเป็นตัวดูดซับ

## 2.8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chang และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ Ca-MOF เพื่อนำมาใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้หินปูนเป็นสารตั้งต้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ Ca-MOF ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลด้วยกรดอะซิติกและกรดเทรเพทาลิก พบว่าเมื่อนำ Ca-MOF มาทำการเผาจะทำให้ได้โครงสร้าง Ca-MOF-O ที่มีความเสถียรสูงและมีการกระจายรูพรุนที่ 50-100 นาโนเมตร ทำให้เกิดการแพร่กระจายอย่างรวดเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับและเพิ่มความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากเสถียรภาพของโครงสร้าง ซึ่ง Ca-MOF-O มีความสามารถในการดักจับ

คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสได้ถึง 52% และสามารถนำมาใช้ซ้ำได้ 10 ครั้ง โดยมีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 80% ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์จะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากมีการนำมาใช้ซ้ำหลายครั้ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Ca-MOF-O มีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าหินปูน

Chai และคณะ [2] ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-CaO-C ใหม่ เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาและความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิสร่วมกับแก๊สซิ-พีเคชันของพลาสติกเหลือทิ้งและชีวมวลสำหรับการผลิตไฮโดรเจน อีกทั้งยังศึกษาผลของการไหลตุนิกเกิล, อัตราส่วนการรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราส่วนสารตั้งต้น, อุณหภูมิไฟโรไลซิส, อุณหภูมิรีฟอร์มมิง และอัตราการไหลของการฉีดน้ำ ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-CaO-C ในสภาวะที่เหมาะสมของการไฟโรไลซิสร่วมกับแก๊สซิพีเคชันของพลาสติกเหลือทิ้งและชีวมวลเพื่อให้ได้ผลผลิตไฮโดรเจนที่สูงขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้พลาสติกบริสุทธิ์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และชีวมวลอย่างขี้เลื่อยสนเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น ซึ่งโดยทั่วไปนิกเกิลจะถูกใช้เป็นแกนหลักในการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและผลผลิตแก๊สที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับตัวรองรับต่าง ๆ เช่น อลูมินา ( $Al_2O_3$ ), โคบอลต์ (Co), โฟมเซรามิก เป็นต้น โดยการใช้ตัวรองรับที่แตกต่างกันจะส่งผลให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน จากงานวิจัยนี้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-CaO-C สำหรับการไฟโรไลซิสร่วมกับแก๊สซิพีเคชัน คือ การใช้ปริมาณนิกเกิล 10 wt.%, อัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อคาร์บอนเป็น 5 ต่อ 5, อัตราส่วนของชีวมวลต่อพลาสติกเป็น 5 ต่อ 5, อุณหภูมิ

ไฟโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส, อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 600 องศาเซลเซียส และอัตราการฉีดน้ำ 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสม พบว่าองค์ประกอบและผลผลิตไฮโดรเจนที่ได้ คือ 86.74 โมลเปอร์เซ็นต์ และ 115.33 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ อีกทั้งยังมีองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลผลิตเพียง 7.31 โมล-เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองจะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-CaO-C ช่วยส่งเสริมการผลิตไฮโดรเจนที่มีองค์ประกอบและผลผลิตของไฮโดรเจนสูง เป็นผลมาจากการทำงานร่วมกันระหว่าง Ni ที่ตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยา, CaO ที่ช่วยในการการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ที่ช่วยในการเกิดปฏิกิริยา

รีฟอร์มมิงและมีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ นอกจากนี้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-CaO-C ยังส่งผลให้เกิดโค้กดำอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นทิศทางใหม่สำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากการไพโรไลซิสร่วมกับแก๊สซิฟิเคชันของพลาสติกเหลือทิ้งและชีวมวล

Dou และคณะ [3] ทำการศึกษาการปรับปรุงการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลผ่านกระบวนการรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับ (SERP) เพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/นิกเกิลอลูมินา ( $\text{NiO}/\text{NiAl}_2\text{O}_4$ ) และตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ผลการวิจัยพบว่าการผลิตไฮโดรเจนผ่านกระบวนการรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็นสามช่วงอย่างชัดเจน ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/นิกเกิลอลูมินา ที่ถูกรีดิวซ์สามารถเปลี่ยนกลีเซอรอลและไอน้ำเป็นไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยกระบวนการรีฟอร์มมิงและปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สหรือปฏิกิริยา วอเตอร์แก๊สชิฟ (Water - Gas Shift reaction; WGS) ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตในกระบวนการสามารถกำจัดได้โดยใช้ตัวดูดซับ  $\text{CaO}$  ผลจากการทดลองพบว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับสามารถให้ผลผลิตของไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทนลดลง โดยการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ได้ผลผลิตของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และได้ไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงมากกว่า 90% งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่าการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลผ่านกระบวนการรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับจะทำให้ได้ไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์และผลผลิตสูงขึ้นอีกด้วย

Yao และคณะ [4] ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ( $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 3 วิธี คือ การตกตะกอนร่วม, การอิมเพกเนชันและการโซล-เจล เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของขยะพลาสติก 3 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง, พอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน พบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ด้วยวิธีโซล-เจล ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวมากที่สุดถึง 305.21 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม รองลงมาเป็นการเตรียมตัวเร่ง-ปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมและอิมเพกเนชันตามลำดับ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจลไปใช้ในการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของขยะพลาสติก 3 ชนิด พบว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิโพรพิลีนมีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนได้ใกล้เคียงกัน ในขณะที่พอลิสไตรีน มีปฏิกิริยาการสลายตัวมากขึ้นในสภาวะรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ส่งผลให้เกิดโค้กมากและมีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนได้มากที่สุดถึง 67 มิลลิโมลต่อกรัม

Li และคณะ [5] ศึกษาการใช้ निकเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวลเพื่อผลิตไฮโดรเจน โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น ที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส ที่มีปริมาณร้อยละโดยมวลของ निकเกิลออกไซด์คือ 2.5, 5 และ 10 พบว่าปริมาณ निकเกิลออกไซด์ที่สูงขึ้น ทำให้ผลได้ของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจาก निकเกิลออกไซด์ช่วยเร่งการเกิดแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและการแตกตัวของสารระเหยที่ได้จากไพโรไลซิสของชีวมวล แต่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลงเมื่อเทียบกับการใช้แคลเซียมออกไซด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ที่มีไม่เพียงพอต่อการดูดซับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

He และคณะ [6] ได้ทำการสังเคราะห์ Co-Ni/HTLs เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของกลีเซอรอล และใช้ไดโพลไมต์เป็นตัวดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียสจะทำให้มีผลผลิตของไฮโดรเจนสูงสุด และมีผลผลิตของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ตัวดูดซับในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สเลื่อนไปข้างหน้ามากขึ้น เป็นผลให้ได้ผลผลิตของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นและมีผลผลิตของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง

### บทที่ 3

#### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมกลีเซอรอล

- 1) กลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร
- 2) กระจกบอทดวง
- 3) เครื่องกวนสาร (Stirrer)
- 4) น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)
- 5) ปีกเกอร์
- 6) แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)

##### 3.1.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ

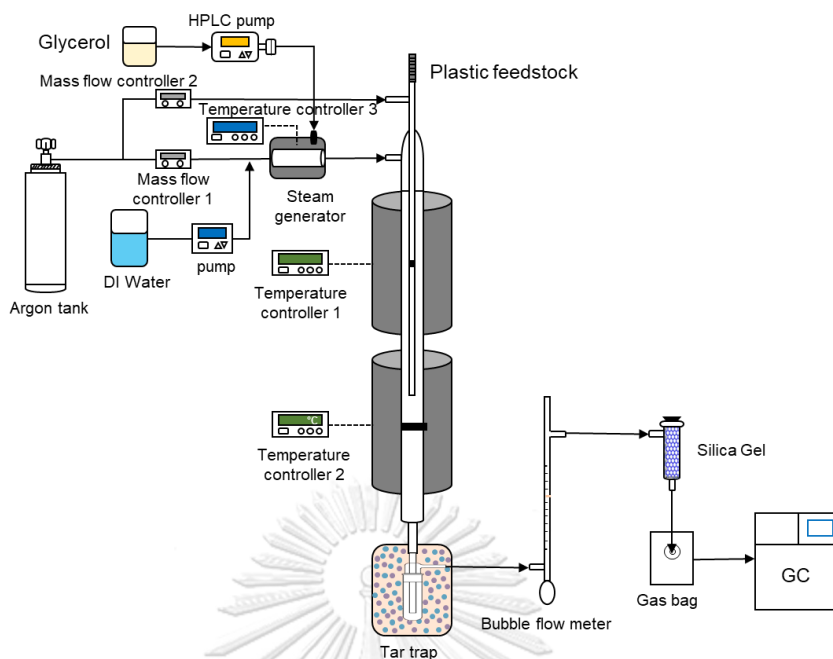
- 1) นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Nickel(II) nitrate hexahydrate)
- 2) แกมมา-อลูมินา ( $\gamma$ -Alumina)
- 3) น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)
- 4) แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต (Calcium nitrate tetrahydrate)
- 5) กรดเทเรพธาลิก (Terephthalic acid)
- 6) ไดมethylฟอร์มมาไมด์ (N,N-dimethylformamide)
- 7) เครื่องปฏิกรณ์อโตเคลฟ (Teflon-line stainless steel autoclave)
- 8) เมทานอล (Methanol)
- 9) ปีกเกอร์
- 10) เครื่องกวนสารและให้ความร้อน (Magnetic stirrer with hotplate)
- 11) แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- 12) ตู้อบแห้งสาร (Dryer)
- 13) เตาเผา (Calcination furnace)
- 14) โกร่งบดสาร (Pestle and mortar)
- 15) กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- 16) ขวดกรอง (Suction or filter flask)



17) ยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator)

### 3.1.3 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น

- 1) อาร์กอนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร
- 2) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller)
- 3) เครื่องควบคุมอัตราการนำพาแก๊ส (Carrier gas)
- 4) เครื่องผลิตไอน้ำ (Steam generator)
- 5) น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)
- 6) ปัมสำหรับป้อนน้ำ (Peristaltic pump)
- 7) สารละลายกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร
- 8) ปัมสำหรับป้อนกลีเซอรอล (HPLC pump)
- 9) เม็ดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS)
- 10) ท่อซิลิโคนสำหรับบรรจุเม็ดพลาสติก (Silicone tube)
- 11) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- 12) เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple)
- 13) เตาเผาชนิดท่อ (Tube furnace)
- 14) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น
- 15) อุปกรณ์ดักจับทาร์ (Tar trap)
- 16) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สชนิดฟองแก๊ส (Bubble flowmeter)
- 17) ซิลิกาเจล (Silica gel)
- 18) ถุงเก็บแก๊สตัวอย่างขนาด 1 ลิตร (Gas bag)



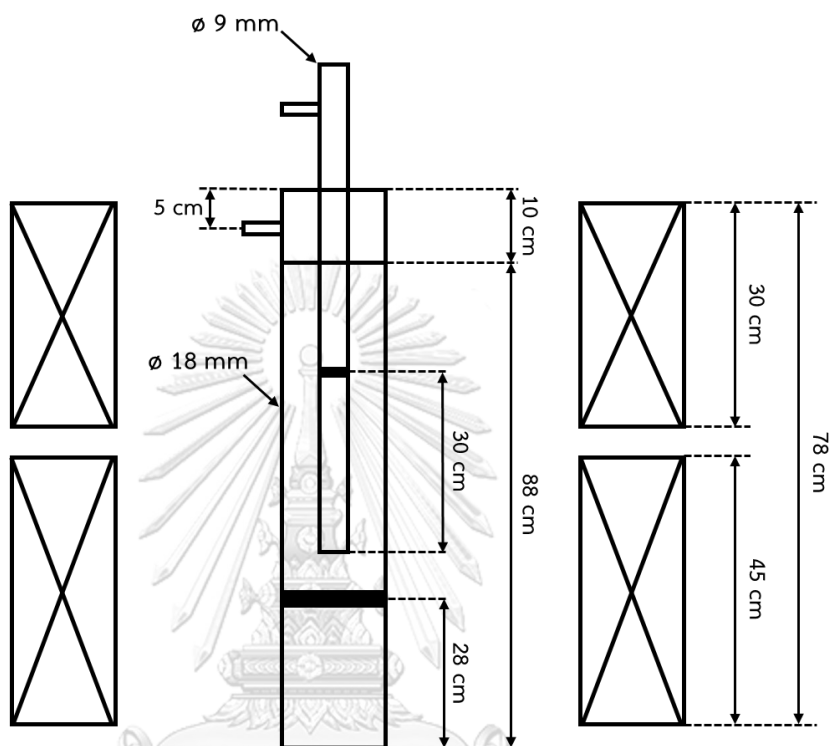
รูปที่ 3.1 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น

### 3.2 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น (2-stage fixed bed reactor) ซึ่งจะมีทั้งหมด 2 ส่วน โดยส่วนบนจะเป็นส่วนที่ปลดปล่อยสารระเหยของพลาสติกและกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส และส่วนล่างเป็นส่วนที่เกิดกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ซึ่งการใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่แบ่งเป็น 2 ส่วน ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของการปลดปล่อยสารระเหยของพลาสติกและกลีเซอรอล (Devolatile temperature) และอุณหภูมิรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming temperature) ที่แตกต่างกันได้

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยท่อควอทซ์ 2 ขนาด ดังรูปที่ 3.2 ท่อควอทซ์ขนาดเล็ก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 9 มิลลิเมตร ยาว 65 เซนติเมตร เป็นท่อปลายเปิดทั้ง 2 ด้าน ซึ่งพลาสติกจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ผ่านปลายเปิดด้านบน ที่ความยาว 30 เซนติเมตรจากปลายท่อจะมีจุดคอดสำหรับรองรับพลาสติกที่ถูกป้อนเข้ามา ซึ่งจะเกิดการไพโรไลซิสที่บริเวณนี้ และปลายท่อด้านล่างจะมีปลายเปิดด้านข้างสำหรับป้อนแก๊สตัวพา (Carrier gas) เข้าสู่กระบวนการ ส่วนท่อควอทซ์ขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 18 มิลลิเมตร ยาว 88 เซนติเมตร ซึ่งด้านบนของท่อจะมี

ปลายเปิด 1 ทางสำหรับป้อนไอน้ำและสารละลายกลีเซอรอลเข้าสู่กระบวนการ ที่ความยาว 28 เซนติเมตรจากปลายท่อควอซ์จะมีจุดคอดสำหรับรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับและเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิฟอร์มมิงที่บริเวณนี้



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งชนิดสองชั้น

### 3.3 วิธีการทดลอง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลายกลีเซอรอล

นำกลีเซอรอลที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยปริมาตรผสมกับน้ำปราศจากประจุในอัตราส่วน 1:4 จากนั้นทำการกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้สารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้เป็นสารละลายกลีเซอรอลมีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร

#### 3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ( $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จะสังเคราะห์ด้วยวิธีการอิมเพรกเนชัน (Impregnation) โดยสารตั้งต้น (Precursor) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ นิกเกิล

ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) และ แกมมา-อลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) และใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำปราศจากประจุ โดยขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีดังต่อไปนี้

- 1) ชั่งแกมมา-อลูมินา 10 กรัมผสมสารละลายกับนิกเกิลไนเตรต ที่เตรียมจากนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 4.5 กรัม ผสมกับน้ำปราศจากประจุ 20 มิลลิลิตร
- 2) ทำการปั่นกวนและระเหยที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 3) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่ถึงอุณหภูมิที่กำหนด
- 5) เมื่ออุณหภูมิของเตาเผาตกลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ให้นำสารที่สังเคราะห์ได้ออกจากเตาเผาและนำไปเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ (Desiccator) เพื่อป้องกันความชื้น

### 3.3.3 การเตรียมตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ

การสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ (Ca-MOF) จะสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) โดยใช้สารตั้งต้น (Precursor) เป็นแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) และกรดเทเรพธาลิก ( $\text{H}_2\text{BDC}$ ) และใช้ตัวทำละลายเป็นไดเมทิลฟอร์มามาไมด์ (N,N-dimethylformamide) และน้ำปราศจากประจุ โดยขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับมีดังต่อไปนี้

- 1) ชั่งแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต 1.89 กรัม และกรดเทเรพธาลิก 0.664 กรัม ผสมกับไดเมทิลฟอร์มามาไมด์ 60 มิลลิลิตรและน้ำปราศจากประจุ 20 มิลลิลิตร
- 2) ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที
- 3) วัดค่าความเป็นกรด-เบสด้วยยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator) โดยจะมีค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 6
- 4) นำสารละลายไปใส่ในเครื่องปฏิกรณ์อโตคลอว์ (Teflon-line stainless steel autoclave)

- 5) นำเครื่องปฏิกรณ์อัตโนมัติไปทำการโซลโวเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยนับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนด
- 6) ทำการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 6 องศาต่อนาที จนถึงอุณหภูมิห้อง
- 7) ทำการกรองแบบลดความดัน โดยใช้เมทานอลในการชะล้าง
- 8) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 9) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยนับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนด
- 10) เมื่ออุณหภูมิของเตาเผาตกลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ให้นำนิกเกิล/อลูมินาที่สังเคราะห์ได้ออกจากเตาเผาและนำไปเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ (Desiccator) เพื่อป้องกันความชื้น

#### 3.3.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ จะเตรียมด้วยวิธีการผสมทางกายภาพ (Physical mixing) โดยใช้นิกเกิล/อลูมินาและแคลเซียมมอฟที่สังเคราะห์มาในอัตราส่วน 1:1 มาผสมกันด้วยโกร่งบดสาร (Pestle and mortar) เป็นเวลา 10 นาที

#### 3.3.5 ขั้นตอนการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสองชั้น

- 1) เตรียมท่อควอตซ์สำหรับใช้เป็นท่อปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง โดยบรรจุควอตซ์วูล์ปริมาณ 0.05 กรัม ลงในบริเวณจุดคอดของท่อควอตซ์ขนาดเล็ก เพื่อแยกซาร์ที่เกิดจากไฟโรไลซิสออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา โดยซาร์ที่อาจเกิดขึ้นจากการทดลองจะติดอยู่ที่บริเวณนี้
- 2) บรรจุควอตซ์วูล์ปริมาณ 0.1 กรัม ลงในบริเวณจุดคอดของท่อควอตซ์ขนาดใหญ่ จากนั้นบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ปริมาณ 0.4 กรัม ลงไป หรือบรรจุ

เม็ดอลูมินาชนิดกลม (Alumina ball) 0.4 กรัม ลงไปในกรณีศึกษาภาวะที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวดูดซับ

- 3) ชั่งเม็ดพลาสติก (Plastics pellet) ปริมาณ 0.2 กรัม บรรจุลงในท่อซิลิโคน (Silicone tube) จากนั้นหนีบท่อซิลิโคนด้วยคลิปหนีบโลหะ (Metal binder) เพื่อป้องกันเม็ดพลาสติกร่วงหล่นก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง และสวมท่อซิลิโคนเข้ากับปลายเปิดด้านบนของท่อควอทซ์ขนาดเล็ก
- 4) ประกอบท่อควอทซ์ทั้ง 2 ขนาดเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับเตาเผาชนิดท่อ จากนั้นต่อสายป้อนเข้าของแก๊สอาร์กอนที่ปลายเปิดด้านข้างของท่อควอทซ์ขนาดเล็ก และติดตั้งอุปกรณ์ดักจับทาร์ที่ด้านล่างของท่อควอทซ์ขนาดใหญ่
- 5) ป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที โดยตรวจสอบการรั่วของแก๊สอาร์กอนและวัดอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดฟองแก๊ส
- 6) ป้อนไอน้ำเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการป้อนเข้าของน้ำเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาทีโดยใช้ปั๊ม (Peristaltic pump)
- 7) เปิดเตาเผาทั้งส่วนบนและส่วนล่างพร้อมกัน โดยส่วนบนจะเป็นส่วนที่เกิดกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งจะทำการศึกษาอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้ในการทดลอง 2 อุณหภูมิ ได้แก่ 600 และ 700 องศาเซลเซียส ส่วนเตาส่วนล่างจะเป็นส่วนที่เกิดกระบวนการรีฟอร์มมิง โดยจะทำการศึกษาอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ใช้ในการทดลอง 2 อุณหภูมิ ได้แก่ 700 และ 800 องศาเซลเซียส
- 8) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึงที่กำหนดจะจับเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้นและสิ่งเจือปนออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาและไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์
- 9) เมื่อครบ 30 นาที ต่อก๊าซไอน้ำเข้าสู่ปลายเปิดด้านข้างของท่อขนาดใหญ่ จากนั้นจับเวลา 10 นาที เพื่อให้ไอน้ำกระจายตัวทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์และไอน้ำแข็งลงไปบริเวณอุปกรณ์ดักจับทาร์เพื่อให้เกิดการควบแน่น
- 10) เมื่อครบ 10 นาทีจะทำการป้อนสารละลายกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตรเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ปั๊ม (HPLC pump) ด้วยอัตราการ

ไหล 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีพร้อมกับปลดคลิปหนีบโลหะออกเพื่อป้อนพลาสติกเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ โดยจะเริ่มจับเวลาและเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ทันที

- 11) เก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ถูกละ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที และวัดปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยการวัดอัตราการไหลแบบฟองอากาศ
- 12) เมื่อครบ 30 นาที ให้ปิดเตาเผา ปิดวาล์วแก๊สอาร์กอน ปิดปั๊มที่ใช้ป้อนไอน้ำ และปิดปั๊มที่ใช้ป้อนสารละลายกลีเซอรอล เมื่ออุณหภูมิของเตาเผาตกลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสให้นำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากเตาเผา
- 13) นำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบและคำนวณหาผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)
- 14) เก็บตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการใช้งานในเดซิเคเตอร์เพื่อป้องกันความชื้น ก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะต่าง ๆ ต่อไป

### 3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.4.1 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography; GC)

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography; GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมออกจากกันในสถานะแก๊ส โดยอาศัยคุณสมบัติในการละลายและความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันของสารแต่ละชนิด ซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับเพื่อระบุองค์ประกอบและปริมาณของแก๊สแต่ละชนิดในแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น Shimadzu GC-2014 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



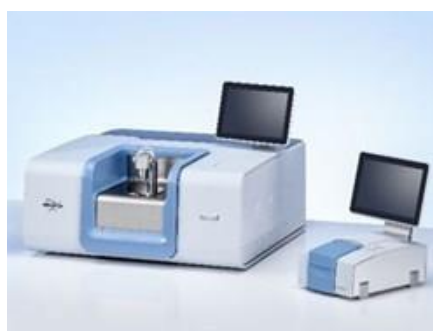
รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี [10]

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สตัวอย่าง

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)

### 3.4.2 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)

ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ เพื่อตรวจวิเคราะห์หาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลร่วมกับเทคนิคอื่น โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงกลางอินฟราเรด (Middle infrared region) ประมาณ  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่น (Stretching) หรือการหมุน (Bending) ของพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุล จะทำให้โมเลกุลดังกล่าวเกิดการดูดกลืนแสง และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล จากนั้นเครื่องมือจะวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่น (Wave number) ได้ผลเป็นสเปกตรัม ซึ่งในแต่ละพันธะของหมู่ฟังก์ชันจะแสดงค่าความยาวคลื่นเฉพาะต่างกัน โดยฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีที่ใช้ในงานวิจัยคือรุ่น INVENIO-S ของ BRUKER โดยใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่  $450-4000 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี [42]



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

เทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟลกชันสเปคโตรสโคปีถูกใช้สำหรับวิเคราะห์ตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อระบุวัฏภาค (Phase) ที่เกิดขึ้นในตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งก่อน, หลังการแคลไซน์ และหลังการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟลกชันสเปคโตรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยคือรุ่น D8 Discover ของ Bruker โดยใช้รังสีเอกซ์ชนิดคอปเปอร์ (Cu) และอัลฟาโพแทสเซียม ( $K\alpha$ ) ความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตรที่ถูกสร้างจากความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ด้วยกระแส 40 มิลลิแอมแปร์ อัตราการวิเคราะห์เท่ากับ 0.02 องศาต่อนาที และและมุมของการเลี้ยวเบน ( $2\theta$ ) ในช่วง 5 ถึง 80 องศา



รูปที่ 3.5 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟลกชันสเปคโตรสโคปี [43]

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

เทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปีถูกใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (Morphology) ของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟก่อนและหลังแคลไซน์ โดยรุ่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ JSM-IT500HR ของ JEOL InTouchScope™ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งมีกำลังขยายเท่ากับ 20,000 เท่าตัว



รูปที่ 3.6 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสปี [44]

#### 3.4.5 เทคนิคไนโตรเจนฟิซิชอร์พชันเมเชอร์เมนต์ (Nitrogen physisorption measurement; BET)

เครื่องวัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคไนโตรเจนฟิซิชอร์พชันเมเชอร์เมนต์ ที่ใช้ในการทดลองเป็นรุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับและความดันย่อยที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกบันทึกเพื่อสร้างเป็นไอโซเทอมของการดูดและการคายซับ โดยการคำนวณพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET)

CHI

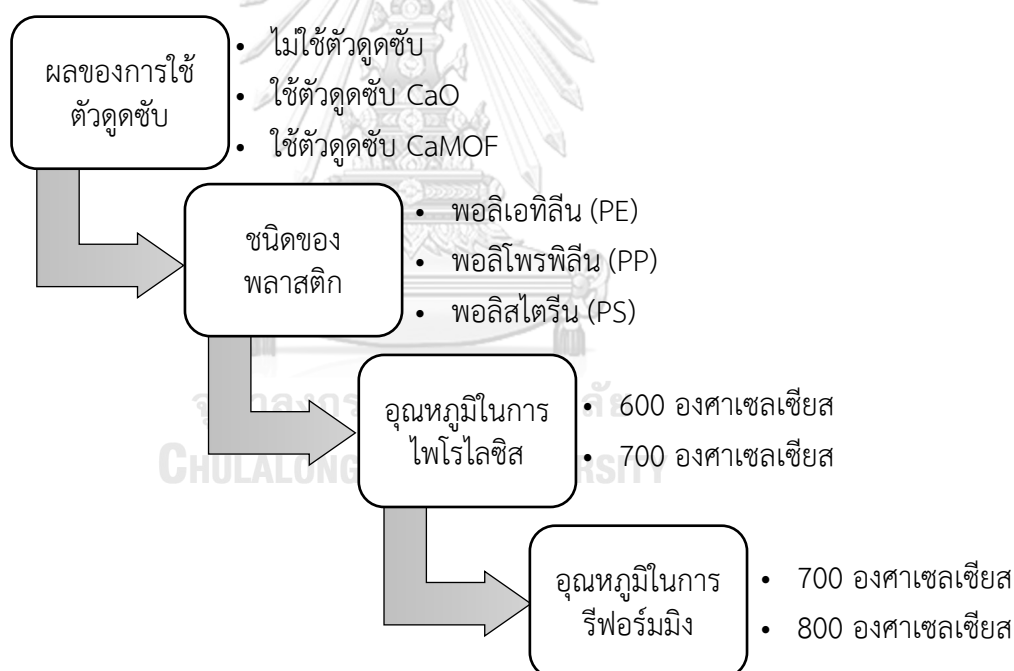


รูปที่ 3.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิว [45]

### 3.5 ตัวแปรที่ศึกษา

ในการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบนนิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ มีตัวแปรที่จะศึกษา ดังนี้

1. เปรียบเทียบเมื่อใช้ตัวดูดซับและไม่ใช้ตัวดูดซับในการผลิตไฮโดรเจนด้วยรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ
2. ชนิดของพลาสติก ได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS)
3. อุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส
4. อุณหภูมิในการรีฟอร์มมิงที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

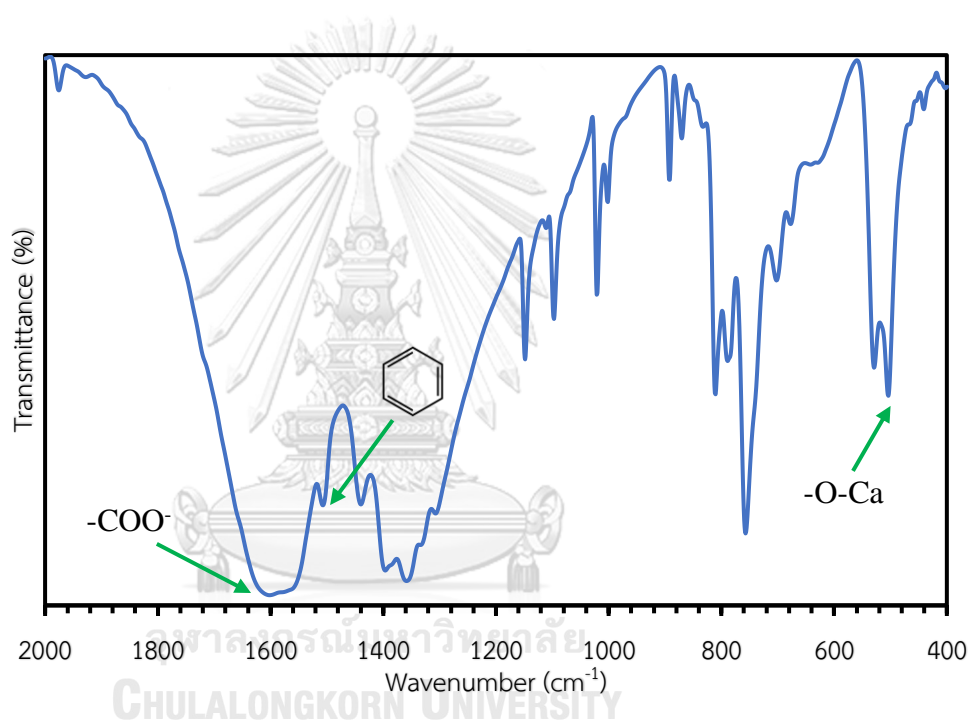
งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ( $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaMOF}$ ) ซึ่งจะทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น โดยตัวแปรที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ การใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ, อุณหภูมิไพโรไลซิสภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสม, อุณหภูมิรีฟอร์มมิงภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมและชนิดของพลาสติกที่ส่งผลต่อผลผลิตของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนดังต่อไปนี้

1. ผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟด้วยเทคนิคต่าง ๆ
2. ผลของการใช้ตัวดูดซับต่อผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส
3. ผลของชนิดพลาสติกต่อผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส
4. ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส
5. ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส

#### 4.1 ผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ

##### 4.1.1 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

องค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟถูกพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) ซึ่งจะใช้ในการบอกพิกของหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่  $450\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$



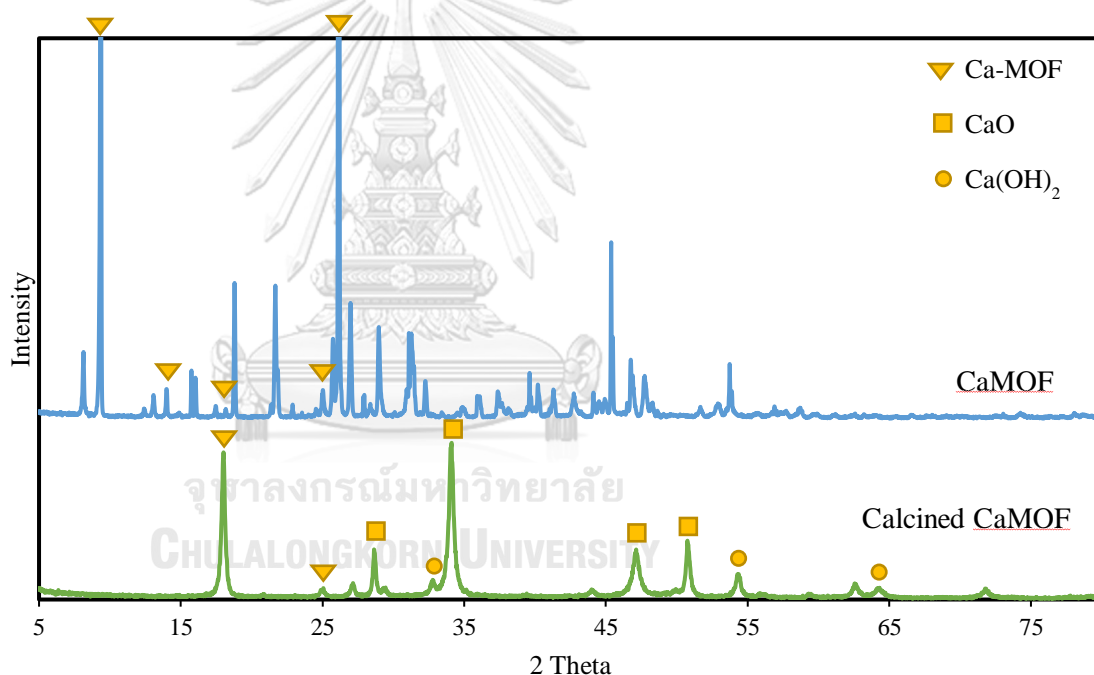
**รูปที่ 4.1** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟด้วยเทคนิค FT-IR

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟแสดงดังรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าเกิดพีคการดูดซับที่แรงของพันธะ C-O ที่ความยาวคลื่น  $1,602\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งบ่งบอกถึงการสั่นแบบยืดไม่สมมาตร (Asymmetrical stretching) ของพันธะ C-O ที่เชื่อมต่อกับหมู่ฟังก์ชันแอลคอกซีคาร์บอนิล (Alkoxy carbonyl;  $\text{COO}^-$ ) ส่วนพีคการดูดซับที่ความยาวคลื่น  $1,508\text{ cm}^{-1}$  บ่งบอกถึงการสั่นของวงเบนซีน ซึ่งผลลัพธ์ข้างต้น แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างนี้มีการสร้างพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันแอลคอกซีคาร์บอนิล ( $\text{COO}^-$ ) ของกรดเทเรพธาลิก (Terephthalic acid;  $\text{H}_2\text{BDC}$ ) และแคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) นอกจากนี้ยังเกิดพีคการดูดซับ

ที่ความยาวคลื่น  $504 \text{ cm}^{-1}$  ที่บ่งบอกถึงการสั่นของพันธะ  $\text{-O-Ca}$  ซึ่งพีคการดูดซับที่กล่าวมาข้างต้น บ่งบอกถึงการเกิดคาร์บอนेटในโครงสร้าง ซึ่งผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีจากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่าตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นมาเป็นโครงสร้างของแคลเซียมมอฟ

#### 4.1.2 เอกซ์เรย์ดิฟแฟลกชันสเปกโตรสโคปี

เทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟลกชันสเปกโตรสโคปี (X-ray diffraction spectroscopy; XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟ ที่  $2\theta$  ( $2\Theta$ ) ตั้งแต่  $5-80$  องศา



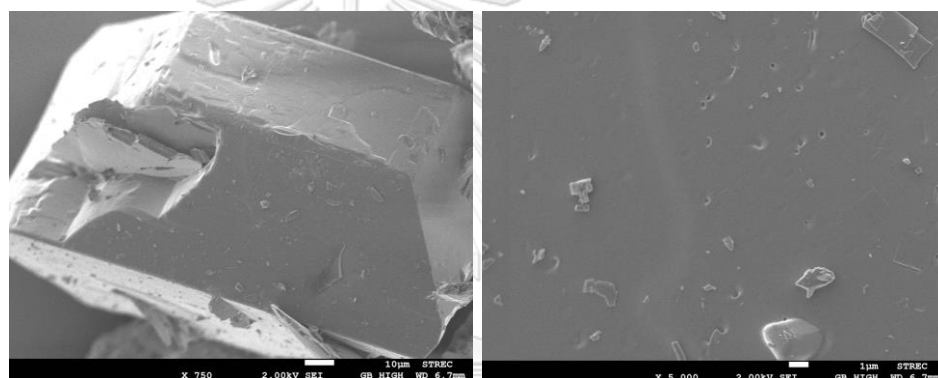
**รูปที่ 4.2** ผลการวิเคราะห์หาวิฤภาคองค์ประกอบของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟด้วยเทคนิค XRD

ผลการวิเคราะห์หาวิฤภาคองค์ประกอบของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟแสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์หาวิฤภาคองค์ประกอบของแคลเซียมมอฟจะปรากฏความเข้มพีค (Intensity peak) ที่  $2\theta$  ประมาณ  $8.2^\circ$ ,  $12.5^\circ$ ,  $13.1^\circ$ ,  $17.6^\circ$ ,  $25.2^\circ$  และ  $26.1^\circ$  ซึ่งบ่งบอกถึงเฟสของแคลเซียมมอฟ และสามารถยืนยันได้ว่าตัวดูดซับที่สังเคราะห์มาเป็นโครงสร้างของแคลเซียมมอฟ และเมื่อนำแคลเซียมมอฟไป

แคลไซต์แล้วนำไปวิเคราะห์หาวัฏภาคองค์ประกอบของตัวดูดซับแคลไซต์แคลเซียมมอฟพบว่าเกิดความเข้มพีคที่ 2 Theta ประมาณ  $17.6^{\circ}$  และ  $25.2^{\circ}$  ซึ่งเป็นความเข้มพีคของแคลเซียมมอฟ และพบความเข้มพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 2 Theta ประมาณ  $33.2^{\circ}$ ,  $54.4^{\circ}$  และ  $64.1^{\circ}$  นอกจากนี้ยังพบความเข้มพีคของแคลเซียมออกไซด์ที่ 2 Theta ประมาณ  $28.7^{\circ}$ ,  $34.0^{\circ}$ ,  $47.2^{\circ}$  และ  $50.8^{\circ}$

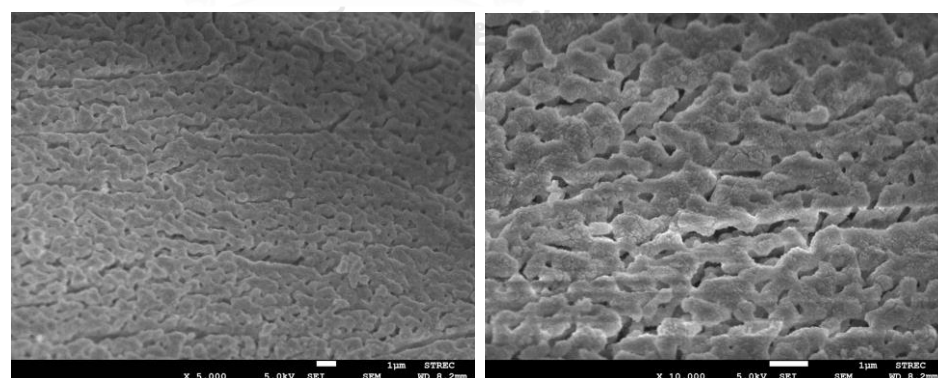
#### 4.1.3 สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี

เทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Scanning electron microscopy; SEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซต์แคลเซียมมอฟ



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

**รูปที่ 4.3** ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของแคลเซียมมอฟ (ก), (ข) และตัวดูดซับแคลไซต์แคลเซียม-มอฟ (ค), (ง) ด้วยเทคนิค SEM

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟแสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าแคลเซียมมอฟจะมีลักษณะเป็นผลึกของแข็งที่มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบซึ่งแสดงในรูป 4.3ก และ 4.3ข ส่วนในรูปที่ 4.3ค และ 4.3ง แสดงลักษณะสัณฐานของตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟ ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟมีความเป็นรูพรุนที่สม่ำเสมอซึ่งแตกต่างจากลักษณะพื้นผิวของแคลเซียมมอฟก่อนแคลไซน์อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเมื่อนำแคลเซียมมอฟไปแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โครงสร้างของแคลเซียมมอฟจะเกิดการสลายเป็นแคลเซียมออกไซด์อย่างสมบูรณ์แบบ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับในงานวิจัย เพื่อผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับได้

#### 4.1.4 เทคนิคไนโตรเจนฟิซิชอร์ปชันเมเซอร์เมนต์

เทคนิคไนโตรเจนฟิซิชอร์ปชันเมเซอร์เมนต์ (Nitrogen physisorption measurement; BET) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟ

**ตารางที่ 4.1** พื้นที่ผิวของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟ

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)
แคลเซียมมอฟ (CaMOF)	3.45
แคลไซน์แคลเซียมมอฟ (Calcined CaMOF)	13.61

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟแสดงดังตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าแคลเซียมมอฟก่อนแคลไซน์จะมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 3.45 ตารางเมตรต่อกรัม แต่เมื่อนำแคลเซียมมอฟไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟจะมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 13.61 ตารางเมตรต่อกรัม จะเห็นว่า พื้นที่ผิวของตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของแคลเซียมมอฟและตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟด้วยเทคนิค SEM ที่พบว่า ลักษณะพื้นผิว



ของตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟมีความเป็นรูพรุนที่สม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างจากลักษณะพื้นผิวของแคลเซียมมอฟก่อนแคลไซน์ โดยมีลักษณะเป็นผลึกของแข็งที่มีพื้นผิวก่อนข้างเรียบ

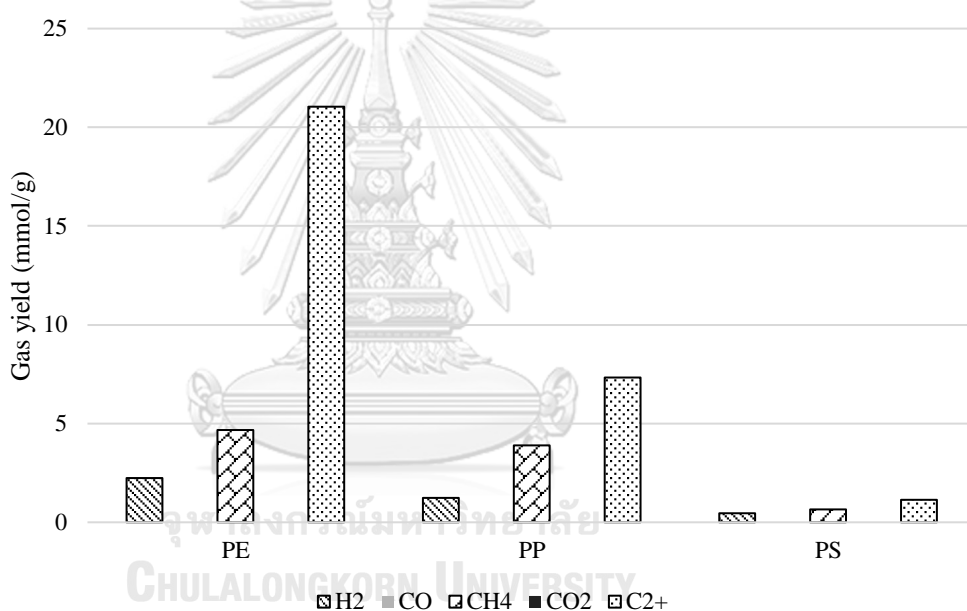
จากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR), เทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟลกชันสเปคโตรสโคปี (XRD), เทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (SEM) และเทคนิคไนโตรเจนฟิซิชอร์พชันเมเซอร์เมนต์ (BET) แสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับแคลไซน์แคลเซียมมอฟเหมาะสำหรับการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับในการผลิตไฮโดรเจนกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับในงานวิจัยนี้

#### 4.2 ผลของการใช้ตัวดูดซับต่อผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส

ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ จากการศึกษาพบว่า แคลเซียมมอฟมีความเสถียรในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับที่เสื่อมสภาพไว ทำให้มีความเสถียรในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อย โดยตัวดูดซับแคลเซียมมอฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) โดยใช้สารตั้งต้น (Precursor) เป็นแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) และกรดเทเพธาอิก ( $\text{H}_2\text{BDC}$ ) และใช้ตัวทำละลายเป็นไดเมทิลฟอร์มามิด (N,N-dimethylformamide) และน้ำปราศจากประจุ ซึ่งจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคทั้งหมด บ่งบอกว่าตัวดูดซับแคลเซียมมอฟมีคุณสมบัติในการใช้เป็นตัวดูดซับโดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ จากการศึกษาพบว่า การใช้ตัวดูดซับในการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ จะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาอวอเทอร์แก๊สซิฟเลื่อนไปข้างหน้ามากขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยหลักของงานวิจัยนี้

ในการทดลองนี้จะใช้พลาสติกเป็นสารตั้งต้น โดยทำการป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น ในส่วนนี้เป็นส่วนที่จะเกิดกระบวนการไพโรไลซิส

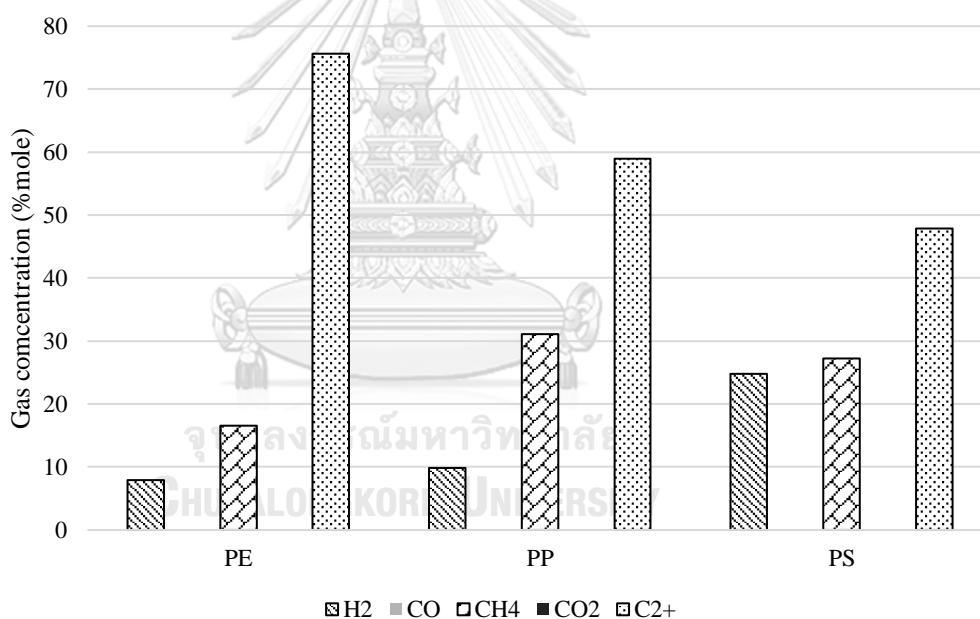
ขึ้น โดยไพโรไลซิสถือเป็น กระบวนการรีไซเคิลทางเคมีด้วยความร้อนและเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการนำมาผลิตพลังงานที่มีประโยชน์จากพลาสติกเหลือใช้ ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดที่พบในชีวิตประจำวันนั้น แต่ละชนิดจะมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้เลือกชนิดของพลาสติกที่สามารถพบได้ทั่วไป ได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) มาใช้ในการทดลองเพื่อผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ซึ่งพลาสติกเหล่านี้จะถูกดำเนินการภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยใช้พลาสติก 0.2 กรัม ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการป้อนเข้าของน้ำ 0.2 มิลลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งการทดลองนี้จะไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ



รูปที่ 4.4 ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้พลาสติกที่แตกต่างกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียสของพลาสติกทั้งสามชนิด มีผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน โดยพอลิเอทิลีนให้ผลได้ของไฮโดรเจนมากที่สุดถึง 2.25 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก เนื่องจากโครงสร้างของ

พอลิเอทิลีนมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรง ทำให้เกิดการแตกตัวได้ง่าย รองลงมาเป็นพอลิโพรพิลีน ซึ่งให้ผลได้ของไฮโดรเจน 1.23 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก และพอลิสไตรีนให้ผลได้ของไฮโดรเจน น้อยที่สุดเท่ากับ 0.44 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก และจากรูปที่ 4.5 พบว่าองค์ประกอบของ ไฮโดรเจนที่ได้จากพอลิสไตรีนมีค่าสูงที่สุดถึงร้อยละ 24.84 โดยโมล รองลงมาเป็นพอลิโพรพิลีน ซึ่งให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนร้อยละ 9.87 โดยโมล และพอลิเอทิลีนให้องค์ประกอบของ ไฮโดรเจนร้อยละ 7.87 โดยโมล ซึ่งใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีน และจากผลการทดลองของ พลาสติกทั้งสามชนิด พบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่มีคาร์บอนมอนอกไซด์และ คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นเลยซึ่งเป็นผลมาจากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ อาจจะทำให้ไม่เกิดกระบวนการรีฟอร์มมิง จึงไม่พบคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์

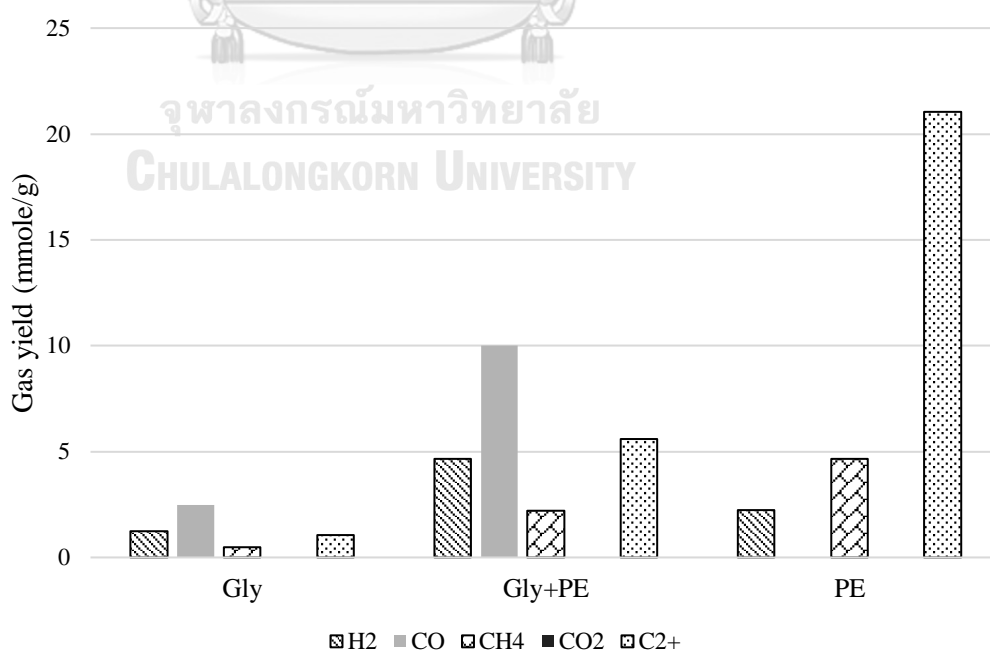


รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้พลาสติกที่แตกต่างกันใน กระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

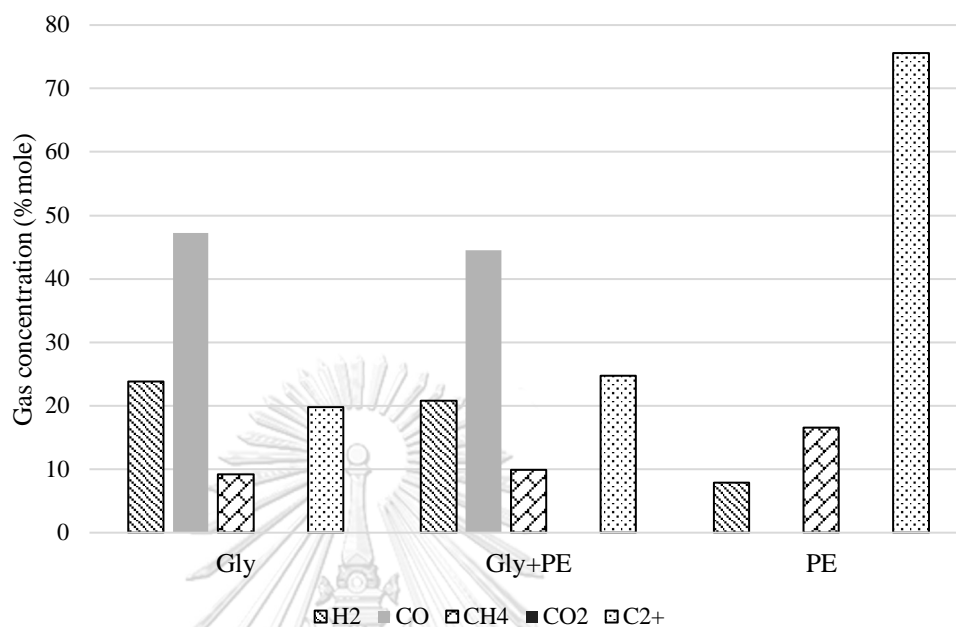
จากการทดลองก่อนหน้าพบว่า พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนให้ผลได้ของไฮโดรเจนมากที่สุด เป็นผลให้ในการทดลองต่อไปจะใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนในการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ กลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเป็นสารป้อนเดี่ยวและสารป้อนร่วมในกระบวนการ

ไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ ผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับแสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและกลีเซอรอลเป็นสารป้อนร่วม จะให้ผลได้ของไฮโดรเจนมากกว่าการใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนหรือกลีเซอรอลเป็นสารป้อนเดี่ยว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการทำงานร่วมกันได้ดีของพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและกลีเซอรอล และจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้กลีเซอรอลเป็นสารป้อนจะให้ผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าผลได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเกิดจากการใช้กลีเซอรอลมาใช้เป็นสารป้อนร่วม และจากรูปที่ 4.7 พบว่าองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการใช้กลีเซอรอลมีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน ส่วนการใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเป็นสารป้อนเดี่ยวจะให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนน้อยที่สุด

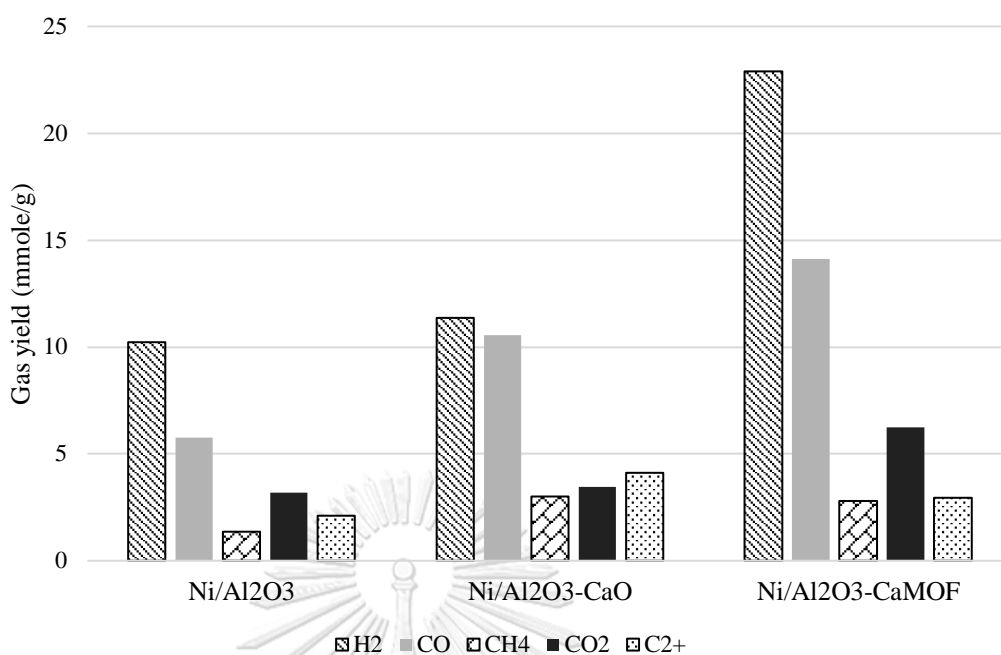


รูปที่ 4.6 ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนที่แตกต่างกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนที่แตกต่างกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

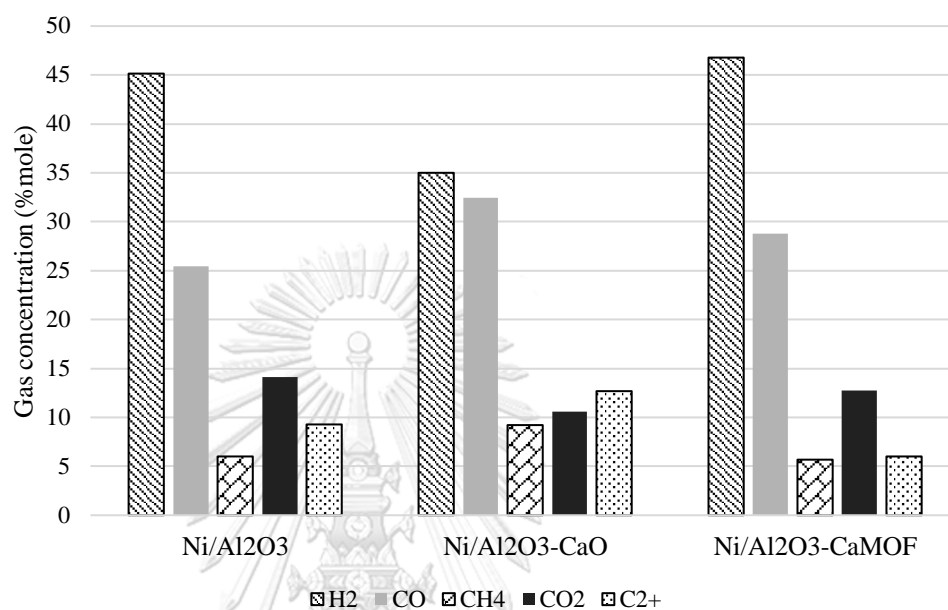
เนื่องจากการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการใช้กลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเป็นสารป้อนเดี่ยวและสารป้อนร่วม พบว่าการใช้กลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนให้ผลได้ของไฮโดรเจนมากที่สุด เป็นผลให้งานวิจัยนี้สนใจที่จะนำกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนมาใช้ในการศึกษาผลของการใช้ตัวดูดซับ ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา โดยจะเปรียบเทียบการใช้ตัวดูดซับที่แตกต่างกันและไม่ใช้ตัวดูดซับ



**รูปที่ 4.8** ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยตัวดูดซับที่แตกต่างกันและไม่ใช้ตัวดูดซับในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยตัวดูดซับที่แตกต่างกันและไม่ใช้ตัวดูดซับในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา พบว่าการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาให้ผลได้ของไฮโดรเจนมากที่สุดถึง 22.91 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนรวม รองลงมาเป็นการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ซึ่งให้ผลได้ของไฮโดรเจนเท่ากับ 11.37 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนรวม และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวดูดซับจะให้ผลได้ของไฮโดรเจนน้อยที่สุด เท่ากับ 10.22 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนรวม เนื่องจากการใช้ตัวดูดซับร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาจะทำให้ตัวดูดซับเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ ทำให้สมดุลของปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สซิฟเลื่อนไปข้างหน้ามากขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง นอกจากนี้ในการทดลอง พบว่า การใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์มากกว่าการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ แสดงให้

เห็นว่าแคลเซียมมอฟมีความสามารถในการทำงานร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาได้ดีกว่าการใช้แคลเซียมออกไซด์



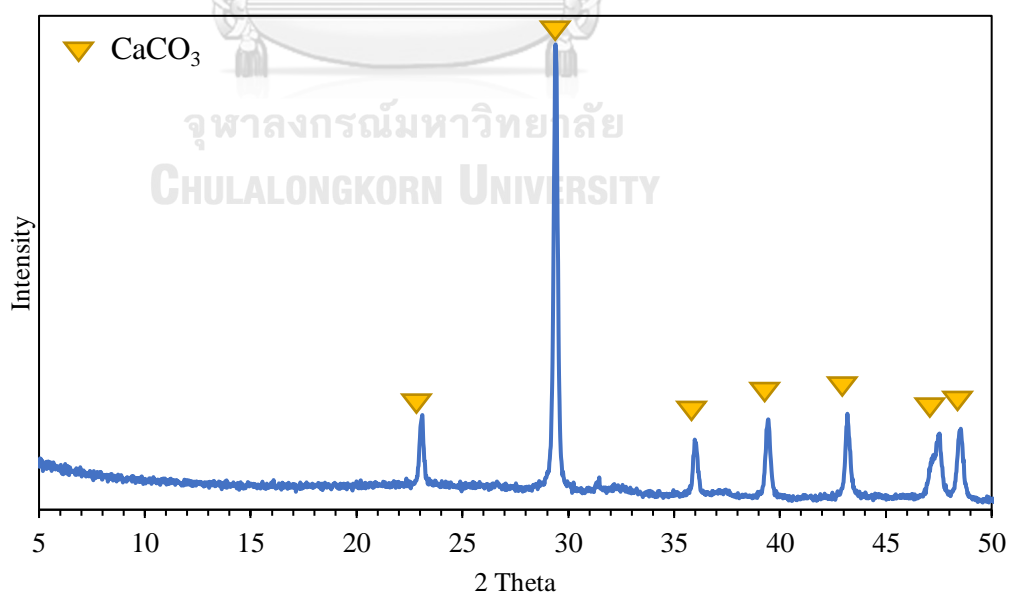
**รูปที่ 4.9** องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยตัวดูดซับที่แตกต่างกันและไม่ใช้ตัวดูดซับในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ

จากรูปที่ 4.9 แสดงองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยตัวดูดซับที่แตกต่างกันและไม่ใช้ตัวดูดซับในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา พบว่าการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาเพียงอย่างเดียว และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของไฮโดรเจนจากการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์และตัวดูดซับแคลเซียมมอฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา พบว่า การใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนมากกว่า อีกทั้งยังให้องค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินามีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา



รูปที่ 4.10 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟก่อนการใช้งาน

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบวัญภาคองค์ประกอบของแคลเซียมมอฟหลังการใช้งาน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟลกชันสเปคโตรสโคปี (XRD) ที่ 2 Theta ( $2\theta$ ) ตั้งแต่ 5-80 องศา แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์หาวัฏภาคองค์ประกอบของแคลเซียมมอฟหลังการใช้งาน ด้วยเทคนิค XRD



จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์หาวัฏภาคองค์ประกอบของแคลเซียมมอฟหลังการใช้งานจะปรากฏความเข้มพีค (Intensity peak) ที่ 2 Theta ประมาณ 23.0°, 29.4°, 36.0°, 39.4°, 42.2°, 47.4° และ 48.6° ซึ่งบ่งบอกถึงเฟสของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากผลการวิเคราะห์หาวัฏภาคองค์ประกอบของแคลเซียมมอฟหลังการใช้งานสอดคล้องกับการทดลองใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าตัวดูดซับแคลเซียมมอฟมีความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและกลีเซอรอลได้



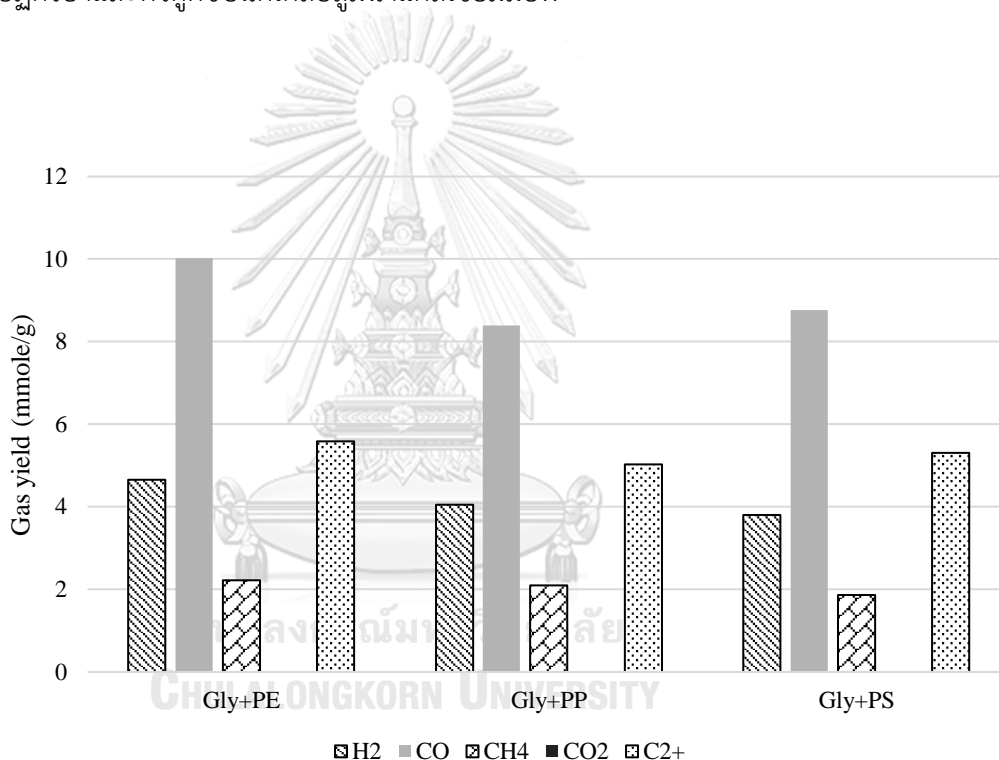
รูปที่ 4.12 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟหลังการใช้งาน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.3 ผลของชนิดพลาสติกต่อผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส

ในการทดลองนี้จะใช้พลาสติกเป็นสารป้อนร่วมกับกลีเซอรอล โดยทำการป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น ซึ่งชั้นแรกจะเป็นส่วนที่จะเกิดกระบวนการไพโรไลซิสขึ้น โดยกระบวนการไพโรไลซิสถือเป็น กระบวนการรีไซเคิลทางเคมี โดยใช้ความร้อนและเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการนำมาผลิตพลังงานที่มีประโยชน์จากพลาสติกเหลือใช้ ซึ่งพลาสติกทุกชนิดจะมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอน (HC) จำนวน

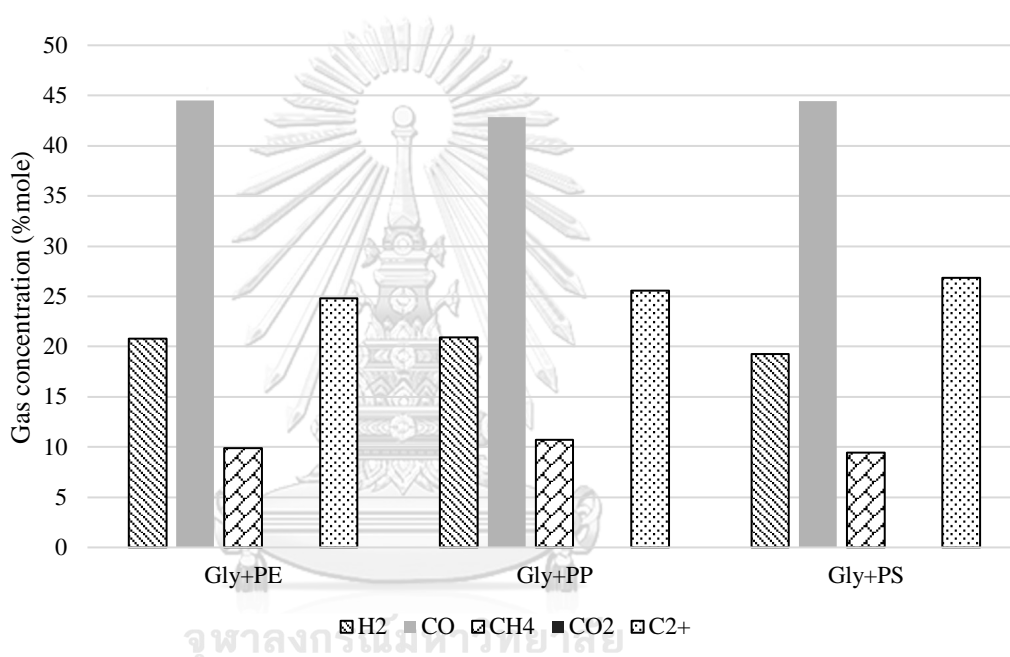
มาก โดยพลาสติกแต่ละชนิดที่พบในชีวิตประจำวันนั้น แต่จะมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกชนิดของพลาสติกที่สามารถพบได้ทั่วไป ได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) มาใช้ในการทดลองเพื่อผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ ซึ่งพลาสติกเหล่านี้จะถูกดำเนินการภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยใช้พลาสติก 0.2 กรัมและกลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิไพลอสซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการป้อนเข้าของน้ำ 0.2 มิลลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับนิกเกิลลูมินาแคลเซียมมอฟ



**รูปที่ 4.13** ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกันในกระบวนการไพลอสซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.13 แสดงผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกันในกระบวนการไพลอสซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิไพลอสซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศา

เซลเซียส พบว่าการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนให้ผลได้ของไฮโดรเจนมากที่สุดถึง 4.65 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม เนื่องจากพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนมีโครงสร้างทางเคมีเป็นโซ่ตรงทำในเกิดการสลายตัวได้ง่าย รองลงมาเป็นการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน ซึ่งให้ผลได้ของไฮโดรเจน 4.05 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม และการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนให้ผลได้ของไฮโดรเจนน้อยที่สุด เท่ากับ 3.80 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม

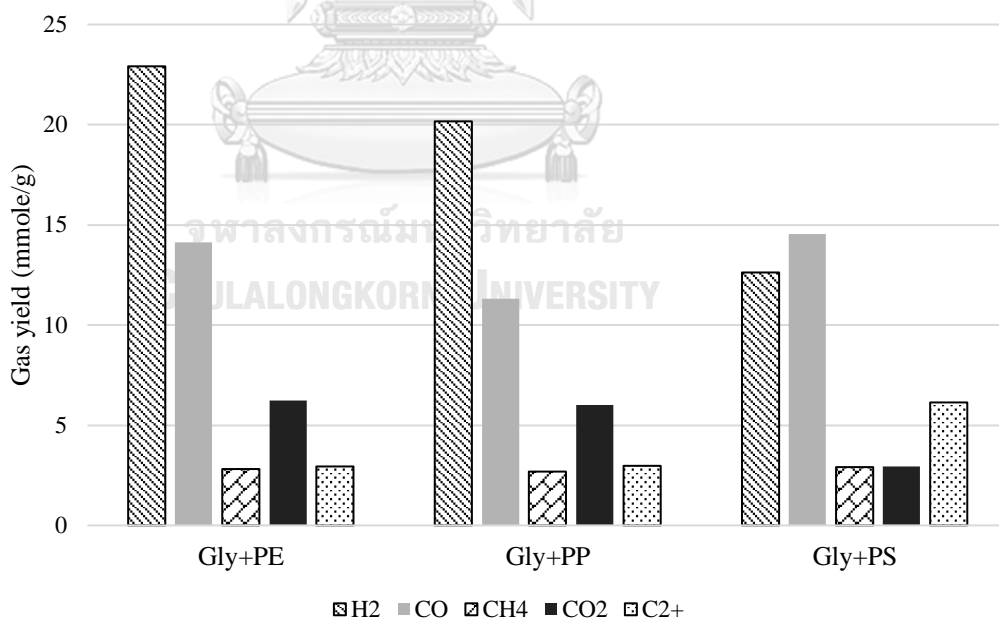


**รูปที่ 4.14** องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.14 แสดงองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนใกล้เคียงกับการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน เท่ากับ ร้อยละ 20.81 โดยโมล และร้อยละ 20.89 โดยโมล

ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกัน ทำให้เกิดการแตกตัวได้คล้ายกัน ส่วนการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนน้อยที่สุด และจากผลของการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกทั้งสามชนิดจะเห็นว่า ไม่มีองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการที่ไม่ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้ไม่สามารถเกิดการปฏิกิริยาบางปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ได้

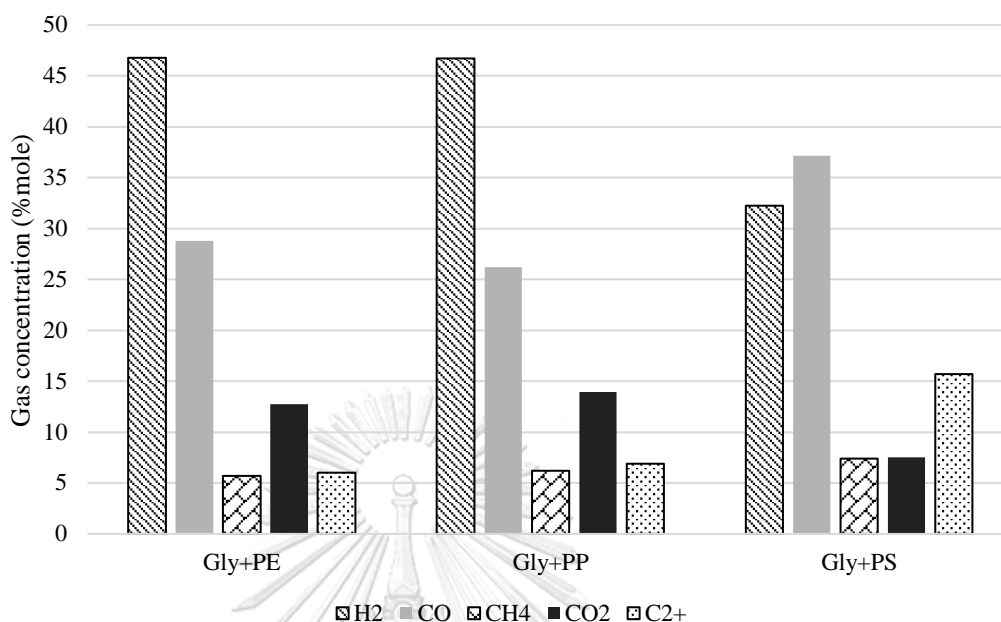
การทดลองต่อมาจะเป็นการทดลองเพื่อผลิตไฮโดรจากสารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกทั้งสามชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) โดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ



**รูปที่ 4.15** ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ

ผลการทดลองการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกัน ในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟแสดงดังรูปที่ 4.15 จากการทดลองพบว่าการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน ให้ผลได้ของไฮโดรเจนมากที่สุดถึง 22.91 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม รองลงมาเป็นการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน ซึ่งให้ผลได้ของไฮโดรเจนเท่ากับ 20.15 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม สังเกตว่าการใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนจะให้ผลได้ของไฮโดรเจนใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พลาสติกทั้งสองชนิดนี้มีโครงสร้างทางเคมีใกล้เคียงกัน และมีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีผลได้ของไฮโดรเจนและแก๊สตัวอื่น ๆ ทั้งคาร์บอนมอนอกไซด์, มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน ให้ผลได้ของไฮโดรเจนน้อยที่สุด เท่ากับ 12.62 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนมีหมู่ฟังก์ชันของอะโรมาติก (Aromatic) ทำให้เกิดการสลายตัวได้ยากกว่าพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับได้ไม่ดี เป็นผลให้มีผลได้ของไฮโดรเจนน้อยที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากรูปที่ 4.13 กับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟจากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน ให้ผลได้ของไฮโดรเจนมากที่สุด ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 4.65 เป็น 22.91 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากการผลิตไฮโดรเจนของสารป้อนร่วมชนิดอื่นก็พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ผลได้ของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น โดยการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนให้ผลได้ของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 4.05 เป็น 20.15 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม และการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนให้ผลได้ของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 3.80 เป็น 12.61 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มผลได้ของไฮโดรเจน



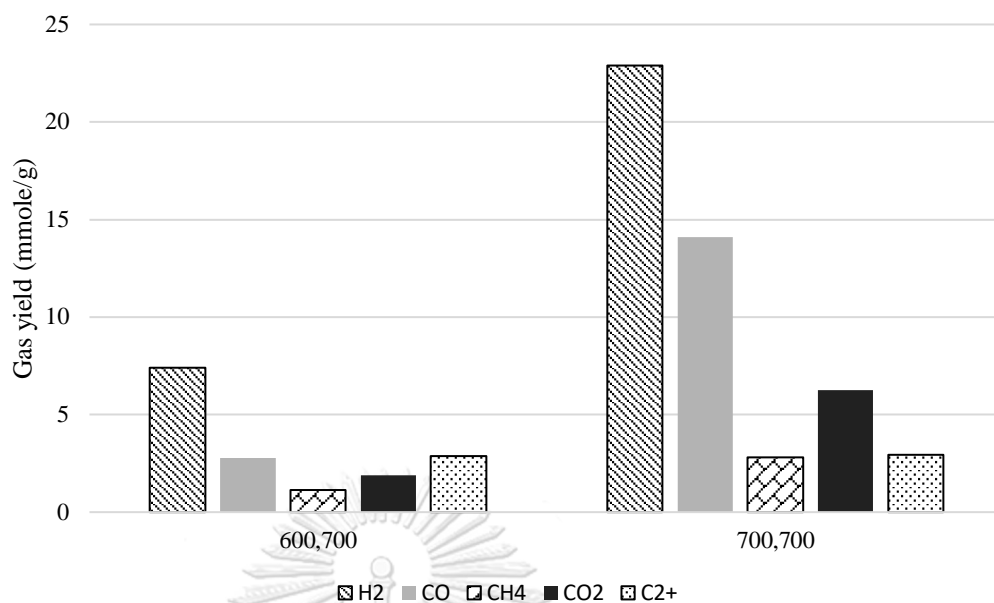
**รูปที่ 4.16** องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ

จากรูปที่ 4.16 แสดงองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกต่างชนิดกันในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนใกล้เคียงกับการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน เท่ากับ ร้อยละ 46.76 โดยโมล และร้อยละ 46.72 โดยโมล ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกัน ทำให้เกิดการแตกตัวได้คล้ายกัน ส่วนการใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 32.23 โดยโมล

#### 4.4 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการทางเคมีความร้อนที่เปลี่ยนรูปของชีวมวลพลาสติก รวมถึงยางที่ใช้แล้ว เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าทางความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมัน (Bio-oil) และก๊าซไม่กลั่นตัว (Non-condensable gas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง 500-800 องศาเซลเซียส ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สภาพในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการที่เหมาะสมวิธีหนึ่งในการเปลี่ยนพลาสติกให้เป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สได้มากกว่ากระบวนการอื่น เนื่องจากกระบวนการนี้จะทำให้ให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยเป็นการทำลายพันธะเคมีในโครงสร้างของพลาสติกด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 400 – 800 องศาเซลเซียส งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาอุณหภูมิในการไพโรไลซิสพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน เพื่อผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยทำการกำหนดอุณหภูมิรีฟอร์มมิงเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส และศึกษาการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส ทั้งหมดจะถูกดำเนินการในสถานะเดียวกัน : ใช้สารป้อนร่วมเป็นกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร, ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ 0.4 กรัม และอัตราการป้อนเข้าของน้ำ 0.2 มิลลิตรต่ออนาที เป็นเวลา 30 นาที

การทดลองการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน ที่มีต่อผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจน จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของกลีเซอรอลและพลาสติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.17



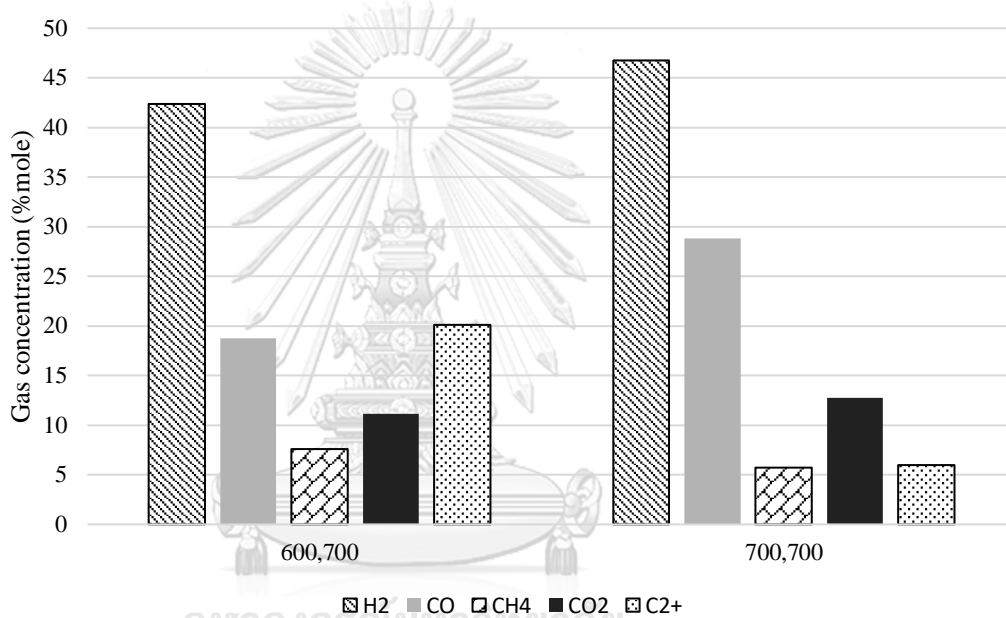
**รูปที่ 4.17** ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.17 พบว่าการใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับให้ผลได้ของไฮโดรเจนมากกว่าการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลได้ของไฮโดรเจนเท่ากับ 22.91 และ 7.41 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส ในการไพโรไลซิสพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน สามารถทำให้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเกิดการสลายตัวได้ดีกว่าการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีผลได้ของไฮโดรเจนมากกว่า ทำให้อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการไพโรไลซิสพลาสติก คือ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.18 แสดงองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส



และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ พบว่าการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนร้อยละ 46.76 โดยโมล ซึ่งมากกว่าการใช้ อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 องศาเซลเซียส ซึ่งให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนร้อยละ 42.37 โดย โมล เป็นผลมาจากการใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส ทำให้พลาสติกชนิด พอลิเอทิลีนแตกตัวมากกว่า ทำให้เกิดปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริม ด้วยการดูดซับได้มากกว่า

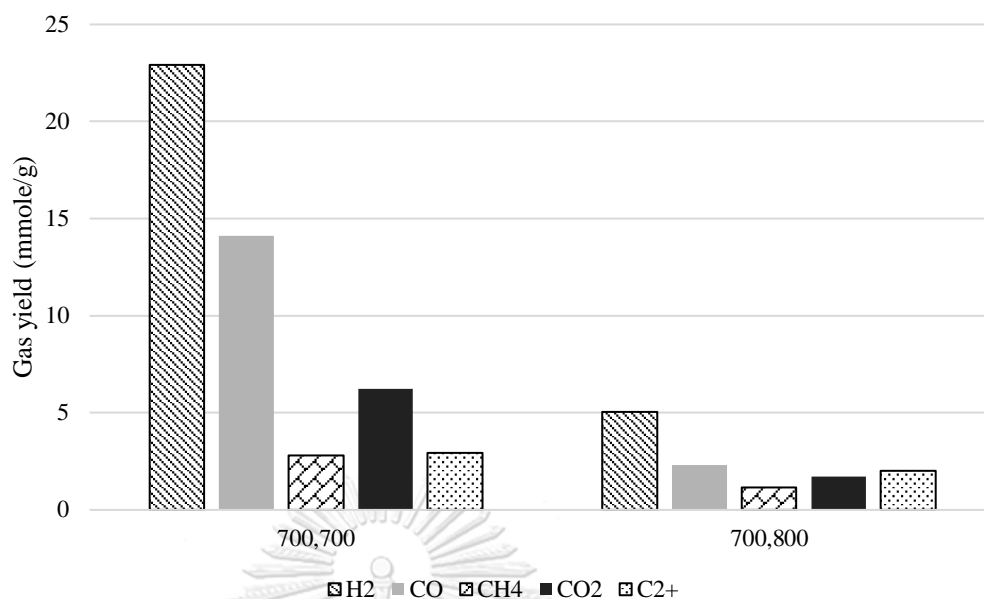


**รูปที่ 4.18** องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอล และพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 องศาเซลเซียส

#### 4.5 ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส

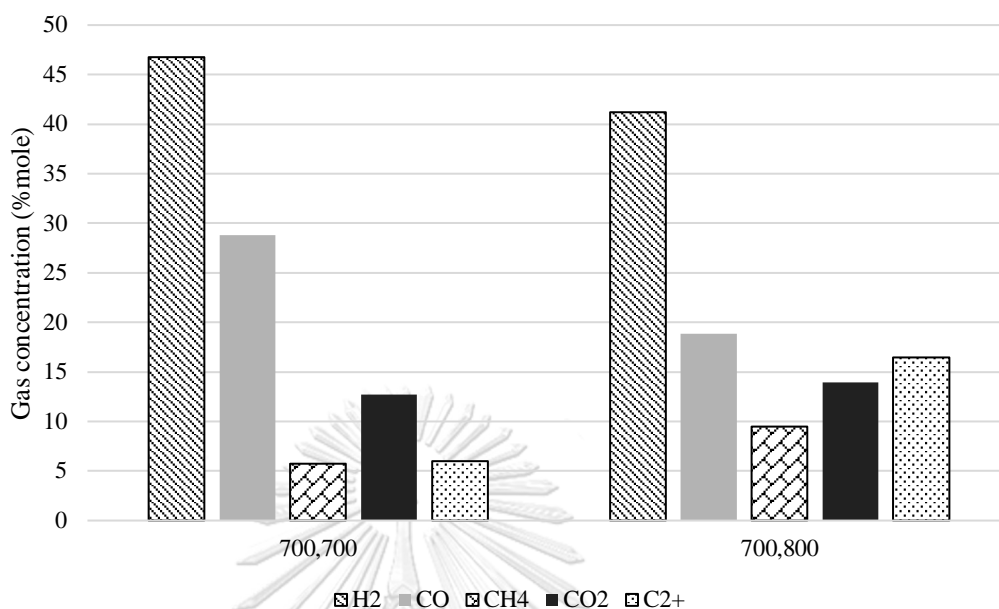
กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เป็นกระบวนการที่ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของกลีเซอรอลและพลาสติกโดยทำปฏิกิริยากับไอน้ำ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นซินแก๊ส ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) นอกจากนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water-gas shift reaction) ที่ส่งเสริมให้เกิดผลผลิตของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นได้ โดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ จะเกิดขึ้นภายในส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่มีผลต่อผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจน จากการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนโดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมิน-แคลเซียมมอฟ โดยกำหนดให้ อุณหภูมิในการไพโรไลซิส เท่ากับ 700 องศาเซลเซียส และศึกษาอุณหภูมิรีฟอร์มมิง ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส ทั้งหมดจะถูกดำเนินการในสภาวะเดียวกัน : ใช้สารป้อนร่วมเป็นกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร, ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ 0.4 กรัม และอัตราการป้อนเข้าของน้ำ 0.2 มิลลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.19** ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยใช้อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.19 แสดงผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ โดยใช้อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิรีฟอร์มมิงจากอุณหภูมิ 700 เป็น 800 องศาเซลเซียส จะให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์รวมลดลง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงจะส่งผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอาจจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการ sintering กลายเป็นนิกเกิลอะลูมิเนต ทำให้เร่งปฏิกิริยาได้ไม่ดี นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิสูงทำให้ตัวดูดซับเกิดการดูดซับได้ไม่ดี เนื่องจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อนเล็กน้อย ซึ่งมักจะใช้ตัวดูดซับในการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600-700 องศาเซลเซียส จึงเป็นผลให้การใช้อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 800 องศาเซลเซียส ให้ผลได้ของไฮโดรเจนเท่ากับ 5.05 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้อุณหภูมิในการรีฟอร์มมิงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสให้ผลได้ของไฮโดรเจนมากกว่า ซึ่งให้ผลได้ของไฮโดรเจนถึง 22.91 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม



**รูปที่ 4.20** องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ โดยใช้อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.20 แสดงองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้สารป้อนร่วมระหว่างกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ โดยใช้อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ต่างกัน และอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิรีฟอร์มมิงจากอุณหภูมิ 700 เป็น 800 องศาเซลเซียส จะให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนลดลงจากร้อยละ 46.76 โดยโมล เป็นร้อยละ 41.20 โดยโมล ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้อุณหภูมิสูง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการ sintering กลายเป็นนิกเกิลอะลูมิเนต ทำให้เร่งปฏิกิริยาได้ไม่ดี และการใช้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการดูดซับได้ไม่ดี เป็นผลให้องค์ประกอบของไฮโดรเจนลดลง

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอลบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ( $Ni/Al_2O_3-CaMOF$ ) โดยศึกษาผลของตัวดูดซับแคลเซียมมอฟ ที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการรีฟอร์มมิงที่เสริมด้วยการดูดซับ เพื่อเพิ่มผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจน ต่อมาศึกษาผลของชนิดพลาสติกที่ใช้เป็นสารป้อนร่วมกับกลีเซอรอล ที่ส่งผลต่อผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจน โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน จากนั้นศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน และศึกษาผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1. ผลของการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟต่อผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ให้ผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา และการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา พบว่าการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมมอฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ให้ผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนมากกว่าการใช้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา เนื่องจากตัวดูดซับแคลเซียมมอฟมีความเสถียรในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์

5.1.2.ผลของชนิดพลาสติกต่อผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การใช้สารป้อนร่วมระหว่างพลาสติกและกลีเซอรอล ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ให้ผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนมากกว่าการใช้กลีเซอรอลหรือพลาสติกเป็นสารป้อนเดี่ยว ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการใช้พลาสติกและกลีเซอรอลเป็นสารป้อนร่วมจะส่งเสริมให้เกิดการทำงานร่วมกันได้ดีกว่า

นอกจากนี้สามารถสรุปได้ว่าการใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเป็นสารป้อนร่วมกับกลีเซอรอลในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ให้ผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนมากที่สุด รองลงมาเป็นพอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน ตามลำดับ

5.1.3.ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสจาก 600 เป็น 700 องศาเซลเซียสในการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนโดยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส จะทำให้ผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงจะทำให้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเกิดการสลายตัวได้ดีกว่าการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสต่ำ

5.1.4.ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการรีฟอร์มมิงจาก 700 เป็น 800 องศาเซลเซียสในการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนโดยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส จะทำให้ผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนลดลง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิสสูง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการ sintering กลายเป็นนิกเกิลอะลูมินेट ทำให้เร่งปฏิกิริยาได้ไม่ดี และการใช้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการดูดซับได้ไม่ดี ส่งผลให้ผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนลดลง

ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าการผลิตไฮโดรเจนจากการใช้สารป้อนร่วมระหว่างพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและกลีเซอรอล โดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส จะให้ผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนสูงที่สุดถึง 22.91 มิลลิโมลต่อกรัมสารป้อนร่วม และร้อยละ 46.76 โดยโมล

## 5.2. ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้จะเห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟที่เตรียมด้วยการผสมทางกายภาพ สำหรับการผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของกลีเซอรอลและพลาสติกนั้นมีข้อดีอยู่มากและส่งผลให้ผลผลิตของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นได้ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาแคลเซียมมอฟที่

เตรียมด้วยการผสมทางกายภาพ ยังมีข้อเสียคือ ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ อาจเกิดการเสื่อมสภาพ (Deactivation) และอาจส่งเสริมให้เกิดการสะสมของคาร์บอนและโค้กขึ้นในบริเวณที่เป็นกรดของอลูมินา ซึ่งจะส่งผลต่อผลผลิตของแก๊สผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงควรศึกษาและปรับปรุงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟ ที่มีประสิทธิภาพ ส่งเสริมปฏิกิริยาการเกิดรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของกลีเซอรอลและพลาสติก รวมถึงส่งผลทำให้มีปริมาณการเกิดทาร์ที่ลดลง และยับยั้งการสะสมของคาร์บอนโดยลดความเป็นกรดของอลูมินาเพิ่มเติม อย่างเช่น การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือเปลี่ยนวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา-แคลเซียมมอฟเป็นวิธีการอิมแพกเนชัน





## บรรณานุกรม

- [1] B. Dou, B. Jiang, Y. Song, C. Zhang, C. Wang, H. Chen, B. Du, Y. Xu, Enhanced hydrogen production by sorption-enhanced steam reforming from glycerol with in-situ CO<sub>2</sub> removal in a fixed-bed reactor, *Fuel* 166 (2016) 340-346.
- [2] P.H. Chang, H.P. Hsu, S.C. Wu, C.H. Peng, Synthesis and Formation Mechanism of Limestone-Derived Porous Rod Hierarchical Ca-based Metal-Organic Framework for Efficient CO<sub>2</sub> Capture, *Materials (Basel)* 13(19) (2020).
- [3] MTEC, plastics, 2017. <https://www.mtec.or.th/bio-plastic/what-is-plastic/plastic-history.html>.
- [4] LONGMAADOO, พลาสติกชิ้นแรกของโลก, 2019. <https://www.longmaadoo.com/พลาสติกชิ้นแรก/>. (Accessed 13 November 2019).
- [5] N. Usahanunth, S. Tuprakay, The transformation of waste Bakelite to replace natural fine aggregate in cement mortar, *Case Studies in Construction Materials* 6 (2017) 120-133.
- [6] ส. ตั้งชัยวัฒนา, ชนิดพลาสติก, โครงการฟิลิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ 2015, pp. 1-3.
- [7] J.A. Brydson, 2 - The Chemical Nature of Plastics, in: J.A. Brydson (Ed.), *Plastics Materials (Seventh Edition)*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999, pp. 19-42.
- [8] ผ.ด.ท. อุตตรา, วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์, pp. 14-18.
- [9] ร.ด.จ. วุฒิกนกกาญจน์, ปฏิบัติการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวง in: ป. ชุนศรียา (Ed.), *คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ (มจร.)* 2013, pp. 1-6.
- [10] Gas Chromatography (GC), 2012. <https://shimadzu.com.au/system/files/GC-2014%20c184-e014f.pdf>.
- [11] กระบวนการผลิตของโรงงานเม็ดพลาสติก GC, 2022. <https://productsandsolutions.pttgcgroup.com/th/blog/กระบวนการผลิตของโรงงานเม็ดพลาสติก-gc>. (Accessed 10 May 2022).
- [12] J. Davidson, Multiscale modeling and simulation of crosslinked polymers, (2014).
- [13] tester\_dmark, พลาสติกชนิด PP, 2018. <https://www.deemarkthailand.com/พลาสติกชนิด-pp/>. (Accessed 6 December 2018).
- [14] ว. มุขสุวรรณ, พลาสติกในชีวิตประจำวัน, 2008. <http://www.chemtrack.org/News->

[Detail.asp?TID=4&ID=11](#). (Accessed 11 March 2008).

[15] กระทรวงพลังงาน, เปลี่ยน ‘ขยะพลาสติก’ ที่ไม่ได้ใช้ซ้ำ แปรรูปเป็น ‘น้ำมัน’ ได้, 2022.

<https://energy.go.th/th/provincial-energy-activity/29925>. (Accessed 24 January 2022).

[16] prodigy17, Plastic recycling, 2022. <https://prodigy.co.th/การรีไซเคิลพลาสติก-plastic-recycling/>. (Accessed 30 September 2022).

[17] น. สวาโย, พลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้, in: น. พลทวงษ์ (Ed.), มาเรียนรู้เรื่องพลาสติกและโฟมเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม, ส่วนลดและใช้ประโยชน์ของเสีย กองกำจัดกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ, pp. 4-5.

[18] T.G. Balachandran, S. Sendilvelan, K. Bhaskar, A Comparative Evaluation of Usage of Methyl Esters of Jatropha and Fish Oil for Environmental Protection, Journal of Materials and Environmental Sciences 8 (2017) 2564-2571.

[19] G. Knothe, 1 - Introduction, in: G. Knothe, J. Krahl, J. Van Gerpen (Eds.), The Biodiesel Handbook (Second Edition), AOCS Press 2010, pp. 1-3.

[20] C.A.G. Quispe, C.J.R. Coronado, J.A. Carvalho Jr, Glycerol: Production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion, Renewable and Sustainable Energy Reviews 27 (2013) 475-493.

[21] ป.จ. ธนภรณ์ ลาพรม, พรชิตา ชันทอง, มณิสรา คำงาม และ ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร, กลีเซอรอล, การสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนตจากกลีเซอรอล ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2020.

[22] ณ. ตีปะติ, การผลิตและการพัฒนากระบวนการทำให้บริสุทธิ์ของกลีเซอรินที่ได้จากกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตถ่านหิน, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2008.

[23] M. Ayoub, A.Z. Abdullah, Critical review on the current scenario and significance of crude glycerol resulting from biodiesel industry towards more sustainable renewable energy industry, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16(5) (2012) 2671-2686.

[24] ก. รุ่งโรจน์ชัยพร, กลีเซอรอล: การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน, วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง, 2014, pp. 140-159.

[25] ดร.ท. ดร.พงษ์ธนวัฒน์ เข้มทอง, การพัฒนาถ่านคาร์บอนสำหรับอุตสาหกรรมกลีเซอรอลบริสุทธิ์, 2019. <https://www.slri.or.th/th/slriresearch/การพัฒนาถ่านคาร์บอนสำหรับอุตสาหกรรมกลีเซอรอลบริสุทธิ์.html>. (Accessed 10 November 2022).

[26] C.D.P. Rosaria Ciriminna, Michele Rossi, Mario Pagliaro, Understanding the glycerol market, European Journal of Lipid Science and Technology 116(10) (2014) 1432-1439.

- [27] NiNa.Az, ไอโซโทปของไฮโดรเจน, 2021. <https://www.wiki.th-th.nina.az/ไอโซโทปของไฮโดรเจน.html>. (Accessed 5 August 2021).
- [28] Y.B. Gurov, D.V. Aleshkin, M.N. Behr, S.V. Lapushkin, P.V. Morokhov, V.A. Pechkurov, N.O. Poroshin, V.G. Sandukovsky, M.V. Tel'kushev, B.A. Chernyshev, T.D. Tschurenkova, Spectroscopy of superheavy hydrogen isotopes in stopped-pion absorption by nuclei, *Physics of Atomic Nuclei* 68(3) (2005) 491-497.
- [29] A.A. Korshennikov, E.Y. Nikolskii, E.A. Kuzmin, A. Ozawa, K. Morimoto, F. Tokanai, R. Kanungo, I. Tanihata, N.K. Timofeyuk, M.S. Golovkov, A.S. Fomichev, A.M. Rodin, M.L. Chelnokov, G.M. Ter-Akopian, W. Mittig, P. Roussel-Chomaz, H. Savajols, E. Pollacco, A.A. Ogloblin, M.V. Zhukov, Experimental evidence for the existence of  $7\text{H}$  and for a specific structure of  $8\text{He}$ , *Phys Rev Lett* 90(8) (2003) 082501.
- [30] ก. กระทรวงพลังงาน, สารานุกรมพลังงานทดแทน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2014.
- [31] V. Singh, D. Das, Chapter 3 - Potential of Hydrogen Production From Biomass, in: P.E.V. de Miranda (Ed.), *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*, Academic Press 2019, pp. 123-164.
- [32] iEnergyGuru, การผลิตไฮโดรเจน (HYDROGEN PRODUCTION), 2015. <https://ienergyguru.com/2015/07/hydrogen-production/>.
- [33] G. Sabourin-Provost, P.C. Hallenbeck, High yield conversion of a crude glycerol fraction from biodiesel production to hydrogen by photofermentation, *Bioresource Technol* 100(14) (2009) 3513-7.
- [34] K. Chouhan, S. Sinha, S. Kumar, S. Kumar, Simulation of steam reforming of biogas in an industrial reformer for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy* 46(53) (2021) 26809-26824.
- [35] ด.อ.อ. กุลนันทน์ วีรณรงค์กร, ไพโรไลซิส, หน่วยปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมกระบวนการเชิงคำนวณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, *technology & innomag* 2015, pp. 61-64.
- [36] A. López, I. de Marco, B.M. Caballero, M.F. Laresgoiti, A. Adrados, Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor, *Chemical Engineering Journal* 173(1) (2011) 62-71.
- [37] S. Adhikari, S.D. Fernando, A. Haryanto, Hydrogen production from glycerol: An update, *Energy Conversion and Management* 50(10) (2009) 2600-2604.

- [38] I. Barbarias, G. Lopez, M. Amutio, M. Artetxe, J. Alvarez, A. Arregi, J. Bilbao, M. Olazar, Steam reforming of plastic pyrolysis model hydrocarbons and catalyst deactivation, *Applied Catalysis A: General* 527 (2016) 152-160.
- [39] S. Müller, J. Fuchs, J.C. Schmid, F. Benedikt, H. Hofbauer, Experimental development of sorption enhanced reforming by the use of an advanced gasification test plant, *International Journal of Hydrogen Energy* 42(50) (2017) 29694-29707.
- [40] A. Lopez Ortiz, D.P. Harrison, Hydrogen Production Using Sorption-Enhanced Reaction, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 40(23) (2001) 5102-5109.
- [41] X. Qingli, Z. Zhengdong, H. Kai, X. Shanzhi, M. Chuang, C. Chenge, Y. Huan, Y. Yang, Y. Yongjie, Ni supported on MgO modified attapulgite as catalysts for hydrogen production from glycerol steam reforming, *International Journal of Hydrogen Energy* 46(54) (2021) 27380-27393.
- [42] selectscience, Entry Level INVENIO-S Focuses on Maximum Productivity, 2022. <https://www.selectscience.net/product-news/entry-level-invenio-s-focuses-on-maximum-productivity/?artID=48840>. (Accessed 27 March 2019).
- [43] ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, X-Ray Diffraction – XRD. <https://strec.chula.ac.th/equipments-rates/x-ray-diffraction-xrd>.
- [44] ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer – SEM-EDS (IT500HR). <https://strec.chula.ac.th/equipments-rates/scanning-electron-microscope-and-energy-dispersive-x-ray-spectrometer-sem-eds-it500hr>.
- [45] KROMTEK, Micromeritics ASAP2020 Plus Chemisorption. <https://www.kromtek.com.my/products/micromeritics-asap2020-plus-chemisorption/>.

### ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณผลได้และความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในแก๊สผลิตภัณฑ์จาก การทดลองในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำด้วยไอน้ำที่เสริมด้วยการดูดซับของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaMOF โดยมีสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

- สารละลายกลีเซอรอล (เข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	
- ปริมาณพลาสติก	0.2197 กรัม
- อุณหภูมิไฟโรไลซิส	700 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิรีฟอร์มมิง	700 องศาเซลเซียส
- เวลาในการทดลอง	30 นาที
- ช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างแต่ละถุงเก็บแก๊ส	5 นาที
- อัตราการป้อนเข้าของแก๊สอาร์กอน	40 มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการป้อนเข้าของน้ำ	0.2 มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการป้อนเข้าของสารละลายกลีเซอรอล	0.4 มิลลิลิตรต่อนาที
- รัศมีภายในของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊ส	0.5 เซนติเมตร
- ช่วงความสูงที่พิจารณาในการวัดอัตราการไหลของแก๊ส	10 เซนติเมตร

#### ขั้นตอนการคำนวณ

1. คำนวณปริมาณกลีเซอรอลที่ถูกป้อนเป็นเวลา 30 นาที

สารละลายกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เมื่อคิดอัตราการป้อนเข้าของกลีเซอรอลจะได้เป็น 0.08 มิลลิลิตรต่อนาที

จากสูตร 
$$\rho = \frac{m}{V}$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของกลีเซอรอล (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

$m$  คือ มวลของกลีเซอรอล (กรัม)

$V$  คือ ปริมาตรของกลีเซอรอล (มิลลิลิตร) ในเวลา 1 นาที

$$m = \rho V = (1.26 \text{ g/cm}^3) \times (0.08 \text{ mL})$$

$$m = 0.1008 \text{ g}$$

ดังนั้นในเวลา 30 นาที ปริมาณกลีเซอรอลที่ถูกป้อนเข้าเท่ากับ  $0.1008 \text{ g} \times 30 \text{ min} = 3.024 \text{ กรัม}$

## 2. คำนวณปริมาตรของแก๊สผลิตภัณฑ์

ปริมาตรของแก๊สผลิตภัณฑ์คำนวณได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ระหว่าง เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับปริมาตรในช่วงที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สใน อุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่มีรัศมีภายใน 0.5 เซนติเมตร ในช่วงความสูง 10 เซนติเมตร ดังสมการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

โดย  $V$  คือ ปริมาตรของแก๊สผลิตภัณฑ์ (มิลลิลิตร)

$Y$  คือ ระยะเวลาเฉลี่ยของฟองแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านความสูง 10 เซนติเมตร (นาที)

$T$  คือ ระยะเวลาที่เก็บแก๊สตัวอย่าง (นาที)

ตารางที่ ก.1 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

ถุงเก็บแก๊สที่	ที่เวลา (นาท)	ระยะเวลาเฉลี่ย (วินาที)	ปริมาตรแก๊สผลิตภัณฑ์ (มิลลิลิตร)
1	5	3.65	$471 \times 5 / 3.64 = 646.99$
2	10	2.65	$471 \times 5 / 2.65 = 888.68$
3	15	2.28	$471 \times 5 / 2.28 = 1032.90$
4	20	2.35	$471 \times 5 / 2.35 = 1002.13$
5	25	2.32	$471 \times 5 / 2.32 = 1015.09$
6	30	2.39	$471 \times 5 / 2.39 = 985.36$

3. การคำนวณร้อยละความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในแก๊สผลิตภัณฑ์

ร้อยละความเข้มข้นโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์สามารถคำนวณได้จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ GC ของแก๊สมาตรฐานร้อยละ 1 โดยปริมาตรดังที่แสดงในตารางที่ ก2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละความเข้มข้นของแก๊สผลิตภัณฑ์ถุงที่หนึ่งดังแสดงตารางที่ ก3

ตารางที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานด้วยเทคนิค GC

องค์ประกอบของแก๊ส	พื้นที่	ร้อยละความเข้มข้น
ไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	24450.8	1
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	1283.4	1
มีเทน (CH <sub>4</sub> )	4578.7	1
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	1643	1
C <sub>2</sub>	3954.5	1

**ตารางที่ ก.3** การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบของแก๊ส	พื้นที่	ร้อยละความเข้มข้นเทียบกับแก๊สมาตรฐาน (โดยปริมาตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
ไฮโดรเจน	363064.8	$363064.8/24450.8 = 14.85$	$14.85 \times 646.99/100 = 96.08$
คาร์บอนมอนอกไซด์	16226.4	$16226.4/1283.4 = 12.64$	$12.64 \times 646.99/100 = 81.78$
มีเทน	21533	$21533/4578.7 = 4.70$	$4.70 \times 646.99/100 = 30.41$
คาร์บอนไดออกไซด์	5060.8	$5060.8/1643 = 3.08$	$3.08 \times 646.99/100 = 19.93$
C <sub>2</sub>	25264.6	$25264.6/3954.5 = 12.78$	$12.78 \times 646.99/100 = 82.69$

4. การคำนวณความเข้มข้นรวมขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

**ตารางที่ ก.4** การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบของแก๊ส	จำนวนโมลรวมของทุกองค์ประกอบ (มิลลิโมล)	ความเข้มข้น (ร้อยละโดยปริมาตร)
ไฮโดรเจน	74.17	$74.17/155.12 \times 100 = 47.82$
คาร์บอนมอนอกไซด์	44.97	$44.97/155.12 \times 100 = 28.99$
มีเทน	8.61	$8.61/155.12 \times 100 = 5.55$
คาร์บอนไดออกไซด์	19.48	$19.48/155.12 \times 100 = 12.56$
C <sub>2</sub>	7.89	$7.89/155.12 \times 100 = 5.09$
รวม	155.12	100

5. การคำนวณผลได้รวมขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

**ตารางที่ ก.5** การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบของแก๊ส	จำนวนโมลรวมของทุกองค์ประกอบ (มิลลิโมล)	จำนวนโมลต่อกรัมกลีเซอรอลและพลาสติก (มิลลิโมลต่อกรัม)
ไฮโดรเจน	74.17	$74.17/3.2308 = 22.96$
คาร์บอนมอนอกไซด์	44.97	$44.97/3.2308 = 13.92$
มีเทน	8.61	$8.61/3.2308 = 2.67$
คาร์บอนไดออกไซด์	19.48	$19.48/3.2308 = 6.03$
C <sub>2</sub>	7.89	$7.89/3.2308 = 2.44$
รวม	155.12	48.02



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จิรัชฌา เก้าเอี้ยน
วัน เดือน ปี เกิด	30 กันยายน 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ปัจจุบัน	70 หมู่ 5 ต.สุโสะ อ.ปะเหลียน จ.ตรัง 92120
ผลงานตีพิมพ์	Kao-ian, J., & Kuchonthara, P. [2022]. HYDROGEN FROM GLYCEROL AND PLASTICS BY SORPTION-ENHANCED STEAM REFORMING OVER Ni/Ca-MOF. The 28th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemical, and Polymer and the 13th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology. "Renewable energy, Energy generation & storage, and process simulation (REP)" [pp. 136-140]. Bangkok: Chulalongkorn University.