

การผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลโดยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบน  
ตัวรองรับแท่งอะลูมินา

นางสาวอภัสราภรณ์ เจียวก๊ก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROGEN PRODUCTION FROM GLYCEROL BY STEAM REFORMING OVER  
PALLADIUM SUPPORTED ALUMINA ROD CATALYST

Miss Apatsaraporn Jiewkok

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลโดยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ
โดย	ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา
สาขาวิชา	นางสาวอภิสรภรณ์ เจียวก๊ก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล
	ดร. ดวงเดือน อัจจงค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศวีระวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. ดวงเดือน อัจจงค์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. อติศักดิ์ วรรณพินิจ)

อภิธานศัพท์ เจียวก๊ก : การผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลโดยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา. (HYDROGEN PRODUCTION FROM GLYCEROL BY STEAM REFORMING OVER PALLADIUM SUPPORTED ALUMINA ROD CATALYST) อ. ที่ปริกษวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล. อ. ที่ปริกษวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. ดวงเดือน อัจจงศ์, 138 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำภายในเตาปฏิกรณ์แบบท่อ โดยใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลภายในประเทศ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาความเข้มข้นของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จำนวนท่อของท่อเร่งปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน และระยะเวลาการสัมผัส โดยวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปของปริมาณร้อยละการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุดิบไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 600 เป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปอยู่ในรูปของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนมีแนวโน้มลดลง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ด้วยจำนวนท่อตัวเร่งปฏิกิริยา 7 ท่อ ให้ผลการทดลองดีที่สุด โดยร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์เท่ากับ 93.55 และ 86.66 โดยน้ำหนัก จากการทดลองโดยใช้จำนวนท่อตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ท่อ ที่ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนและระยะเวลาการสัมผัสจาก 1 เป็น 2 วินาที พบว่าร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 57.95 เป็น 63.56 และร้อยละ 60.12 เป็น 69.16 ตามลำดับ จากการนำกลีเซอรอลดิบมาทดลองเปรียบเทียบกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่สภาวะเดียวกันพบว่าร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 63.56 เป็น 76.50 และร้อยละ 69.17 เป็น 82.02 ตามลำดับ เนื่องจากกลีเซอรอลดิบมีการปนเปื้อนของสารต่างๆ จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีศักยภาพในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลดิบ ซึ่งนอกจากจะเพิ่มแหล่งพลังงานทางเลือกในการผลิตพลังงานที่สะอาด อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมการจัดการกลีเซอรอลดิบซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2553 .....

## 5170511321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : CRUDE GLYCEROL/ HYDROGEN GAS/ PURE GLYCEROL/ PALLADIUM CATALYST/ STEAM REFORMING

APATSARAPORN JIEWKOK : HYDROGEN PRODUCTION FROM GLYCEROL BY STEAM REFORMING OVER PALLADIUM SUPPORTED ALUMINA ROD CATALYST. ADVISOR : ASST. PROF. VIBOON SRICHAROENCHAIKUL, Ph.D., CO-ADVISOR : DUANGDUEN ATONG, Ph.D., 136 pp.

Production of hydrogen gas from steam reforming of glycerol using tubular reactor was studied here, feed with pure glycerol and crude glycerol from biodiesel production process. The objective was to study suitable condition of the reaction. The studied parameters were reaction temperature, catalyst loading, feed concentration of glycerol, number of catalyst tubes, steam/carbon ratio and contact time. The analysis of results showed that the percentage of carbon and hydrogen input converted into gas products. The results showed that the conversion of carbon and hydrogen input increased with the increase of the reaction temperature from 600 to 800 °C. The distribution of gas product was found that, when the reaction temperature increased, the conversion to H<sub>2</sub> and CO gases increased while the conversion to CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> gases decreased. The palladium loading, 1.0 %wt Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst at the reaction temperature of 800 °C and 7 tubes exhibited the highest reforming activity that was the suitable reaction condition for hydrogen production. Hydrogen and carbon conversion were 93.55 and 86.66 %, respectively. At glycerol concentration at 5000 ppm 1.0% wt and 4 tubes of Pd catalyst, when the rise of the S/C ratio from 1:1 to 3:1 and the contact time from 1 to 2 s led to the increase of hydrogen and carbon conversion. The comparison of crude glycerol and pure glycerol was indicated that crude glycerol converted to gas product more than pure glycerol in the same condition. From these results, the steam reforming process can be considered as a potential method for H<sub>2</sub> production from the crude glycerol. It is not only increasing the alternative energy as clean energy but also promoting the waste management from biodiesel process.

Department : Environmental Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2010 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และดร. ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เซาวกิจเจริญ ดร. อติศักดิ์ วรรณพินิจ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอนและถ่ายทอดความรู้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุศาสตร์แห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำการวิจัย โดยมี ดร. ดวงเดือน อางองค์ คอยให้การดูแลเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆ ผู้ช่วยนักวิจัยของ ดร. ดวงเดือน ที่คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำด้านเทคนิค

ขอขอบพระคุณสำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนตามโครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สำหรับการช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้ประสบความสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว ที่คอยดูแลให้กำลังใจและสนับสนุนทุกอย่าง จนกระทั่งการทำวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1    บทนำ.....	1
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2    วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3    ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2    เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1    ชีวมวล.....	5
2.1.1    องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล.....	6
2.1.2    ส่วนประกอบของชีวมวล.....	6
2.2    หลักการแปรภาพชีวมวล.....	7
2.2.1    กระบวนการแปรภาพชีวมวลทางชีวเคมี.....	8
2.2.2    การเผาไหม้.....	8
2.2.3    กระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	8
2.3    ปฏิกริยาการเผาไหม้พื้นฐาน.....	13
2.4    ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	15
2.4.1    แกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ.....	16
2.4.2    ออกซิเดทีฟแกซีฟิเคชัน.....	16
2.4.3    ไฮโดรแกซีฟิเคชัน.....	16

	หน้า
2.5 ประเภทของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตแก๊ส.....	16
2.5.1 เตาผลิตแก๊สแบบแบดนิ่ง.....	16
2.5.2 เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบด.....	19
2.6 กระบวนการปฏิกริยารีฟอร์มมิง.....	22
2.6.1 ปฏิกริยาการรีฟอร์มมิง.....	22
2.7 แก๊สสังเคราะห์.....	23
2.7.1 การนำแก๊สสังเคราะห์มาใช้ประโยชน์.....	23
2.8 ตัวเร่งปฏิกริยาเคมี.....	26
2.8.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกริยา.....	26
2.8.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกริยา.....	27
2.8.3 ตัวรองรับ.....	27
2.8.4 อะลูมินา.....	28
2.8.5 ตัวเร่งปฏิกริยาโลหะบนตัวรองรับ.....	29
2.8.6 โลหะแพลเลเดียม.....	30
2.8.7 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกริยาบนตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธุ์.....	30
2.9 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย.....	31
2.9.1 ก๊าซเซอร์คอล.....	31
2.9.2 คุณสมบัติของก๊าซเซอร์คอล.....	32
2.9.3 การผลิตก๊าซเซอร์คอล.....	34
2.9.4 ปริมาณก๊าซเซอร์คอลดิบภายในประเทศ.....	35
2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
<b>บทที่ 3</b> <b>วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>42</b>
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา.....	42
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา.....	42
3.1.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้.....	43
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตาปฏิกรณ์.....	43



3.2.1	เตาปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาการแปรสภาพทางเคมีด้วยความร้อนด้วยการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา.....	43
3.2.2	สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้.....	43
3.3	ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	47
3.4	วิธีการทดลอง.....	47
3.4.1	การวิเคราะห์สมบัติของกลีเซอรอล.....	47
3.4.2	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินาด้วยกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า.....	48
3.4.3	ขั้นตอนการทดลอง.....	49
3.5	ศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา.....	50
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	51
4.1	ลักษณะทางเคมีและองค์ประกอบทางเคมีของกลีเซอรอลดิบ.....	52
4.1.1	ลักษณะทางเคมีของกลีเซอรอลดิบ.....	52
4.1.2	ลักษณะของกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ.....	54
4.2	ลักษณะของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา.....	56
4.2.1	ลักษณะทางกายภาพของตัวรองรับ.....	56
4.2.2	ลักษณะและสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	58
4.3	ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล.....	61
4.3.1	ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง.....	61
4.3.2	ผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์.....	63
4.3.3	ผลของปริมาณโลหะต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์.....	70
4.3.4	ผลของประสิทธิภาพการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ.....	75
4.3.5	ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์.....	77
4.3.6	ผลของจำนวนท่อแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา.....	80
4.4	ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลเมื่อมีการลดท่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา.....	83

	หน้า
4.4.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา	83
4.4.2 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน.....	88
4.4.3 ผลของระยะเวลาการสัมผัส (Contact time).....	91
4.4.4 การนำมาประยุกต์ใช้กับกลีเซอรอลดิบ.....	96
4.5 ผลของการเกิดคาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	99
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	101
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	101
5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเตาปฏิกรณ์.....	103
5.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการดำเนินปฏิกิริยา.....	103
รายการอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก.....	106
ภาคผนวก ข.....	110
ภาคผนวก ค.....	156
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	170

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันดิน.....	12
ตารางที่ 2.2	ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน.....	13
ตารางที่ 2.3	สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล.....	33
ตารางที่ 2.4	ประมาณการใช้ไบโอดีเซลภายในประเทศและผลพลอยได้ที่เกิดขึ้น.....	35
ตารางที่ 3.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	44
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ.....	54
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ.....	55
ตารางที่ 4.3	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน .....	56
ตารางที่ 4.4	การเปรียบเทียบลักษณะทางเคมีของกลีเซอรอลดิบและชีวมวลชนิดอื่น	57
ตารางที่ 4.5	สมบัติทางกายภาพของตัวรองรับ.....	58
ตารางที่ 4.6	แสดงการปนเปื้อนของกลีเซอรอลดิบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ.....	96
ตารางที่ 4.7	การวิเคราะห์คาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	98

## สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	แหล่งพลังงานหมุนเวียนของชีวมวล.....	1
ภาพที่ 2.2	กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อน.....	7
ภาพที่ 2.3	ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการแกซิฟิเคชัน.....	10
ภาพที่ 2.4	การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล.....	15
ภาพที่ 2.5	เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดแก๊สไหลขึ้น.....	17
ภาพที่ 2.6	เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดแก๊สไหลลง.....	18
ภาพที่ 2.7	เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดแก๊สไหลขวาง.....	19
ภาพที่ 2.8	เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ.....	21
ภาพที่ 2.9	เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน .....	22
ภาพที่ 2.10	เส้นทางการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอะลูมินา.....	29
ภาพที่ 2.11	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	31
ภาพที่ 2.12	สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล.....	31
ภาพที่ 2.13	กระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล .....	35
ภาพที่ 3.1	แผนผังกระบวนการผลิตแก๊สโดยรวม.....	46
ภาพที่ 3.2	ขั้นตอนโดยรวมของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับ แท่งอะลูมินาด้วยกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า.....	51
ภาพที่ 3.4	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	52
ภาพที่ 4.1	รูปของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ท่ออะลูมินาที่ขึ้นรูปแล้ว (ข) ท่ออะลูมินาที่ผ่านการเผาผนึก (ค) ท่ออะลูมินาที่ผ่านการเคลือบแก้ว (ง) ท่อที่ผ่านการกระตุ้นผิวหน้า (จ) ท่อที่ผ่านการชุบเคลือบโดยไม่ใช้ ไฟฟ้า.....	57
ภาพที่ 4.2	ปริมาณแพลเลเดียมที่สะสมบนตัวรองรับอะลูมินาต่อเวลาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	59
ภาพที่ 4.3	ภาพ SEM แสดงลักษณะโครงสร้างผิวหน้าของแพลเลเดียมบนตัว รองรับอะลูมินาที่ปริมาณแพลเลเดียม (ก) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (ข) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (ค) ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก.....	60

ภาพที่ 4.4	ภาพตัดขวางของแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาที่ปริมาณแพลเลเดียม(ก) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (ข) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (ค) ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก.....	60
ภาพที่ 4.5	การกระจายของก๊าซผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา...	63
ภาพที่ 4.6	ผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเข้าไปอยู่ในรูปของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมด้วยการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก.....	64
ภาพที่ 4.7	ผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก.....	67
ภาพที่ 4.8	ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ด้วยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนอะลูมินา ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังการใช้งานที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ (ก) ก่อนการใช้งาน (ข) ใช้งานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ค) ใช้งานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และ (ง) ใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	68
ภาพที่ 4.9	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก (ก) ก่อนใช้งาน และ (ข) หลังการใช้งาน.....	69
ภาพที่ 4.10	ผลการวิเคราะห์คาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....	70
ภาพที่ 4.11	ผลของปริมาณแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส.....	72
ภาพที่ 4.12	ผลของปริมาณแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาต่อการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ (ก) 600 องศาเซลเซียส และ (ข) 800 องศาเซลเซียส.....	73
ภาพที่ 4.13	ผลของค่าความร้อนต่ำและอัตราส่วนโดยโมลของ H <sub>2</sub> /CO ที่ได้จากการแปรผันของปริมาณแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส.....	74

ภาพที่ 4.14	ผลของประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (ก) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และ (ข) 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	76
ภาพที่ 4.15	ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการใช้ซ้ำ 4 รอบ (ก) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และ (ข) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก.....	77
ภาพที่ 4.16	ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ป้อนเข้ากับการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม ด้วยปริมาณแพลเลเดียมบนอะลูมินา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	78
ภาพที่ 4.17	ภาพของการกระจายของก๊าซผลิตภัณฑ์ของอะลูมินาที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้น (ก) 2500 และ (ข) 5000 พีพีเอ็ม และตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้น (ค) 2500 พีพีเอ็ม และ (ง) 5000 พีพีเอ็ม.....	79
ภาพที่ 4.18	ผลของจำนวนต่อการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่ความเข้มข้น 2500 และ 5000 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	81
ภาพที่ 4.19	ผลของจำนวนต่อการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์ความเข้มข้น (ก) 2500 พีพีเอ็ม และ (ข) 5000 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	82
ภาพที่ 4.20	ผลของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมกับตัวรองรับที่ใช้ในการทดลอง ที่อุณหภูมิ (ก) 600 องศาเซลเซียส และ (ข) 800 องศาเซลเซียส.....	84
ภาพที่ 4.21	ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมกับการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส.....	85
ภาพที่ 4.22	ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำปฏิกิริยา ก) อะลูมินา ข) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ค) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ ง) ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....	86
ภาพที่ 4.23	ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำปฏิกิริยา ก) อะลูมินา ข) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ค) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ ง) ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	87
ภาพที่ 4.24	ผลของการวิเคราะห์คาร์บอนบนพื้นผิวดังตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส.....	87

ภาพที่ 4.25	ผลของอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์.....	89
ภาพที่ 4.26	ผลของอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนต่อการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์..	89
ภาพที่ 4.27	ผลของค่าความร้อนต่ำและอัตราส่วนโดยโมลของ H <sub>2</sub> /CO ที่ได้จากการแปรผันอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	91
ภาพที่ 4.28	ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ท่ออะลูมินา.....	92
ภาพที่ 4.29	ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	93
ภาพที่ 4.30	ผลของค่าความร้อนต่ำและอัตราส่วนโดยโมลของ H <sub>2</sub> /CO ที่ได้จากการแปรผันของระยะเวลาการสัมผัส ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	94
ภาพที่ 4.31	ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก.....	95
ภาพที่ 4.32	ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมปริมาณ ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก.....	96
ภาพที่ 4.33	ผลของกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์.....	97
ภาพที่ 4.34	ผลกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบต่อการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	98

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสถานการณ์พลังงานของโลกที่มีการใช้พลังงานในอัตราที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามสภาพความเจริญทางเศรษฐกิจและสังคม โดยเฉพาะพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งประเทศไทยเองในแต่ละปีต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นมูลค่ามหาศาล จากการนำเข้าน้ำมันพบว่ามีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นมาโดยตลอดและการตื่นตัวเกี่ยวกับปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เป็นพิษ ทำให้แทบทุกประเทศพยายามเสาะแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่มาทดแทนพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียมและค้นคว้าวิธีการที่จะใช้ประโยชน์จากแหล่งพลังงานภายในประเทศ

แหล่งพลังงานที่ได้รับความสนใจมากที่สุด คือ แหล่งพลังงานจากชีวมวล (Biomass) เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมได้และเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง อีกทั้งยังไม่เพิ่มการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยรวมซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจก (Green house gases) การแปรรูปชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานโดยการผลิตเป็นไบโอดีเซลจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้รัฐบาลจึงสนับสนุนให้ใช้ไบโอดีเซลโดยมีเป้าหมายไว้ว่าภายในปี พ.ศ. 2555 ทั่วทั้งประเทศจะมีการใช้ไบโอดีเซลเป็นปริมาณ 85 ล้านลิตรต่อวัน (กระทรวงพลังงาน, 2550)

ไบโอดีเซลคือน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิตมาจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ เช่น ปาล์ม สนุ่นดำ มะพร้าว ทานตะวัน ถั่วเหลือง เมล็ดเรพ และน้ำมันพืช/ไขมันสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำปฏิกิริยาทางเคมีทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ร่วมกับเมทานอลจนเกิดเป็นสารเอสเทอร์อยู่ในรูปของเอทิลเอสเทอร์ (Ethyl esters) หรือเมทิลเอสเทอร์ (Methyl esters) และมีผลพลอยได้คือ กลีเซอรอล (Glycerol)

โดยทั่วไปของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้พืชน้ำมันเป็นวัตถุดิบจะได้แก่ กากของพืชที่ถูกสกัดเอาน้ำมันออกไปแล้วและกลีเซอรอลที่เกิดจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน โดยในการผลิตไบโอดีเซลจะเกิดกลีเซอรอลประมาณร้อยละ 10 ของน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต แต่เนื่องด้วยกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นเป็นกลีเซอรอลที่ไม่บริสุทธิ์ ทำให้ในการนำไปใช้ประโยชน์มีข้อจำกัดหลายด้าน จึงทำให้กลีเซอรอลเป็นปัญหาหนึ่งของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและเมื่อดูเป้าหมายปริมาณการใช้ไบโอดีเซลของรัฐบาลในอนาคต จะพบว่าปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล



เป็นปริมาณมหาศาล ดังนั้นจึงควรหาแนวทางการจัดการกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

การนำของเสียกลีเซอรอลไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) ได้เป็นกลีเซอรอลบริสุทธิ์ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ ยังอาจไม่เป็นที่นิยมกับโรงงานขนาดเล็กถึงปานกลาง เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและมีการลงทุนที่สูง นอกจากนี้ยังมีการเผาของเสียกลีเซอรอลแทนการทำให้บริสุทธิ์เพื่อนำพลังงานความร้อนไปใช้ แต่ข้อเสียของการเผาไหม้คือ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานความร้อนต่ำ การจัดเก็บพลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้งานภายหลังทำได้ยากและยังก่อให้เกิดมลภาวะจากปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจกอีกด้วย จากข้อเสียเปรียบของการเผาไหม้ดังกล่าว จึงได้มีการวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปกลีเซอรอลไปเป็นเชื้อเพลิง โดยอาศัยกระบวนการแปรสภาพทางความร้อน (Thermal conversion) ได้แก่ การสลายตัวด้วยความร้อนแบบไร้อากาศหรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) และการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงหรือแกซิฟิเคชัน (Gasification) โดยกระบวนการเหล่านี้เป็นการสลายชีวมวลให้กลายเป็นเชื้อเพลิงโดยให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ข้อดีของกระบวนการนี้คือ ไม่เกิดออกไซด์ของซัลเฟอร์และไนโตรเจน สามารถกักเก็บเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นไว้ได้ ปฏิกริยาเกิดขึ้นเร็ว ใช้พื้นที่น้อย และไม่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะเรือนกระจก

แกซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในสภาพแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงจะเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์หรือใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตสารเคมี รวมทั้งยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อีกด้วย แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันส่วนใหญ่ประกอบด้วย ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งเป็นแก๊สที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม โดยจะเป็นการสนับสนุนการพัฒนาการใช้พลังงานไฮโดรเจนและพลังงานจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นระบบผลิตพลังงานที่สำคัญมากในอนาคต อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงเหลว ที่สามารถนำไปทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวยังมีสารปนเปื้อน เช่น น้ำมันทาร์ (Tar) ซึ่งเป็นปัญหาในกระบวนการแกซิฟิเคชัน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยามาช่วยในกระบวนการแกซิฟิเคชัน โดยปัจจุบันมีการศึกษาการแกซิฟิเคชันโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้มีการแตกตัวน้ำมันทาร์มากขึ้นและเพิ่มปริมาณไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สนใจอยู่ในกลุ่มที่ใช้รีฟอร์มไฮโดรคาร์บอน

งานวิจัยนี้จึงได้สนใจศึกษาการนำของเสียกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยจะมุ่งเน้นการผลิตไฮโดรเจนเป็นหลัก จึงได้มีการพัฒนากระบวนการแกซิฟิเคชันร่วมกับไอน้ำและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา

เพื่อเพิ่มผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและลดปริมาณน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากแพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติในการดูดซับไฮโดรเจนได้ดีและเป็นโลหะที่ว่องไวในการช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) และการรีฟอร์มมิง (Reforming) ของไฮโดรคาร์บอน อีกทั้งยังสามารถพัฒนาต่อไปเป็นระบบแยกไฮโดรเจนออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ภายในขั้นตอนเดียวได้อีกในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำโดยใช้แพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินาด้วยกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating)
- 1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวร่วมกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ
- 1.3.3 ศึกษาปริมาณของแพลเลเดียมที่เหมาะสมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินาเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการแตกตัวร่วมกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ
- 1.3.4 ศึกษาความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์ที่มีเหมาะสมในปฏิกิริยาการแตกตัวร่วมกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ
- 1.3.5 ศึกษาจำนวนท่อของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการแตกตัวของกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์
- 1.3.6 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างไอน้ำและคาร์บอนในปฏิกิริยาการแตกตัวร่วมกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ
- 1.3.7 ศึกษาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมของกลีเซอรอลในปฏิกิริยาการแตกตัวร่วมกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ
- 1.3.8 ศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา โดยการวัด

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- วิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)
- วิธีเทมเพอร์เรเจอร์โปรแกรมออกซิเดชัน (TPO)
- วิธีเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลซิส (TGA)

1.3.9 สถานที่ทำการทดลองคือ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและ  
ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถลดปริมาณของเสียกลีเซอรอลและผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจน เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้
- 1.4.2 สามารถประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแห่งอะลูมินาในปฏิกิริยาการแตกกร่วมกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

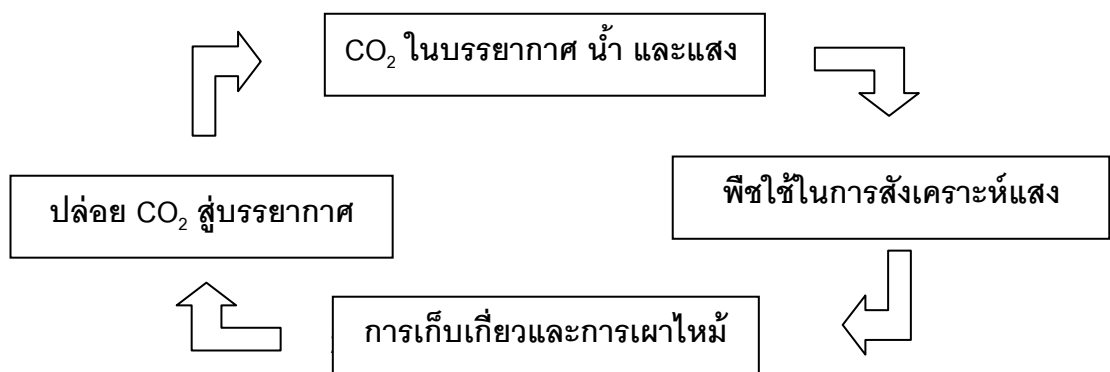
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือกากจากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตร เช่น แกลบได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อยได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์มได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด ชังข้าวโพดได้จากการสีข้าวโพด เพื่อนำเอาเมล็ดออก เป็นต้น ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมาเป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงจะได้พลังงานออกมา

ชีวมวล มีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย การนำชีวมวลมาใช้จึงลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศ ในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนต่างถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม



ภาพที่ 2.1 แหล่งพลังงานหมุนเวียนของชีวมวล (Stora Enso, 2009)

### 2.1.1 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล

สารชีวมวลมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คาร์โบไฮเดรตและลิกนิน

1. คาร์โบไฮเดรต คือ สารพวก แซคคาไรด์ เซลลูโลส แป้ง และเฮมิเซลลูโลส

- เซลลูโลส เป็นเส้นใยพอลิแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์ของพืชและมีอยู่มาก เซลลูโลสเป็นตัวอย่างที่ไม่ละลายและไม่ค่อยทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะไฮโดรไลซิส

- แป้ง เป็นเม็ดพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ถูกเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่ พวง เมล็ด ราก หัว และลำต้น ประกอบด้วย ร้อยละ 10-20 ของอัลฟาอะไมเลส (- amylase) ซึ่งละลายน้ำ และร้อยละ 80 - 90 ของอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ซึ่งไม่ละลายน้ำ

- เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่อยู่ร่วมกับเซลลูโลส แตกต่างกันที่เป็นแบบไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous) และมีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จึงละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส

2. ลิกนิน เป็นกลุ่มสำคัญที่มีในชีวมวลไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เป็นองค์ประกอบพิเศษของผนังเซลล์ของพืช ทำหน้าที่เป็นการเชื่อมเกาะให้เกิดความแข็งแรงเชิงกลเป็นแบบไม่เป็นรูปผลึกและละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส สามารถแยกจากเนื้อไม้ได้โดยใช้ไอน้ำ ลิกนินต้านทานปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและไม่สามารถถูกย่อยโดยแบคทีเรียได้

### 2.1.2 ส่วนประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไป จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

1. ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลเป็นพลังงาน โดยการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกินร้อยละ 50

2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustion substance) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (Volatiles matter) และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) สารระเหย คือส่วนที่ถูกเผาไหม้ได้ง่าย สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงตัวเป็นของแข็งที่เป็นคาร์บอนที่เหลืออยู่ (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2550)

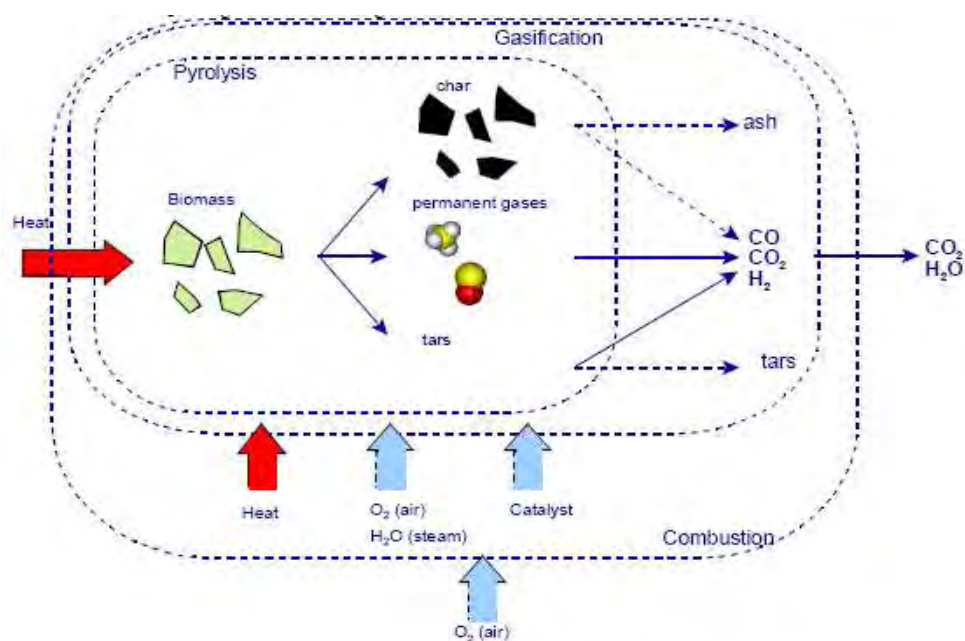
3. ขี้เถ้า (Ash ) คือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1-3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนขี้เถ้าร้อยละ 10 – 20 ซึ่งจะส่งผลให้มีปัญหาในการเผาไหม้และการกำจัดพอสสมควร

## 2.2 หลักการแปรรูปชีวมวล

การแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานกระทำได้โดยใช้กระบวนการแปรรูป 2 หลักการด้วยกัน คือ

1. กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางชีวเคมี (Biochemical conversion) โดยวิธีกระบวนการหมัก ( Fermentation) และกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศหรือออกซิเจน (Anaerobic digestion)

2. กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อน (Thermal conversion) โดยวิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และการเผาไหม้ (Combustion) แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อน (Knoef, 2005)

## 2.2.1 กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางชีวเคมี (Biochemical conversion)

ในการแปลงชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงด้วยวิธีชีวเคมีมี 2 วิธี คือ กระบวนการหมัก (Fermentation) และกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศหรือออกซิเจน (Anaerobic digestion) ทำให้โมเลกุลที่สลับซับซ้อนของสารอินทรีย์ เช่น ในแป้งและน้ำตาลแตกตัวโดยเชื้อแบคทีเรีย เช่น ยีสต์ ส่าเหล้า กลายเป็นแอลกอฮอล์ ซึ่งการแปรรูปชีวมวลทางชีวเคมีนั้นพบว่าค่อนข้างที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลค่อนข้างมาก หลายกรณีไม่สามารถใช้วิธีทางชีวเคมีในการย่อยสลายชีวมวลได้ เช่น กรณีที่ชีวมวลมีส่วนผสมของสารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่ใช้ย่อยสลาย นอกจากนั้นแล้ววิธีทางชีวเคมีต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้สมบูรณ์รวมทั้งใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก

## 2.2.2 การเผาไหม้ (Combustion)

กระบวนการเผาไหม้ เป็นแบบสามัญและส่วนใหญ่นิยมใช้ในการกำจัดชีวมวลเหลือทิ้ง ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด แต่ก่อให้เกิดมลภาวะ เพราะผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ น้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกและประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานความร้อนต่ำ การเก็บพลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้ภายหลังทำได้ยาก ดังนั้นในปัจจุบันกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงจึงให้ความสนใจกับการไพโรไลซิสและการแกซิฟิเคชัน

## 2.2.3 กระบวนการแกซิฟิเคชัน

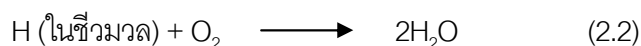
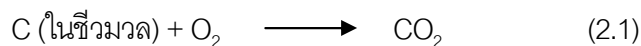
### 2.2.3.1 นิยาม

กระบวนการแกซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดแก๊สโดยอาศัยการความร้อนสลายชีวมวลภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้ เรียกว่า แก๊สเชื้อเพลิง (Producer gas) ส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) มีเทน (CH<sub>4</sub>) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีสารปนเปื้อน ได้แก่ น้ำมันทาร์ และซาร์ เป็นต้น โดยกระบวนการแกซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ 4 ขั้นตอน คือ การระเหยแห้ง ไพโรไลซิส ออกซิเดชัน และรีดักชัน โดยในแต่ละขั้นตอนอาจเกิดขึ้นพร้อมๆ กันได้ แสดงดังในภาพที่ 2.3

- การระเหยแห้ง (Drying) ขั้นตอนนี้จะเกิดลำดับแรกสุด โดยที่เชื้อเพลิงชีวมวล มักจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 5-35 เมื่อถูกทำให้ร้อนเกินกว่า 100 องศาเซลเซียส น้ำก็จะระเหยออกมาเป็นไอน้ำ ซึ่งในขั้นตอนนี้ชีวมวลยังไม่เกิดการสลายตัว

- ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการสลายตัวโดยความร้อนของชีวมวลในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิดคือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยที่อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและสภาวะการทำงานของเตาผลิตแก๊ส ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้ในขั้นตอนนี้จะมีค่าไม่สูงนัก โดยไม่ว่าจะออกแบบสร้างเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงอย่างไรก็ต้องมีโซนที่อุณหภูมิไม่สูงมากซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่กระบวนการไพโรไลซิสเกิดขึ้นและทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ควบแน่นได้เช่น น้ำมันดิน (Tar)

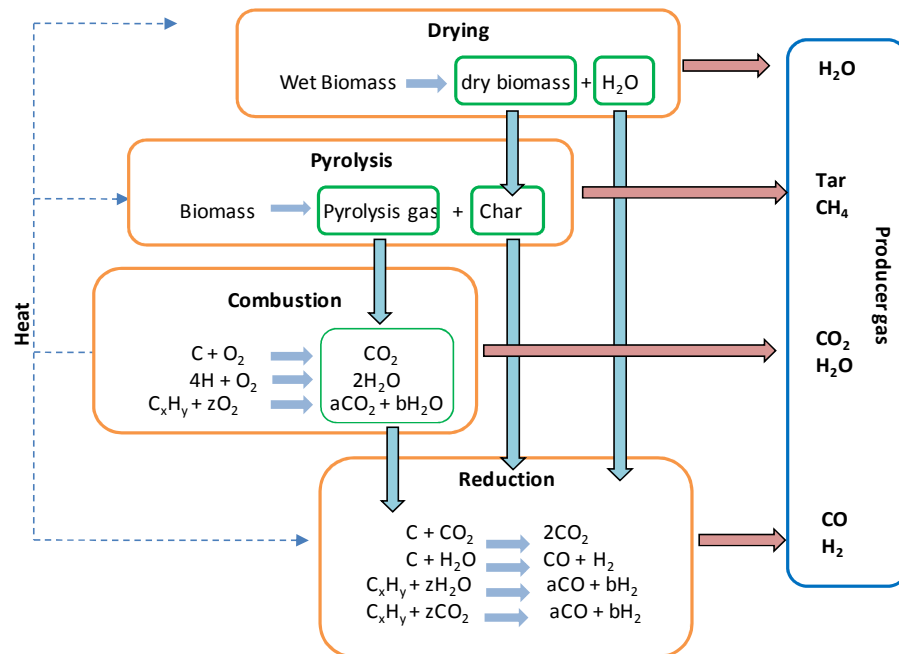
- การเผาไหม้ (Combustion) เกิดขึ้นในเตาของส่วนที่ใส่ออกซิเจนเข้าไป ซึ่งจะทำให้เกิดการเผาไหม้และมีอุณหภูมิสูงถึง 700-2000 องศาเซลเซียส การเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ โดยจะต้องมีการควบคุมให้เกิดการออกซิเดชันอย่างจำกัดเพื่อไม่ให้ชีวมวลถูกเผาหมดไปโดยไม่ถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ปฏิริยาหลักๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ คือ



- รีดักชัน (Reduction) ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นในสภาวะที่ขาดออกซิเจน เนื่องจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่ในขั้นตอนนี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิของแก๊สในช่วงนี้จะลดต่ำลง ถ้าหากสามารถทำให้เกิดกระบวนการแกซิฟิเคชันที่สมบูรณ์ได้ คาร์บอนทั้งหมดในชีวมวลจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และแก๊สเชื้อเพลิงอื่นๆ ปฏิริยาที่สำคัญในขั้นตอนนี้ คือ







ภาพที่ 2.3 ปฏิกริยาเคมีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการแกซีฟิเคชัน (Knoef, 2005)

### 2.2.3.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน

- ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาดีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน (ถ่านไร้ควัน) เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็ก และทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหย สารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

- ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันดิน องค์ประกอบของน้ำมันดินเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวงแหวนแนฟทาดีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันดินมีองค์ประกอบ

คาร์บอนตั้งแต่  $C_5$ - $C_6$  ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด โดยอาจแบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วนคือ

1. น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิ < 200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอีน เอทิลเบนซิน ไซลีน
2. น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล ไพริดีน
3. น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส ได้แก่ ไดเมททิล แนพทาลิน
4. น้ำมันแอนทาซีน (antracence) ช่วงอุณหภูมิ 300-350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนานทีน
5. พีทช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิ > 300 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทไซ ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

#### สมบัติทางเคมีของน้ำมันดิน

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าปริมาณน้ำมันดินที่เกิดจากการเผาไหม้และองค์ประกอบของน้ำมันดินเกิดการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลงและสัดส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนอะตอมก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการผันกลับของสารประกอบที่มีออกซิเจนสูงไปเป็นสารประกอบที่มีออกซิเจนต่ำและมีความคงที่ทางอุณหภูมิมากกว่า (Thermally Highly Aromatic Structure Stable) และคงเหลือแต่โครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของน้ำมันดินกับอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 2.1

#### ● ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่ จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันดิน (Thunman และคณะ, 2001)

การไพโรไลซิส อย่างรวดเร็ว (Flash pyrolysis) อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส	การไพโรไลซิส อย่างรวดเร็วที่ อุณหภูมิสูง (Hi-Temperature Flash pyrolysis) อุณหภูมิ 600-650 องศาเซลเซียส	การแกซิฟิเคชันด้วย ไอน้ำ (Steam Gasification) อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส	การแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูง (Hi-Temperature Steam Gasification) อุณหภูมิ 900-1,000 องศาเซลเซียส
Acids Aldehydes Ketones Furans Alcohols Complex- Oxygenates Phenols Guaiacols Syringols Complex- Phenolics	Benzenes Phenols Catechols Naphthalenes Biphenyls Phenanthrenes Benzofurans Benzaldehydes	Naphthalenes Acenaphthalenes Fluorenes Phenanthrenes Benzaldehydes Phenols Naphthofurans Benzanthracenes	Naphthalene Acenaphthalene Phenanthrene Fluoranthene Pyrene Acephennanthrylene Benzanthracenes Benzopyrenes 226 MW PAHs 276 PAHs

## 2.3 ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน (Fundamental Combustion Reactions)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศ และ/หรือไอน้ำ ดังแสดงในตาราง 2.2 ปฏิกิริยามีการศึกษามานานแล้ว นับว่าเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถนำมาอธิบายกระบวนการเผาไหม้ต่างๆ ได้

ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน (Brag และ Chittenden, 1979)

ปฏิกิริยา	ลักษณะของปฏิกิริยา	$\Delta H$		
		แคลอรีต่อกรัมต่อโมล (Cal/g-mol)	กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อโมล (kJ/kg-mole)	บีทียูต่อปอนด์ต่อโมล (Btu/lb-mole)
1. $C + O_2 \longrightarrow CO_2$	-	94,410	408,632	169,938
2. $C + 1/2O_2 \longleftrightarrow CO$	-	27,056	123,092	48,701
3. $C + CO_2 \longleftrightarrow 2CO$	+	40,298	162,448	72,536
4. $CO + 1/2O_2 \longleftrightarrow CO_2$	-	67,355	285,540	121,239
5. $C + H_2O \longleftrightarrow CO + H_2$	+	32,454	118,905	68,917
6. $C + 2H_2O \longleftrightarrow CO_2 + 2H_2$	+	24,610	75,362	44,298
7. $CO + H_2O \longleftrightarrow CO_2 + H_2$	-	7,844	43,543	14,119

หมายเหตุ 1. ปฏิกริยาทดลองที่สภาวะ 1,200 เคลวิน (1,700 องศาฟาเรนไฮต์, 927 องศาเซลเซียส) ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนที่ใช้เป็นมาตรฐานอยู่ในรูปแกรไฟต์

2. เครื่องหมายลบ หมายถึง ปฏิกริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) เครื่องหมายบวก หมายถึง ปฏิกริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction)

ปฏิกริยาที่ 1 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนในบริเวณที่มีคาร์บอนมากเกินไปเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกริยาที่ 2 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

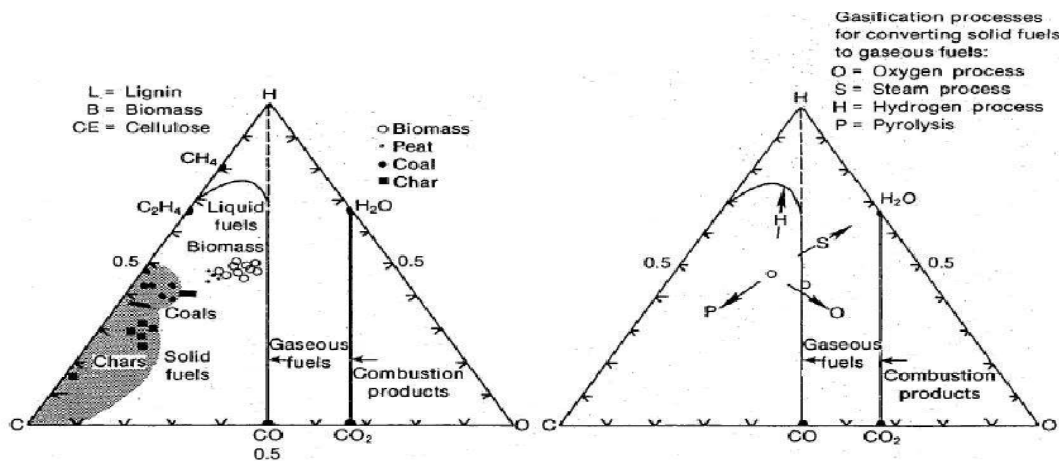
ปฏิกริยาที่ 3 เรียกว่า Boundouard Reaction เป็นปฏิกริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกริยากับคาร์บอนที่มากเกินไป (Excess Carbon) ในอุณหภูมิของแข็งเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ มีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเข้าทำปฏิกริยา (Reactivity) ของเชื้อเพลิงต่างๆ พบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกริยาขึ้นกับธรรมชาติของเชื้อเพลิงและลักษณะเฉพาะผิว (Surface Characteristic) ของเชื้อเพลิง อัตราการเกิดปฏิกริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการแตกตัวของคาร์บอนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเชื้อเพลิง เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้

ปฏิกริยาที่ 4 จะเกิดขึ้นเมื่อมีออกซิเจนเหลืออยู่ คาร์บอนมอนอกไซด์จะรวมตัวกับออกซิเจนได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ส่วนในกรณีที่ 5 และ 6 เป็นกรณีที่ป้อนไอน้ำเข้าไปพร้อมกับอากาศ เกิดการแตกตัวของไอน้ำเข้าทำปฏิกริยากับคาร์บอน ปฏิกริยาที่ 5 เราเรียกว่า Water Gasification

ปฏิกริยาที่ 7 เป็นปฏิกริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ปฏิกริยานี้เรียกว่า ปฏิกริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water Gas Shift Reaction) ปฏิกริยาเหล่านี้เป็นปฏิกริยาผันกลับได้ (Reversible) (Zhang และคณะ, 2007)

อย่างไรก็ตามรูปแบบการแปรสภาพทางความร้อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารที่เข้าทำปฏิกริยาและรูปแบบการเกิดปฏิกริยา โดยแผนภาพอธิบายกระบวนการเหล่านี้ไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ แสดงดังกราฟสามเหลี่ยม ภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล (Prostien และ Hicks, 1982)

จากภาพที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าการผลิตแก๊สหรือผลิตภัณฑ์ใดๆ จากกระบวนการทางความร้อนจะแปรตามสัดส่วนของไฮโดรเจนและออกซิเจน ส่วนคาร์บอนคือปัจจัยด้านเชื้อเพลิงที่ใส่ลงไป ยกตัวอย่างเช่น การไพโรไลซิสเป็นสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยและมีคาร์บอนค่อนข้างมาก ผลของสภาวะนี้เช่นนี้จะให้ปริมาณถ่านชาร์มาก

## 2.4 ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ในปัจจุบันกระบวนการการแก๊สซิฟิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

### 2.4.1 แก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ (Steam Gasification)

ใช้ไอน้ำทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็ง โดยทั่วไปอุณหภูมิของเตาจะสูงมากและอาจต้องใช้ความดันในเตาสูง โดยใช้ความร้อนจากภายนอกระบบมาช่วยให้อุณหภูมิของเตาสูงเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นจะมีองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 3.3-5.6 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร หรือที่เรียกว่า แก๊สเชื้อเพลิงที่มีความร้อนต่ำ (Low Heating Value Gas or Low Btu Gas) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วน of เชื้อเพลิงกับอากาศและไอน้ำ ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้





#### 2.4.2 ออกซิเดทีฟแกซิฟิเคชัน (Oxidative Gasification)

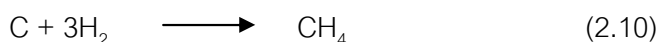
ใช้แก๊สออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา แก๊สออกซิเจนมาจากการใช้อากาศผ่านเข้าสู่เตา หรืออาจใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ได้ แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดจากการใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์จะมีความร้อนสูงกว่าที่เกิดจากการใช้อากาศเนื่องจากไม่มีแก๊สไนโตรเจน แก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีความร้อนประมาณ 9.3-20.5 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร หรือที่เรียกว่า แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium Heating Value Gas or Medium Btu Gas)

#### 2.4.3 ไฮโดรแกซิฟิเคชัน (Hydrogasification)

ใช้แก๊สไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็ง โดยภายในเตาความร้อนสูงมากและใช้ความดันในเตาสูงถึง 200 บรรยากาศ แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นมีเทน เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value Gas or High Btu Gas) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้เทียบเท่ากับแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas, SNG) โดยผ่านกระบวนการเมทาเนชัน (Methanation) ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทน ดังสมการที่ 2.4

### 2.5 ประเภทของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตแก๊ส

โดยทั่วไปเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตแก๊สแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ เตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่ง และเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบด



#### 2.5.1 เตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่ง (Fixed-bed Processes)

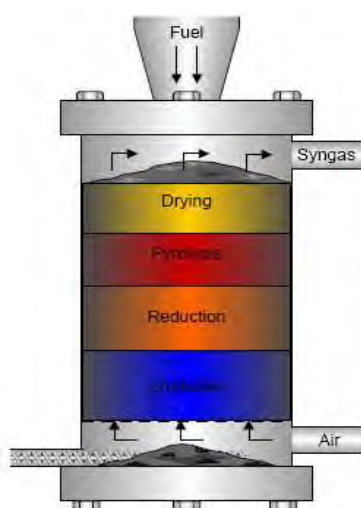
เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สแบบเบดนิ่งเมื่อแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศและเทียบกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิงชีวมวลจะสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด คือ

##### 2.5.1.1 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดแก๊สไหลขึ้น (Updraft Gasifiers)

เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดนี้เป็นแบบที่ง่ายและเก่าแก่ที่สุด โดยเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่เตาทางด้านบน โดยมีตะแกรงรองรับชีวมวลอยู่ด้านล่างของเตา อากาศหรือออกซิเจนจะถูกป้อนเข้าสู่ด้านล่างโดยผ่านตะแกรงขึ้นไปด้านบน ดังนั้นจึงสามารถเรียกเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊ส

ชนิดนี้ได้ชื่อหนึ่งตามทิศทางการไหลของอากาศหรือออกซิเจน ซึ่งมีทิศสวนกันกับการไหลของเชื้อเพลิงซึ่งมวลว่าเป็นเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สแบบ Counter Current Flow เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดอากาศไหลขึ้นนี้จะประกอบด้วย บริเวณการเกิดปฏิกิริยาเรียงลำดับดังแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งเมื่อเรียงลำดับจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำจะสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ คือ บริเวณการเผาไหม้ บริเวณที่เกิดการรีดักชัน บริเวณที่เกิดการไพโรไลซิสและบริเวณการเกิดการอบแห้งหรือลดความชื้น โดยทั่วไปบริเวณที่มีอุณหภูมิ เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดนี้จะถูกสร้างขึ้นเพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่เรียกว่า “แก๊สชีวมวล” เป็นผลิตภัณฑ์หลัก ส่วนถ่านและน้ำมันดินที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์รอง (Breag และ Chittenden, 1982)

เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงที่สุดเนื่องจากแก๊สร้อนที่เกิดขึ้นจะมีการไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิง ซึ่งความร้อนสัมผัสในแก๊สร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับเชื้อเพลิง ทำให้อุณหภูมิจากแก๊สที่ออกจากเตามีอุณหภูมิต่ำไม่สูงมากนัก โดยอุณหภูมิจากแก๊สที่ออกจากเตาจะอยู่ที่ประมาณ 100 – 300 องศาเซลเซียส ข้อดีของเตาชนิดนี้คือสามารถใช้กับชีวมวลที่มีความชื้นสูงๆ ได้ ซึ่งอาจสูงได้ถึงร้อยละ 50 และความดันลด (Pressure Drop) ในระบบไม่สูงมากนัก ส่วนข้อเสียของเตาชนิดนี้คือแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีปริมาณของน้ำมันดินปนเปื้อนอยู่สูงมาก ประมาณร้อยละ 10-20 หรือประมาณ 50 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ดังนั้นเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดนี้จึงจำเป็นต้องมีระบบในการทำความสะอาดแก๊สที่มีประสิทธิภาพสูง ก่อนที่จะมีการนำแก๊สเชื้อเพลิงนี้ไปใช้ในการเดินเครื่องยนต์สันดาปภายใน ถ้าระบบทำความสะอาดแก๊สไม่มีประสิทธิภาพสูงเพียงพอจะก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันและสร้างความเสียหายให้แก่เครื่องยนต์ได้

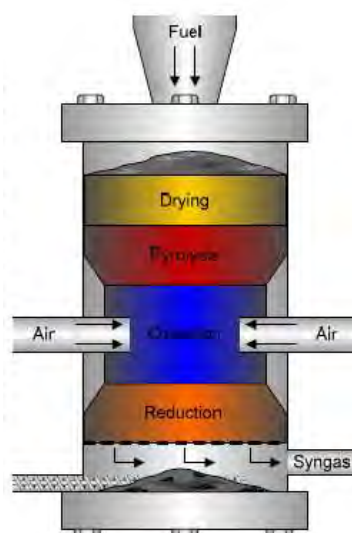


ภาพที่ 2.5 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดแก๊สไหลขึ้น (Olofsson และคณะ, 2005)



### 2.5.1.2 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดแก๊สไหลลง (Downdraft Gasifiers)

เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดนี้อาจรู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า Cocurrent Flow เนื่องจากทิศทางการไหลของอากาศหรือออกซิเจนที่ป้อนเข้าสู่เตา จะมีทิศทางเดียวกันกับการไหลของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่ทางด้านบนของเตา ขณะที่อากาศจะถูกป้อนเข้าด้านข้างของเตาในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะออกจากเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สทางด้านล่าง เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดไหลลงนี้ ส่วนล่างสุดจะเป็นบริเวณที่เกิดรีดักชัน ถัดขึ้นมาคือบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ บริเวณที่เกิดการไพโรไลซิสและบริเวณลดความชื้น ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดแก๊สไหลลง (Olofsson และคณะ, 2005)

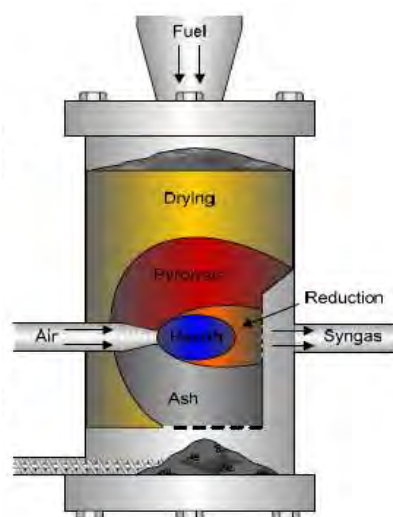
น้ำมันดินที่ได้จากการไพโรไลซิสนั้นจะผ่านบริเวณเผาไหม้ไปพร้อมกับแก๊สอื่นๆ น้ำมันดินเหล่านี้จะถูกทำให้สลายตัวไปเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมากของบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ จึงทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นี้มีปริมาณของน้ำมันดินที่ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่ต่ำมากน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นข้อดีของเตาชนิดนี้ ส่วนข้อเสียของเตาชนิดนี้คือ อุณหภูมิของแก๊สที่ออกจากเตาจะมีค่าสูงประมาณ 600-800 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องมีระบบที่ช่วยในการลดอุณหภูมิของแก๊สที่ได้และเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดนี้ไม่เหมาะกับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 20 และปริมาณเถ้าสูงเกินร้อยละ 6 เนื่องจากเถ้าอาจจะหลอมละลายติดกับบริเวณคอคอด ซึ่งจะขัดขวางการไหลของเชื้อเพลิงและแก๊สได้ นอกจากนี้แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ยังมีปริมาณของเถ้าและฝุ่นละอองปนเปื้อนอยู่สูง สำหรับประโยชน์ของเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้

คือสามารถใช้วัสดุที่ไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์และเป็นระบบที่ให้เกิดเชื้อเพลิงสม่ำเสมอดีกว่าระบบเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดแก๊สไหลขึ้น

### 2.5.1.3 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดแก๊สไหลขวาง (Crossdraft Gasifiers)

เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดนี้จะเป็นแบบที่เล็กและเบาที่สุดใน 3 แบบ อากาศที่ป้อนเข้าไปในเตาจะไหลทิศทางขวางกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิง ดังภาพที่ 2.7

บริเวณเผาไหม้และบริเวณที่เกิดรีดักชันจะอยู่ใกล้ชิดกันมาก ดังนั้นจึงสามารถผลิตแก๊สได้อย่างรวดเร็วและแปรผันได้ง่าย โดยปกติบริเวณการเผาไหม้จะอยู่กึ่งกลางของเตาปฏิกรณ์ แต่ขอบเขตการไหม้อาจขยายกว้างขึ้นได้เมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้น



ภาพที่ 2.7 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดแก๊สไหลขวาง (Olofsson และคณะ, 2005)

แก๊สที่ได้จากเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดนี้จะมีอุณหภูมิและสิ่งปนเปื้อนค่อนข้างสูง เตาแบบนี้จะสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้เร็วกว่าอีกสองแบบ และอุณหภูมิภายในเตาจะไม่สูงมาก

### 2.5.2 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Gasifiers)

เตาปฏิกรณ์ชนิดนี้สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณสมบัติบางอย่างไม่เหมาะสมที่นำไปใช้กับเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สแบบเบดนิ่ง กล่าวคือเตาชนิดนี้สามารถใช้ได้กับ

เชื้อเพลิงที่มีความชื้นค่อนข้างสูงได้ รวมถึงสามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ ปริมาณของเถ้าสูง และคุณสมบัติการหลอมเหลวของเถ้าต่ำได้ โดยทั่วไปแล้วเตาชนิดนี้จะทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 750-950 องศาเซลเซียส เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไดซ์เบดนี้จะประกอบด้วยเบดที่ร้อน โดยทั่วไปจะใช้ทรายหรือเซรามิกเป็นเบด เชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกป้อนเข้าไปในเบดและใช้อากาศหรือแก๊สไนโตรเจนเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดซ์ ซึ่งขึ้นกับขนาดและความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อความเร็วของเบด สำหรับเตาปฏิกรณ์แก๊สแบบนี้จะไม่สามารถแยกขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลงชีวมวลออกเป็น 4 ขั้นตอนแบบเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สแบบเบดหนึ่งได้ชัดเจน น้ำมันดินที่เกิดขึ้นจากการผลิตโดยใช้เตาชนิดนี้นั้นโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

### 2.5.2.1 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบดชนิดฟองอากาศ (Bubble Fluidized Bed Gasifier)

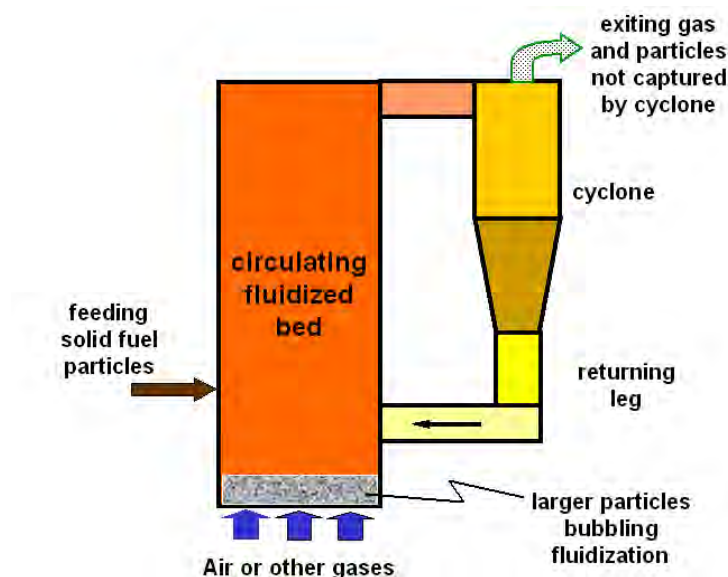
เมื่อความเร็วของอากาศที่ถูกป้อนเข้าไปในเตามีค่าต่ำๆ เบดที่อยู่ภายในเตาจะยังคงอยู่ในสภาพนิ่ง (Fixed Bed) แต่เมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้นจนมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ (Minimum Fluidizing Velocity) อากาศจะเกิดการแทรกตัวผ่านเบด ทำให้เบดเกิดการขยายตัวมีลักษณะคล้ายฟอง โดยการขยายตัวของเบดนั้นจะน้อยเมื่อเทียบกับความสูงของเบดที่อยู่ในสภาพนิ่ง เมื่อเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเบดไปยังอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลจะสูงมากประมาณ 400 วัตต์ต่อตารางเมตรต่อเคลวิน ( $W/m^2/K$ ) ซึ่งอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้เกิดการระเหยแห้งและการไพโรไลซิสขึ้น (Drying and Pyrolysis) ซึ่งทำให้ได้ผลผลิตคือ แก๊สต่างๆ น้ำมันดิน และถ่าน ซึ่งเป็นผลผลิตหลัก ปฏิกิริยาของแก๊สต่างๆ ที่เกิดในบริเวณที่เรียกว่า Freeboard เช่น ปฏิกิริยาการแตกพันธะ (Cracking Reaction) นั้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของแก๊สที่ได้ภายในเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สอย่างต่อเนื่อง เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศโดยทั่วไปจะประกอบด้วยห้องเผาไหม้ (Chamber) ซึ่งอาจถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical) หรือรูปทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular) ดังแสดงในภาพ 2.8



ภาพที่ 2.8 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Geldart, 1986)

### 2.5.2.2 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบดชนิดหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Gasifier)

ในกรณีความเร็วของอากาศถูกเพิ่มให้สูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับหรือสูงกว่าความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไดซ์ (Terminal Velocity) ของอนุภาคแล้ว การสูญเสียอนุภาคออกจากตัวเตาจะมีมากขึ้น พื้นผิวหน้าของเบดจะสังเกตเห็นได้ไม่ชัดเจนเนื่องจากเบดจะถูกพาให้เคลื่อนที่ตลอดความสูงของเตา ซึ่งจะทำให้มีของแข็งปนเปื้อนออกมาพร้อมกับแก๊สที่ผลิตได้เป็นจำนวนมาก จึงได้มีการออกแบบระบบเพื่อให้มีการนำเบดกลับเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สอีกครั้ง ซึ่งเบดที่ถูกนำกลับมาจะช่วยรักษาความสูงของเบดในเตา ในขณะที่อนุภาคของแข็งจะถูกนำกลับเข้ามาเพื่อให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปของคาร์บอน (Carbon Conversion Efficiency) สูงขึ้น โดยเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดนี้จะแตกต่างจากเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศตรงที่ไม่สามารถแยกบริเวณที่มีอนุภาคแข็งแรงหนาแน่นกับบริเวณที่มีอนุภาคแข็งเบาบางได้อย่างชัดเจน ข้อดีของเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบดเมื่อเทียบกับเบดนิ่งคือ มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ มีการถ่ายเทความร้อนที่ทั่วถึงสม่ำเสมอภายในเบดจึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ แสดงดังภาพที่ 2.9

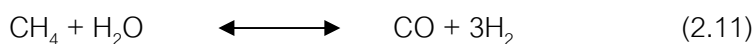


ภาพที่ 2.9 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Geldart, 1986)

## 2.6 กระบวนการปฏิกริยารีฟอร์มมิง (Reforming Reaction Process)

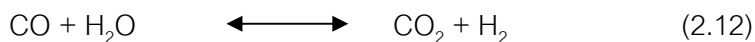
### 2.6.1 ปฏิกริยารีฟอร์มมิง (Reforming Reaction)

กระบวนการรีฟอร์มมิงเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน คำว่า “การรีฟอร์มมิง” มักมีผู้เข้าใจผิดว่าเป็นกระบวนการเดียวกันกับกระบวนการรีฟอร์มมิงในอุตสาหกรรมน้ำมัน (Oil industry) ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มค่าออกเทน (Octane) ให้แก๊สโซลีน ส่วนในอุตสาหกรรมแก๊ส (Gas industry) กระบวนการรีฟอร์มมิงเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าความร้อน (Heating value) สูง เป็นแก๊สผสมที่มีค่าความร้อนต่ำ การผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกริยา ปฏิกริยาพื้นฐาน คือ การเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกริยา



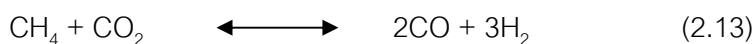
ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาดูดความร้อน และปฏิกริยาจะเข้าสู่สมดุลทางขวาเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในการที่เพิ่มร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมีเทน จะต้องทำให้กระบวนการมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส และใช้ไอน้ำมากเกินพอที่ความดันบรรยากาศ ในกรณีนี้ อัตราส่วนของไอน้ำกับแก๊สมีเทนโดยปริมาตรประมาณ 4:1

นอกจากการเปลี่ยนแก๊สมีเทนด้วยปฏิกิริยาข้างต้นแล้ว ยังมีการเปลี่ยนแก๊สไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์โดยปฏิกิริยา Water-gas Shift Reaction



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและจะเข้าสู่สภาวะสมดุลทางซ้ายมือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณไอน้ำที่มากเกินไปจะทำให้ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดได้อย่างรวดเร็วและองค์ประกอบของแก๊สที่ได้ขึ้นอยู่กับภาวะสมดุลของปฏิกิริยา

การเปลี่ยนแก๊สมีเทนด้วยไอน้ำจะได้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณไฮโดรเจนสูงกว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์อย่างมาก อัตราส่วนต่ำสุดระหว่างแก๊สไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จะเป็น 3:1 ในขณะที่ความต้องการที่จะนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์ปริมาณอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์จะอยู่ในช่วง 1:1 ถึง 2.3:1 การปรับอัตราส่วนในช่วงดังกล่าวอาจจะกระทำได้โดยใช้ไฮโดรคาร์บอนเหลวที่มีสูตร  $-\text{CH}_2-$  หรือโดยการเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปด้วย เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนไปเป็นแก๊สสังเคราะห์ได้เช่นกัน



ปฏิกิริยานี้ดูดความร้อนและจะเข้าสู่สมดุลทางขวาเมื่ออุณหภูมิสูงอย่างเพียงพอ ปฏิกิริยานี้จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าปฏิกิริยาระหว่างมีเทนกับไอน้ำ แต่จะให้อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเป็น 1:1

## 2.7 แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas หรือ Syngas)

แก๊สสังเคราะห์ คือ แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) ใช้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง หรือในกระบวนการถลุงเหล็ก แก๊สสังเคราะห์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปแบบแก๊สผสม หรือแยกไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน หรือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บริสุทธิ์ โดยการนำประโยชน์ในรูปแบบแก๊สผสมนั้นจะใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol) ไดมethylอีเธอร์ หรือใช้เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ในการ

ถลุงเหล็ก ส่วนในการแยกใช้จะใช้อย่างมากในกระบวนการกลั่นแยก การผลิตแอมโมเนีย และใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสารเคมีหลายชนิด (Laminine และ Dick, 2000)

### 2.7.1 การนำแก๊สสังเคราะห์มาใช้ประโยชน์

การใช้ประโยชน์ในรูปแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้น (Primary product) ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญมากในการผลิตสารเคมีอินทรีย์อื่นๆ ได้อย่างมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกปิโตรเคมี ในตอนต้นของทศวรรษที่ 1920 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้ค้นพบว่า แก๊สสังเคราะห์สามารถเปลี่ยนไปเป็นเมทานอลได้อย่างดี โดยใช้ซิงก์-โครเมียมออกไซด์ (Zinc-Chromium Oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบแอลเคน (Alkanes) ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ ที่มีเหล็กเป็นโปรโมเตอร์และตัวรองรับ ปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นแอลเคนและแอลกอฮอล์ เป็นที่รู้จักกันทั่วโลกคือปฏิกิริยา ฟิตเชอร์ ทรอปส์ช (Fischer – Tropsch reaction) โดยจุดประสงค์ของปฏิกิริยานี้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuel) ซึ่งเป็นสารแอลเคนที่มีโมเลกุลสูง (Volken, 1979)

สำหรับการผลิตเมทานอลนั้นนอกจากจะนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงแล้ว ยังนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารปิโตรเคมีอื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น พอร์มัลดีไฮด์ กรดแอสติติกเมทิลคลอไรด์ เป็นต้น นอกเหนือจากนี้ยังใช้เป็นตัวเติม (Additive) ในแก๊สโซลีนในรูปของเมทิลเทอร์เชียรีบิวทิลอีเทอร์ (Methyl tertiary butyl ether, MTBE)

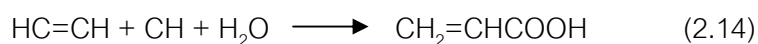
นอกจากนี้แก๊สสังเคราะห์ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าแร่เหล็กที่ขุดได้จากเหมืองในตอนแรกจะเป็นเหล็กออกไซด์ เมื่อสัมผัสกับแก๊สสังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ซึ่งพร้อมจะถูกนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อให้ได้เป็นเหล็กกล้าตามต้องการ

#### 2.7.1.1 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

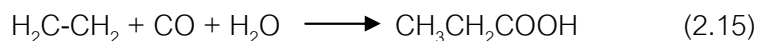
นอกจากการใช้ประโยชน์แก๊สสังเคราะห์ในลักษณะรวมแล้ว ยังสามารถแยกแต่ละแก๊สมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์สารเคมีตัวอื่นๆ ได้อีก จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงประโยชน์ของแก๊สแต่ละชนิด แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สพิษที่ติดไฟได้ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นเกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย โดยสามารถที่จะแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้โดยวิธีการดูดซับด้วยทองแดงหลอมเหลว โดยมากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะนำไปใช้ปฏิกิริยาพื้นฐานที่สำคัญ 2 ปฏิกิริยาคือคาร์บอนิลเลชัน

(Carbonylation) และไฮโดรฟอร์มมิเลชัน (Hydroformylation) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มมิเลชัน นั้นอาจเรียกอย่างหนึ่งว่าปฏิกิริยาออกโซ (Oxo Reaction)

ในกระบวนการโอเลฟิน คาร์บอนิเลชัน โดยทำปฏิกิริยากับน้ำ แอลกอฮอล์ เอมีน กรดคาร์บอกซิลิก โดยใช้โลหะกลุ่ม VIII เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้สารประกอบตัวใหม่ที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ เช่น การผลิตกรดอะคริลิก (Acrylic acid) โดยใช้เอเททิลีนทำปฏิกิริยากับน้ำ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้นิกเกิลเตตระคาร์บอนิล ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 30 บาร์ จะได้ปริมาณของกรดอะคริลิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยาที่ 2.14



ในการผลิตกรดโพรพิโอนิกจากเอทิลีน สามารถทำได้โดยกระบวนการไฮดรอกซีคาร์บอนิเลชัน (Hydroxycarbonylation) โดยใช้นิกเกิลโพรพิเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 270 ถึง 320 องศาเซลเซียส ความดัน 200 ถึง 300 บาร์ จะได้กรดโพรพิโอนิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยาที่ 2.15



นอกจากนี้ยังสามารถนำแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตกรดฟอร์มิก และกรดโพรพิโอนิก ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มมิเลชัน หรือในอุตสาหกรรมการผลิตอัลดีไฮด์ต่างๆ

### 2.7.1.2 แก๊สไฮโดรเจน

กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนมีอยู่มากมาย โดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และปริมาณแก๊สที่ต้องการผลิต ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ด้วย เช่น ราคา และความเหมาะสม วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนอย่างง่าย คือ การแยกสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Electrolysis of an aqueous solution) เช่น การแยกน้ำเกลือด้วยไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้โดยการผ่านไอน้ำไปบนเหล็กสปองจ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ โดยในปัจจุบันพบว่าแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์



ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการต่างๆ เช่น การสังเคราะห์แอมโมเนียนิยมใช้กระบวนการฮาเบอร์ (Haber Process) โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้องและจากหลัก เลอ ชาเตอริเยร์ (Le Chatelier's Principle) พบว่าควรทำที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำๆ และยังมีการใช้โปรโมเตอร์เหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ร่วมกับออกไซด์ของโลหะอื่นๆ ในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีค่าร้อยละการเปลี่ยนที่สูงขึ้น

การนำแก๊สไฮโดรเจนไปใช้ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมจะใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันและผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีอื่นๆ โดยใช้กระบวนการไฮโดรซัลเฟอร์ไรซิง (Hydrosulfurizing) และกระบวนการรีฟอร์มมิงใช้เพื่อเป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งต้องมีการกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ให้มีปริมาณต่ำกว่า 10 พีพีเอ็ม

## 2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยไม่เกิดการสูญเสียในขบวนการ ตัวเร่งปฏิกิริยามีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในการเลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดข้างเคียง การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้ ยังคงต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก

ความว่องไวและความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี มีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมองภาพว่าโมเลกุลของสารตั้งต้นถูกเปลี่ยนสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นสารผลผลิตระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) หลายทฤษฎีได้พยายามอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ทฤษฎีภาวะทรานสิชัน (Transition State Theory) อธิบายว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยลดพลังงานศักย์ขวางกั้น (Potential energy barrier) ซึ่งสารตั้งต้นต้องมีเพื่อเปลี่ยนเป็นสารผลผลิต คือ ลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาให้ต่ำลงนั่นเอง (วิทยา เรื่องพหุสัทธ์, 2534)

### 2.8.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นสารช่วยควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา โดยไม่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาเคมี แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้นโดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะของเหลว

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะต่างกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะอยู่ในรูปแก๊ส หรือของเหลว ซึ่งนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม

การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธุ์นี้เนื่องจากความว่องไวและความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา มีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงควรมีพื้นผิวต่อปริมาตรมาก โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามาเคลือบบนวัสดุรองรับ (Support) ที่มีรูพรุนสูง

## 2.8.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารหลายชนิด แต่พอจะแบ่งออกได้ดังนี้

- ส่วนที่ว่องไว (Active species) ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริง ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจประกอบด้วย ส่วนที่ว่องไวล้วนๆ แต่ในกรณีที่ส่วนที่ว่องไวเป็นสารที่มีราคาแพง หรือมีพื้นที่ผิวต่ำ จะนิยมใช้วิธีเคลือบส่วนที่ว่องไวลงบนตัวรองรับ

- ตัวรองรับ (Support) มักจะเป็นสารที่ราคาถูกและมีพื้นที่ผิวสูง หน้าที่หลักของตัวรองรับ คือการเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่ส่วนที่ว่องไว นอกจากนี้ในบางกรณีจะมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างตัวรองรับและส่วนที่ว่องไว ซึ่งทำให้ส่วนที่ว่องไวมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยทั่วไปจะเลือกใช้ ตัวรองรับที่เฉื่อยและไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ แต่ในบางกรณีตัวรองรับจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยาด้วย

- ตัวโปรโมเตอร์ (Promoter) เป็นสารที่ไม่ได้ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาโดยตรง แต่ช่วยให้ส่วนที่ว่องไว ทำหน้าที่ได้ดีขึ้น เช่น ไปลดการเผาผลาญ (sintering) และการอุดตัน (fouling) ลง

## 2.8.3 ตัวรองรับ (Catalysis supports)

เนื่องจากปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้น จะเกิดขึ้นกับอะตอมหรือไอออนที่อยู่บนพื้นผิวของส่วนที่ว่องไวเท่านั้น ในกรณีที่ส่วนที่ว่องไวเป็นสารที่มีราคาแพงจึงต้องพยายามเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่สารเหล่านี้ปรากฏบนพื้นผิวให้มากที่สุด วิธีหนึ่งที่จะช่วยในการเตรียมตัวเร่ง

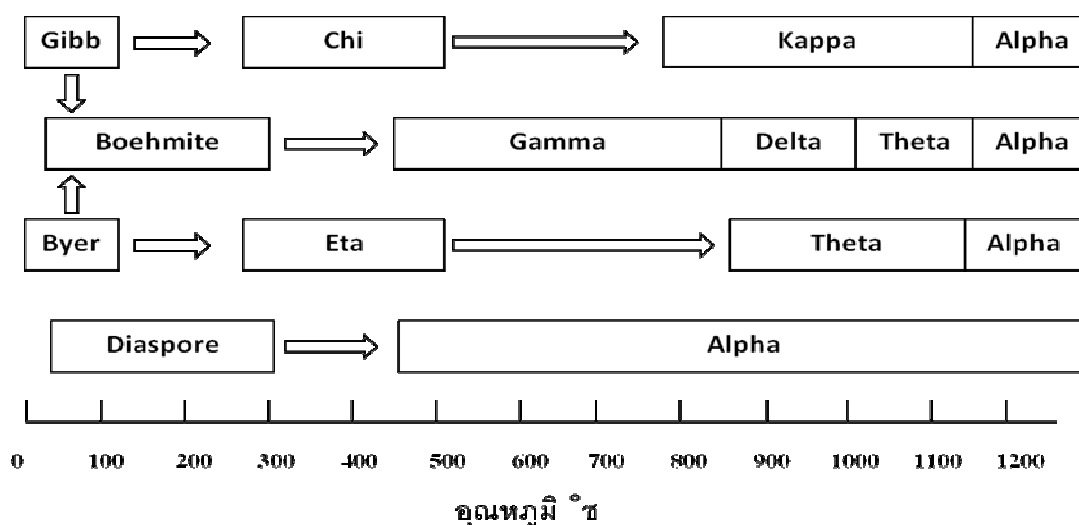
ปฏิกิริยาให้มีขนาดเล็กมากๆ แต่วิธีการนี้ไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวได้มากนัก นอกจากนี้เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง อนุภาคเล็กๆ เหล่านี้มีแนวโน้มที่จะหลอมรวมตัวกัน อีกทางหนึ่งที่ยิยมทำกันคือนำเอาส่วนที่ว่องไวไปเคลือบบนวัสดุอื่นที่มีพื้นที่ผิวสูง (ซึ่งเรียกว่า ตัวรองรับ) ซึ่งนอกจากจะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของส่วนที่ว่องไวแล้ว ในบางครั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของส่วนที่ว่องไวด้วย และลดการเกิดการหลอมตัวรวมกันของส่วนที่ว่องไวด้วย

การเลือกใช้ตัวรองรับ ขึ้นอยู่กับเกณฑ์หลายข้อ เช่น

1. เชื้อต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
2. คุณสมบัติทางกลและกายภาพตามต้องการ เช่น ความแข็ง ความทนทานต่อการกระแทก ความทนต่อแรงกดอัด ตัวอย่างเช่น ถ้านำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้ในฟลูอิดไคซ์ ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะต้องทนต่อสภาวะการกระแทก การเสียดสี ฯลฯ ที่เกิดขึ้นในเบดได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุในเบดหนึ่งที่อยู่ทางตอนล่างของเบดจะต้องสามารถรับน้ำหนักของเบด และความดันลดที่เกิดขึ้นได้
3. เสถียรภาพภายใต้สภาวะการทำงานและสภาวะการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) ซึ่งอาจเป็นช่วงที่ต้องเผชิญกับอุณหภูมิที่สูง ซึ่งตัวรองรับนั้นควรจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง
4. ความเป็นรูพรุน ขนาดของรูพรุนและการแจกแจงขนาดของรูพรุน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการแพร่ของสารตั้งต้นเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา
5. ราคา ซึ่งไม่ควรแพงเกินไป

#### 2.8.4 อะลูมินา (Alumina- $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

อะลูมินาเป็นตัวรองรับที่ถูกใช้งานมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากราคาไม่แพง มีโครงสร้างที่มีเสถียรภาพสูง (จุดหลอมเหลวสูงกว่า 2,000 องศาเซลเซียส) สำหรับปฏิกิริยาทั่วไปอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไม่เกิน 800 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างเป็นแกมมาอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) แต่ถ้าได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิขึ้นไปสูงถึง 850 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นรูปแบบเดลตาอะลูมินา ( $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) และที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,100 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นรูปแบบซีตาอะลูมินา ( $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) และกลายเป็นรูปแบบอัลฟาอะลูมินา ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) แสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 เส้นทางการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอะลูมินา (Satterfield, 1993)

### 2.8.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ (Metal Supported Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ช่วยเพิ่มอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สนใจ โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีผลช่วยเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไปข้างหน้า (Forward rate) พร้อมกับกับเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reverse rate) ทำให้ปฏิกิริยาเคมีที่สนใจเข้าสู่สมดุลเคมี (Thermodynamic) ของปฏิกิริยา

ในอุตสาหกรรมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะบนตัวรองรับ ด้วยเหตุผลที่ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อดีดังต่อไปนี้

1. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถจัดหาหรือเตรียมขึ้นได้ง่ายและปลอดภัย
2. สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้กับเตาปฏิกรณ์หลายชนิดและถ้าในเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลวแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ยังสามารถนำมาใช้ได้อีกโดยวิธีการกรอง
3. อนุภาคที่เป็นโลหะสามารถถูกแยกจากกันอย่างอิสระเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูง จึงไม่ทำให้อนุภาคโลหะรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ ตัวรองรับอาจเป็นตัวโปรโมเตอร์ (Promoter) ได้อีกด้วย

โดยส่วนข้อดีอื่นๆ ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนั้นๆ และระบบของปฏิกิริยา ได้แก่ ธรรมชาติของโลหะ ชนิดของโปรโมเตอร์ และตัวรองรับ เป็นต้น

### 2.8.6 โลหะแพลเลเดียม

แพลเลเดียมเป็นธาตุโลหะที่มีสัญลักษณ์ Pd ซึ่งอยู่ในหมู่เดียวกันกับกลุ่มโลหะโนเบล (Nobel Metal) เช่น นิกเกิล (Ni) และทองคำขาว (Pt) แพลเลเดียมเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic Number) 46 น้ำหนักอะตอม (Atomic Weight) 106.42 จุดหลอมเหลว (Melting Point) 1,557 องศาเซลเซียส จุดเดือด (Boiling Point) 2,964 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดึงอิเล็กตรอน (Electron Negativity) 2.2 การเรียงอิเล็กตรอน (Kr)  $4d^{10}$  แพลเลเดียมมีคุณสมบัติในการดูดซับไฮโดรเจนได้ดี โดยสามารถดูดซับปริมาตรของไฮโดรเจนได้มากกว่า 900 เท่าของปริมาตรของโลหะที่อุณหภูมิห้อง โดยเมื่อรวมกับไฮโดรเจนจะกลายเป็นไฮโดรเจนไฮไดร (PdH<sub>2</sub>) เมื่อโลหะแพลเลเดียมดูดซับไฮโดรเจนเป็นปริมาณมากจะทำให้โลหะแพลเลเดียมบวมตัวคล้ายฟองน้ำที่อุ้มน้ำ ดังนั้นโลหะแพลเลเดียมหรือโลหะเชิงซ้อนของแพลเลเดียม นำมาใช้ในเครื่องลดสารพิษจากการเผาไหม้ในรถยนต์ (Catalytic convertor) โลหะแพลเลเดียมบนคาร์บอนได้นำมาใช้เกี่ยวกับเคมีอินทรีย์ โดยสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่น แพลเลเดียมบนแบเรียมซัลเฟต

ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของโลหะแพลเลเดียม คือ เป็นโลหะที่อ่อนนิ่ม มีสีเงินขาว และมีจุดหลอมเหลวต่ำสุดในบรรดาโลหะกลุ่มโนเบลทำให้แพลเลเดียมเป็นโลหะที่มีความอ่อนตัว สำหรับเลขออกซิเดชันโดยทั่วไปของโลหะแพลเลเดียม คือ 0, +1, +2 และ +4

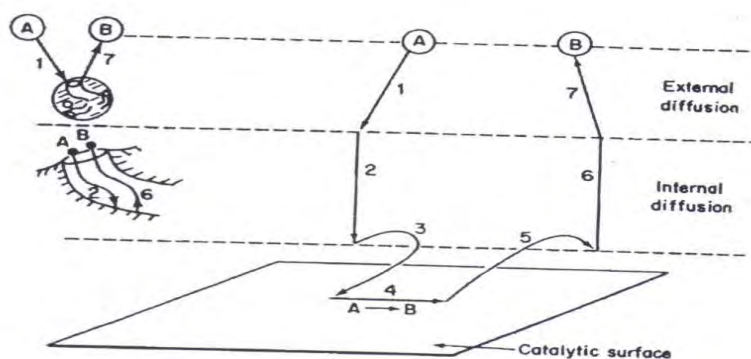
### 2.8.7 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาริวิฟพันท์

การเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาริวิฟพันท์สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลผ่านชั้นฟิล์มมายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. การแพร่ของสารตั้งต้นจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปตามรูพรุน
3. การดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งที่ว่างไว้ในการทำปฏิกิริยา (active site)
4. การเกิดปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่างไว้
5. การหลุดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากตำแหน่งที่ว่างไว้ในการทำปฏิกิริยา
6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากภายในรูพรุนออกมายังพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา

7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นฟิล์มกลับไปยังของไหลที่ไหลผ่าน

โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยามีวิธพันธุ์ถูกแสดงดังภาพ 2.11

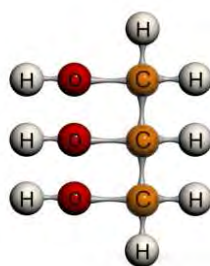


ภาพที่ 2.11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยามีวิธพันธุ์ (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ, 2534)

## 2.9 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย

### 2.9.1 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือที่เรียกว่า กลีเซอริน (Glycerine หรือ Glycerin) หมายถึง สารจำพวกโพลีไฮดริกแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ที่มีหมู่ไฮดรอกซี 3 หมู่ มีสูตรเคมี  $C_3H_8O_3$  มีชื่อทางเคมีว่า 1, 2, 3 - โพรเพนไตรออล (1, 2, 3 - Propantrio) และมีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล (Miller-Klein, 2006)

ในปัจจุบันกาลีเซอรอลถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีที่ไม่เป็นอันตรายโดยในปี ค.ศ. 1986 มีปริมาณการผลิตโดยรวมประมาณ 550,000 ตันต่อปี โดยเป็นการผลิตจากการแตกตัวของน้ำมันที่ได้จากธรรมชาติร้อยละ 75 และการสังเคราะห์จากโพรพีนร้อยละ 25

## 2.9.2 คุณสมบัติของกาลีเซอรอล

### 2.9.2.1 สมบัติทางกายภาพ

กาลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และมีโครงสร้างที่คล้ายน้ำตาล จึงทำให้กาลีเซอรอลมีรสหวาน และเนื่องจากโมเลกุลมีพันธะไฮโดรเจนจึงทำให้กาลีเซอรอลเป็นของเหลวหนืด กาลีเซอรอลมีจุดเดือด 290 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ

กาลีเซอรอลสามารถละลายได้ดีกับน้ำ เมทานอล เอทานอล และไอโซเมออร์ของโพรพานอล บิวทานอล และเพนทานอล รวมทั้ง ฟีนอล ไกลคอล โพรเพนไดออล เอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮทเทอโรไซคลิกที่ประกอบด้วยอะตอมของไนโตรเจนในวงแหวน กาลีเซอรอลไม่สามารถละลายได้ในไฮโดรคาร์บอนเกือบทั้งหมด แอลกอฮอล์ที่มีโซ่ยาว น้ำมันพืชและสัตว์ และตัวทำละลายจำพวกเฮโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม ดังนั้นกาลีเซอรอลจึงเป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์ต่อสารหลายชนิด ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น (Ooi และคณะ, 2001)

### 2.9.2.2 สมบัติทางเคมี

กาลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนกับแอลกอฮอล์ทั่วไป โดยที่หมู่ไฮดรอกซีด้านนอกจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไฮดรอกซีตรงกลาง ภายใต้สภาวะที่เป็นกลางหรือด่างกาลีเซอรอลสามารถทนความร้อนได้ถึง 275 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดอะโครลีนในทางตรงข้ามในสภาวะกรดเล็กน้อยพบว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะมีกลิ่นของอะโครลีน (อยู่ในช่วง 0.2 – 0.4 พีพีเอ็ม) โดยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อะโครลีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปฏิกิริยาของกาลีเซอรอลจึงควรทำในสภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง และที่อุณหภูมิห้องกาลีเซอรอลจะดูดความชื้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้กาลีเซอรอลยังถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย โดยที่อะตอมคาร์บอนด้านนอกจะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอกซิล และอะตอมคาร์บอนตรงกลางจะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอนิล

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล (Ooi และคณะ, 2001)

น้ำหนักโมเลกุล	92.09
จุดหลอมเหลว	18.0 องศาเซลเซียส
จุดเดือด (101.3 กิโลปาสกาล)	290.0 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น (20 องศาเซลเซียส)	1.261 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความหนืดพลวัต (20 องศาเซลเซียส)	1.410 ปาสคาลวินาที
ความต้านทานต่อการอัด (28.5 องศาเซลเซียส)	$2.1 \times 10^{-4}$ เมกะปาสคาล <sup>-1</sup>
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (15-20 องศาเซลเซียส)	$0.000615$ เคลวิน <sup>-1</sup>
แรงตึงผิว (20 องศาเซลเซียส)	63.4 มิลลินิวตันต่อเมตร
ความร้อนจากการเกิด	669 กิโลจูลต่อโมล
ความร้อนของการเผาไหม้	1,665 กิโลจูลต่อโมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ (55 องศาเซลเซียส)	88.2 กิโลจูลต่อโมล
(195 องศาเซลเซียส)	76.1 กิโลจูลต่อโมล
ความร้อนของการหลอมเหลว (18 องศาเซลเซียส)	18.3 กิโลจูลต่อโมล
ความร้อนของสารละลาย (สารละลายเจ็จางอนันต์)	5.8 กิโลจูลต่อโมล
ความจุความร้อน (26 องศาเซลเซียส)	2.41 กิโลจูลต่อโมล
(-80 องศาเซลเซียส)	1.91 กิโลจูลต่อโมล
(-108 องศาเซลเซียส)	0.91 กิโลจูลต่อโมล
การนำความร้อน (0 องศาเซลเซียส)	0.29 กิโลจูลต่อโมล
สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำสู่กลีเซอรอล (20 องศาเซลเซียส)	$1.336 \times 10^{-11}$ ตารางเมตรต่อวินาที
สภาพความนำไฟฟ้าจำเพาะ (20 องศาเซลเซียส)	0.1 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (25 องศาเซลเซียส)	42.48
จุดวาบไฟ	177 องศาเซลเซียส
จุดลุกติดไฟ	204 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิจุดติดไฟได้เอง	429 องศาเซลเซียส



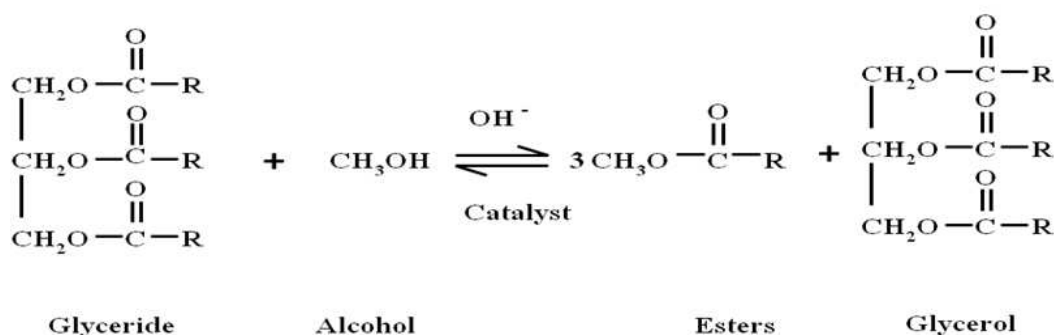
### 2.9.3 การผลิตกลีเซอรอล

การผลิตกลีเซอรอลอาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลธรรมชาติและกลีเซอรอลสังเคราะห์

โดยกลีเซอรอลธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของกระบวนการเปลี่ยนไขมันและน้ำมันเป็นกรดไขมัน หรือกรดไขมันของเมทิลเอสเทอร์ ในขณะที่กลีเซอรอลสังเคราะห์จะได้รับการสังเคราะห์ไพโรฟิน นอกจากนี้ยังมีกระบวนการอื่นๆ อีก เช่น การหมักน้ำตาล และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์โบไฮเดรต เป็นต้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่สำคัญในทางอุตสาหกรรม

กลีเซอรอลธรรมชาติไม่พบในรูปแบบอิสระในไขมันและน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์ แต่กลีเซอรอลธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยที่หมู่ไฮดรอกซีทั้ง 3 หมู่ มักจะเกิดปฏิกิริยาเป็นเอสเทอร์ กลีเซอรอลธรรมชาติในไขมันและน้ำมันอยู่ระหว่างร้อยละ 8 –14 การที่จะได้กลีเซอรอลธรรมชาติจากไขมันและน้ำมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์นั้น จะต้องทำให้ไขมันและน้ำมันแตกตัว ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไขมันและน้ำมันเพื่อผลิตกลีเซอรอลธรรมชาติได้เป็น 3 วิธีหลักๆ คือ การแตกตัวด้วยความดันสูง (High-Pressure Splitting) ปฏิกิริยาการทำสบู่ (Saponification) และปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Tranesterification) หรือปฏิกิริยาที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ดังแสดงในภาพที่ 2.13 เป็นการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์หรือที่เรียกว่า ไบโอดีเซล (Biodiesel) กับกลีเซอรอล ดังแสดงในภาพ 2.13 โดยแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ได้แก่ เมทานอล หรือเอทานอล ซึ่งเอสเทอร์ที่ได้นั้นอาจเป็นเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ตามแต่แอลกอฮอล์ที่เลือกใช้ และได้กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมออกมา ซึ่งกลีเซอรอลที่ได้มาจากกระบวนการนี้เป็นกลีเซอรอลที่ไม่บริสุทธิ์เนื่องจากมีการปนเปื้อนจากสารชนิดอื่นๆ เช่น แอลกอฮอล์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากปฏิกิริยาข้างต้น จึงทำให้การนำกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ประโยชน์มีข้อจำกัดหลายด้าน



ภาพที่ 2.13 กระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล (Jon, 2005)

#### 2.9.4 ปริมาณกลีเซอรอลดิบภายในประเทศ

จากนโยบายรัฐบาลที่สนับสนุนให้มีการใช้ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และความต้องการของผู้บริโภคที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมหรือผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ทั้งนี้การผลิตในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน ปริมาณกลีเซอรอลที่เกิดจากกระบวนการผลิตคิดเป็นร้อยละ 10 ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ทั้งนี้ในปี พ.ศ. 2554 คาดว่าจะมีความต้องการใช้ไบโอดีเซล 3.03 ล้านลิตรต่อวัน แสดงให้เห็นว่าจะมีกลีเซอรอลวันละประมาณ 300,000 ลิตรต่อวัน แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประมาณการใช้ไบโอดีเซลภายในประเทศและผลพลอยได้ที่เกิดขึ้น (ล้านลิตรต่อวัน)

ปี พ.ศ.	2548	2549	2550	2551	2552	2553	2554
ไบโอดีเซล	0.01	0.02	0.21	1.16	1.92	2.06	3.03
กลีเซอรอล	0.001	0.002	0.021	0.116	0.192	0.206	0.303

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2550

## 2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สิทธิศักดิ์ อุปวิวงศ์ (2535) ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ของเตาไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น เตาที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้ขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อนแก่ชีวมวลแทนการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อไม่ให้รบกวนการศึกษาในชั้นปฏิกิริยาการไพโรไลซิส และชั้นปฏิกิริยารีดักชันภายในเตามีสภาพอับอากาศ (ไร้ออกซิเจน) โดยการให้แก๊สอาร์กอนเข้าแทนที่ ชีวมวลที่ใช้ได้แก่ แกลบ และซีลีอียด ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของเตาเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นแต่น้ำมันดิน และถ่านชาร์จะลดลง อีกทั้งค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้น ถ้าความหนาของชั้นชีวมวลเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่ารูปทรงของเตาไพโรไลซิสแบบผอมสูงน่าจะให้ผลดีกว่ารูปทรงเตาแบบอ้วนเตี้ย

อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย (2538) ทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีวมวลจากกระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยใช้เครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่งโดยใช้แกลบ มีตัวแปรที่พิจารณาคือ อุณหภูมิของกระบวนการแกซีฟิเคชัน และอัตราการไหลอากาศ ในการทดลองแกลบจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่อง เพื่อเผาไหม้แกลบให้เกิดเป็นแก๊สร้อนและผ่านคอลัมน์เข้าทางด้านล่าง ปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 650-900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศและค่าอัตราการไหลของอากาศ 0.12 ถึง 0.32 ลูกบาศก์เมตรต่ออนาที องค์ประกอบของแก๊สชีวมวลจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ผลจากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวมวลในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิของการทดลอง 850 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของอากาศ 0.2 ลูกบาศก์เมตรต่ออนาที อัตราการป้อนแกลบ 100-260 กรัมต่ออนาที แก๊สชีวมวลที่ได้มีปริมาณร้อยละ 8.46 โดยปริมาตรแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ร้อยละ 5.12 โดยปริมาตรของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 7.78 โดยปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจน และร้อยละ 0.83 โดยปริมาตรของแก๊สมีเทน ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล 671.79 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร

สุพัทธรา ชีวธนาคุปต์ (2546) ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแกซีฟิเคชันจากชีวมวล ที่อุณหภูมิ 550 – 800 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยทำการทดลองใช้ไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม โดยมีการป้อนไอน้ำที่อัตราการป้อนคือ 0.15-2.1 กรัมต่อชั่วโมงต่อกรัมของชีวมวล โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ 1:1 โดยประมาณ พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัมต่อชั่วโมงต่อกรัมของชีวมวล และอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 1:1.612 และเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์

ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัมต่อชั่วโมงต่อกรัมของชีวมวล ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่า แก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0.96

Franco และคณะ (1998) ทำการศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ (steam gasification) ที่ความดันบรรยากาศในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิโดซ์เบด ทำการทดลองที่อุณหภูมิ ช่วง 700-900 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลที่ 0.4-0.85 โดยน้ำหนัก โดย ทำการศึกษาชีวมวล 3 ชนิด คือ pinus pinaster (ไม้เนื้ออ่อน), ยูคาลิปตัส และไม้โอ๊ก(ไม้เนื้อแข็ง) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันคือ ประมาณ 830 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนไอน้ำต่อชีวมวลคือ 0.6-0.7 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนการป้อนไอน้ำนี้จะทำให้ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมาก ปริมาณไฮโดรคาร์บอน และปริมาณทาร์ต่ำ จากงานวิจัยนี้พบว่าอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อองค์ประกอบของแก๊สคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น ขณะที่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงอย่างช้าๆ ที่ช่วงอุณหภูมิ 730-850 องศาเซลเซียส แล้ว คงที่และอัตราการป้อนไอน้ำก็มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส อัตราส่วนของไอน้ำต่อชีวมวลที่เหมาะสมคือ 0.6-0.7 โดยน้ำหนัก เพราะจะทำให้พลังงานสูงและมีการเปลี่ยนคาร์บอนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมาก

Chen และคณะ (2003) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสและการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลในการผลิตแก๊สในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ซึ่งมีความสูง 750 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ชีวมวลที่ใช้ศึกษาคือ ฟางข้าวและขี้เลื่อยไม้สน อุณหภูมิในการทดลองคือ 500 – 950 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์แก๊สจะเพิ่มขึ้น ส่วนถ่านชาร์ และน้ำมันดินจะลดลง และเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารระเหยมากขึ้น พบว่าจะมีแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น และในส่วนของ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการใส่แท่งคนภายในเตาปฏิกรณ์จะมีผลทำให้ได้ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น

Adhikari และคณะ (2007) ได้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลบนตัวรองรับซีเรียมออกไซด์บนอะลูมินาที่อุณหภูมิ 700 – 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหลของแก๊สพา 0.5 มิลลิเมตรต่ออนาที พบว่าที่อัตราส่วนของไอน้ำต่อกลีเซอรอล 1:6 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 700 – 900 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ก็เพิ่มสูงขึ้น และการเปลี่ยนแปลงกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มสูงสุด ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

$\text{Pd/Ce}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Rh/Ce}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 \sim \text{Ni/Ce}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Ru/Ce}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Pt/Ce}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Ce}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  ตามลำดับ

Zhang และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษากการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงเอทานอล และกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (Ir, Co และ Ni) บนตัวรองรับซีเรียออกไซด์ ( $\text{CeO}_2$ ) โดยการผลิตไฮโดรเจนจะขึ้นกับธรรมชาติของโลหะและเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งการรีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยไอน้ำ จะเกิดการดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) ไปเป็นอะซีทัลดีไฮด์ (acetaldehyde) และการสลายตัวของเอทานอลไปเป็นมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาปฐมภูมิที่อุณหภูมิต่ำ โดยขึ้นอยู่กับธรรมชาติการกระตุ้นของโลหะ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เอทานอลทั้งหมดและสารประกอบตัวกลาง (intermediate compound) เช่น อะซีทัลดีไฮด์และอะซีโตน (acetone) จะแปรสภาพไปเป็นไฮโดรเจน คาร์บอนออกไซด์ และมีเทน อย่างสมบูรณ์ การรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สซิฟต์จะกลายเป็นปฏิกิริยาหลัก ตัวเร่งปฏิกิริยา Ir/ $\text{CeO}_2$  จะแสดงการกระตุ้นและการผลิตไฮโดรเจนมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอื่นๆ นอกจากนั้นการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลด้วยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ir/ $\text{CeO}_2$  ที่ 400 องศาเซลเซียส ยังคงผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าร้อยละ 85 และการแปรสภาพกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์สมบูรณ์

Adhikari และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษากการผลิตไฮโดรเจนกลีเซอรอลดิบด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล เตาปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบท่อทำมาจากท่อสแตนเลส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อไอน้ำ เท่ากับ 1:6 การส่งผ่านสารเข้าเตาปฏิกรณ์ส่งโดยปั๊ม HPLC ด้วยอัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตร/นาที ทดลองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิคือ 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5 กรัม ก่อนการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน 50 มิลลิลิตร/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในการศึกษานี้ได้ใช้ตัวรองรับ MgO  $\text{CeO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  โดยลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกวิเคราะห์โดยเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) และเอกซ์เรดิฟแฟรคชัน (XRD) แก๊สผลิตภัณฑ์ขาออกจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งการผลิตแก๊สไฮโดรเจนสูงสุดที่ 650 องศาเซลเซียส ด้วยตัวรองรับ MgO ให้ผลผลิตไฮโดรเจน ร้อยละ 56.8 จากการวิเคราะห์คาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า Ni/ $\text{CeO}_2$  มีคาร์บอนสะสมบนพื้นผิวมากกว่า Ni/MgO และ Ni/ $\text{CeO}_2$  การเลือกเกิดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดได้รับจาก  $\text{MgO} > \text{TiO}_2 > \text{CeO}_2$  ส่วนแก๊สมีเทนจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น  $\text{C}_2\text{H}_4$  และ  $\text{C}_2\text{H}_6$  พบว่าความเข้มข้นต่ำกว่า 5000 พีพีเอ็ม แต่ไม่ตรวจพบ  $\text{C}_2\text{H}_4$  จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/MgO

Slinn และคณะ (2008) ศึกษาความเป็นไปได้ในการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล ซึ่งมีเมทานอลและสารจำพวกไขมันเป็นสิ่งเจือปนหลักจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เพื่อนำมาผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองได้นำกลีเซอรอลนั้นมาเจือจางกับน้ำตามอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน (steam/carbon ratio) ที่ต้องการแล้วป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ ทั้งนี้ได้ใช้แพลทินัม 3 กรัม เตาปฏิกรณ์มีปริมาตรเท่ากับ 4.8 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีอัตราการไหลแก๊สรวมสูงสุด 60 มิลลิลิตรต่ออนาที พบว่าที่ระดับอุณหภูมิสูงสุดที่ทำการทดลองซึ่งเท่ากับ 880 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนกลีเซอรอลเท่ากับ 0.12 โมลต่ออนาทีพร้อมๆ กับแพลทินัม 1 กิโลกรัม โดยที่อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 2.5 ให้ผลการผลิตไฮโดรเจนสูงที่สุด และการทดลองนี้ยังชี้ให้เห็นว่าการนำกลีเซอรอลมาผลิตแก๊สสังเคราะห์มีความคุ้มทุนมากกว่าการนำไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์

Vagia และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำโดยใช้แอสติคแอซิดและอะซิโตนเป็นตัวแทนของไบโอบอยด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลและโลหะโรเดียม (Rh) บนตัวรองรับแคลเซียมอะลูมินา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจะถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 550 650 และ 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 3:1 ผลการทดสอบพบว่าแอสติคแอซิดสามารถรีฟอร์มไปเป็นไฮโดรเจนได้ง่าย โดยการผลิตไฮโดรเจนจะขึ้นกับชนิดของโลหะ ปริมาณและอัตราส่วนของ  $\text{CaO}/2\text{Al}_2\text{O}_3$  ของตัวรองรับ แก๊สไฮโดรเจนสามารถผลิตได้สูงสุดเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Ni}/\text{CaO}/2\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Rh}/\text{CaO}/2\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก แสดงการต่อต้านการเกิดคาร์บอนได้ดี เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้มาทดสอบการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของอะซิโตน แสดงถึงการกระตุ้นที่สูงมาก การสะสมของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำและตัวเร่งปฏิกิริยา Rh จะแสดงลักษณะเด่นในการผลิตไฮโดรเจนมากกว่า Ni

Valliyappan และคณะ (2008) ทำการศึกษาการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันแบบใช้ไอน้ำของกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์และแก๊สไฮโดรเจน โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 30 - 70 มิลลิลิตรต่ออนาที อัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอน 1:0 1:0.33 และ 1:1 อุณหภูมิ 650 - 800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนกลีเซอรอลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์เท่ากับ 5.4 กรัมต่อชั่วโมง ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศและใช้เตาปฏิกรณ์แบบอากาศไหลเข้าจากด้านบนสู่ด้านล่าง เตาปฏิกรณ์มีความยาวเท่ากับ 55 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10.5 มิลลิเมตร ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนอะลูมินา 0.2 กรัม พบว่าอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊ส และตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลต่อปริมาณการเปลี่ยนกลีเซอรอลไปเป็นผลิตภัณฑ์กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ และถ่านชาร์

จะมีปริมาณลดลง แต่น้ำมันดินจะมีปริมาณมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และถ่านชาร์จะเพิ่มมากขึ้น ส่วนน้ำมันดินจะมีปริมาณลดลง สำหรับที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่เหมาะสม คือ 1:0.33 สามารถเพิ่มแก๊สผลิตภัณฑ์และไฮโดรเจนได้สูงสุด และเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:0 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์และการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มสูงสุดเมื่อไอน้ำต่อกลีเซอรอลที่เหมาะสม คือ 1:1

Luo และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตินัมบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ทำจากท่อสแตนเลสโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร และใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาตรงกลางท่อ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตินัมที่แตกต่างกัน ดังนี้คือ ร้อยละ 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตินัมร้อยละ 0.9 โดยน้ำหนัก ได้ผลิตไฮโดรเจนสูงที่สุดและเมื่อทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่แตกต่างกันคือ ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงกว่า แต่ที่ความเข้มข้นของกลีเซอรอลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าการเกิดมีเทนน้อยกว่าเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลสูงการเกิดปฏิกิริยาเมทานเนชัน (methanation) ลดลง

Luciene และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนของเอทานอลและกลีเซอรอลด้วยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Ni/CeO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ประกอบด้วยโลหะโนเบิล (Pt, Ir, Pd และ Ru) เป็นตัวโปรโมเตอร์ โดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor) โดยใช้ท่อควอร์ทซ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 13 มิลลิเมตร ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในเตาปฏิกรณ์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนเอทานอลต่อไอน้ำ 1:3 และอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:6 ถูกสูบเข้าไปในถังปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 2.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา 150 มิลลิกรัม และก่อนเข้าถังปฏิกรณ์มีการอุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่าการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของเอทานอลที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงเอทานอลเกิดขึ้นสมบูรณ์และการผลิตไฮโดรเจนเกิดขึ้นสูงสุดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Ni/CeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  ที่ประกอบด้วย Pd เป็นตัวโปรโมเตอร์ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Ni/CeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  ที่ประกอบด้วยตัวโปรโมเตอร์อื่นๆ ก็พบว่ามีความเสถียรมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวโปรโมเตอร์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวโปรโมเตอร์นั้น การผลิตไฮโดรเจนลดลงแต่เอทิลีนเพิ่มขึ้น ส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วของตัวเร่งปฏิกิริยาในชั่วโมงแรก และการทำรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่า การเติมโลหะโนเบิลเป็นตัวโปรโมเตอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้การผลิต

ไฮโดรเจนสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวโปรโมเตอร์ โดยตัวโปรโมเตอร์มีผลกับผลิตภัณฑ์โดยเพิ่มการกระตุ้นของนิกเกิลเพื่อเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจน การผลิตไฮโดรเจนสูงสุดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Ni/CeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  ที่ประกอบด้วย Pt เป็นตัวโปรโมเตอร์ โดยจะช่วยกระตุ้นการแตกพันธะของ C-C เพื่อให้เหมาะสมกับการรีฟอร์มมิง

Sanchez และคณะ (2010) ได้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Ni/Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งได้ทำการศึกษารีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 600 – 700 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล (16:1) อัตราการไหล 0.17 มิลลิลิตร/นาที่ โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา หลังจากการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง การแปรสภาพกลีเซอรอลไปอยู่ในรูปแก๊สเท่ากับ ร้อยละ 96.8 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 99.4 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส การเลือกเกิดไฮโดรเจนสูงสุดที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 99.7 และหลังจากการเกิดปฏิกิริยาที่ 8 ชั่วโมง การแปรสภาพกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แต่การเลือกเกิดไฮโดรเจนยังคงมีความเสถียร



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบด้วยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน โดยใช้การแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับไอน้ำและใช้แพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ใน งานทดลองดังนี้

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา

1. ปีกเกอร์
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ
3. แท่งแก้ว
4. เตาทอบ
5. หลอดแก้ว
6. น้ำกลั่น
7. เครื่องซังสารแบบละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
8. ตู้ควบคุมความชื้น (Dessicator)
9. แท่งแม่เหล็ก
10. เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer)
11. นาฬิกาจับเวลา
12. ท่ออัลฟาอะลูมินา ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
13. กระจกตวง
14. กรวย
15. ปีเปต

### 3.1.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้

1. แพลเลเดียมคลอไรด์ จากบริษัท SIGMA-ALDRICH
2. แพลเลเดียมอะซีเตท จากบริษัท Merck
3. ไดโซเดียมเอทิลีนไดอามีนเตตราอะซีเตท จากบริษัท SIGMA-ALDRICH
4. คลอโรฟอร์ม จากบริษัท Labscan Asia
5. แอมโมเนีย จากบริษัท Merck
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ จากบริษัท Labscan Asia
7. ไฮดราซีน จากบริษัท SIGMA-ALDRICH

### 3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตาปฏิกรณ์

3.2.1 เตาปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาการแปรสภาพทางเคมีด้วยความร้อนด้วยการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแบ่งอะลูมินา

1. เครื่องควบคุมการป้อนวัตถุดิบ (Syringe Pump)
2. เครื่องระเหยแห้ง (Evaporator)
3. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Rotameter)
4. เตาปฏิกรณ์พร้อมชุดใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Reactor)
5. เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวงสำหรับเตาปฏิกรณ์ (Furnace)
6. เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเค (Thermocouple type K)
7. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
8. อุปกรณ์สกัดน้ำมันดินออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Condenser)
9. ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส (Sampling Bag)
10. เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

### 3.2.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้

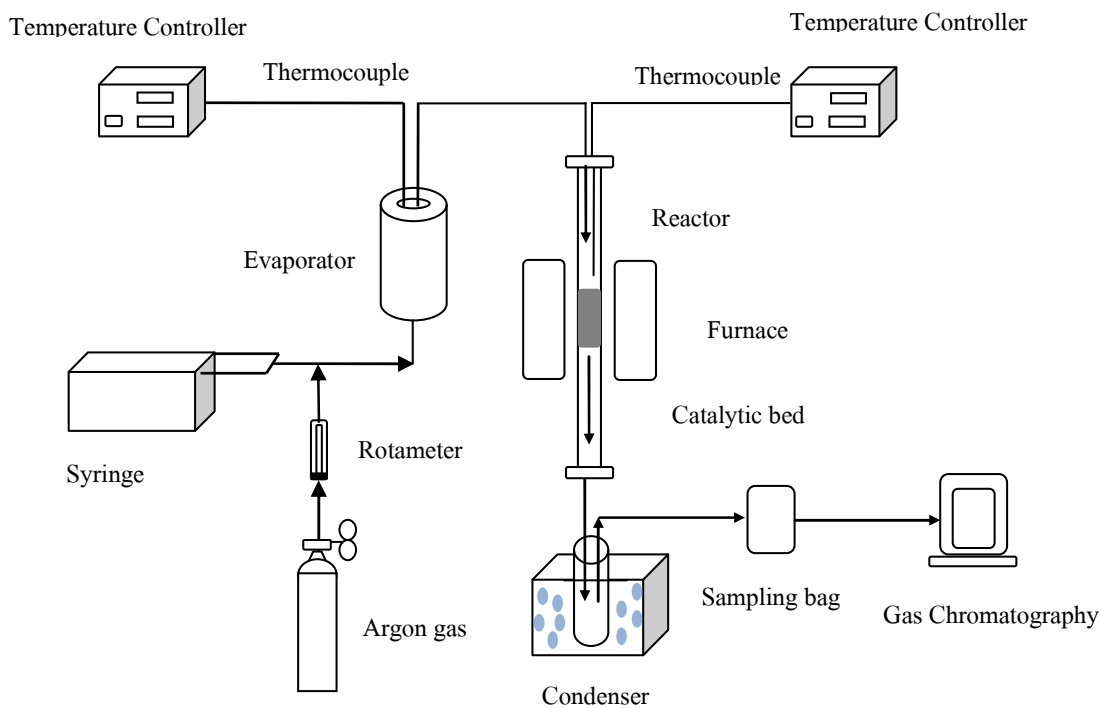
1. กลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ (Pure glycerol and Crude glycerol)
2. แก๊สอาร์กอน (Argon gas)

ตารางที่ 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์	ภาพ	วัสดุและอุปกรณ์	ภาพ
ตู้ควบคุมอุณหภูมิ		เตาอบ	
เครื่องกวนสาร		ท่ออัลฟาอะลูมินา	
แก๊สต่างๆ		เครื่องควบคุมการป้อนวัตถุดิบ	
เครื่องระเหยแห้ง		เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	

วัสดุและอุปกรณ์	ภาพ	วัสดุและอุปกรณ์	ภาพ
อุปกรณ์ควบคุม อัตราการไหล		เตาเผาให้ความร้อน แบบท่อกลวงสำหรับ เตาปฏิกรณ์	
เตาปฏิกรณ์		อุปกรณ์สกัดน้ำมัน ดินออกจากแก๊ส ผลิตภัณฑ์ที่ได้	
ชุดใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา		เทอร์โมคัปเปิลเปิด ชนิดเค	
ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส		เครื่องวิเคราะห์แก๊ส โครมาโทกราฟี	

หลักการการดำเนินงานโดยรวมของระบบการแปรสภาพทางเคมีด้วยความร้อนโดยการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินาและการวิเคราะห์ผลมีดังนี้ การป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เตาปฏิกรณ์จะถูกป้อนด้วยเครื่องควบคุมการป้อนวัตถุดิบ ซึ่งบรรจุในกระบอกฉีดยา วัตถุดิบที่ป้อนประกอบด้วยน้ำและกลีเซอรอลผ่านเครื่องระเหยแห้ง เพื่อระเหยกลีเซอรอลและน้ำให้กลายเป็นไอก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ ในขณะที่แก๊สอาร์กอนทำหน้าที่เป็นแก๊สพาถูกป้อน ณ ตำแหน่งใกล้เคียงกับทางเข้าของกลีเซอรอลและน้ำ และควบคุมแก๊สเข้าด้วยอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลก่อนผ่านเข้าสู่เครื่องระเหยแห้ง โดยมีเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเคเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์และมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิช่วยควบคุมให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ซึ่งส่วนที่ระเหยกลายเป็นไอจะถูกพาผ่านเข้าสู่เตาปฏิกรณ์และผ่านชุดใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม แก๊สที่ผ่านส่วนนี้จะเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนร่วมกับไอน้ำได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ออกทางด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ผ่านอุปกรณ์สกัดน้ำมันดิน จากนั้นแก๊สบางส่วนจะถูกดึงเข้าถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส เพื่อนำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี แสดงดังภาพ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังกระบวนการผลิตแก๊สโดยรวม

### 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

1. อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ เพื่อศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิต่อกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนและกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับไอน้ำของกลีเซอรอล โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส
2. ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์โดยทำการแปรผันตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.2 โดยน้ำหนัก
3. ปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์ เพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นที่มีผลต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้น 2500 และ 5000 พีพีเอ็ม
4. จำนวนท่อของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อศึกษาผลของจำนวนท่อต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์โดยทำการทดลองที่ 0 2 4 และ 7 ท่อ
5. อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน เพื่อศึกษาอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับไอน้ำ โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 1:2 และ 1:3
6. ระยะเวลาการสัมผัส เพื่อศึกษาช่วงระยะเวลาการกักเก็บที่เหมาะสมต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ 1 2 3 และ 4 วินาที

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติของกลีเซอรอล

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) นำกลีเซอรอลดิบมาวิเคราะห์ประมาณความชื้น สารระเหยได้ คาร์บอนคงตัว และเถ้า ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM E871, D1102, E872
2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ด้วยเครื่องมือ CHNS Analyser
3. การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value: LHV) วิเคราะห์ด้วยเครื่องออกโตเมทริกบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Automatic Bomb Calorimeter, Leco model AC-350)

### 3.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินาด้วยกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating)

#### 3.4.2.1 ตัวรองรับ (Support)

ในการทดลองนี้ ใช้ตัวรองรับอัลฟาอะลูมินาแบบแท่ง ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.72 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.82 มิลลิเมตร ยาว 8.0 เซนติเมตร ปลายทั้งสองถูกเคลือบด้วยแก้ว ด้านละ 2 เซนติเมตร

#### 3.4.2.2 การกระตุ้นผิวหน้าอะลูมินา

1. สารละลายกระตุ้นผิวหน้าอะลูมินา (Activated Solution) ประกอบด้วยผงแพลเลเดียมอะซิเตท ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักในสารละลายคลอโรฟอร์ม
2. สารละลายรีดักชัน (Reduction Solution) ประกอบด้วยสารละลายไฮดรราซีน 1 โมลต่อลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 โมลต่อลิตร
3. นำแท่งอะลูมินาที่เตรียมปิดด้วยเทปลอนที่ปลายทั้งสองด้าน เพื่อป้องกันให้สารละลายผ่านเข้าไปในท่อด้านใน
4. นำแท่งอะลูมินาจุ่มในสารละลายกระตุ้นที่เตรียมไว้ เป็นเวลา 2 นาที แล้วเป่าให้แห้ง
5. จากนั้นนำแท่งอะลูมินาจุ่มในสารละลายรีดักชัน เป็นเวลา 10 นาที
6. ล้างด้วยน้ำกลั่น และอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
7. ทำซ้ำ ขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 รวม 5 รอบ โดยที่รอบสุดท้ายหลังจากล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแห้งสนิท

#### 3.4.2.3 กระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating)

1. สารละลายชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating solution) ประกอบด้วย พลาเดียมคลอไรด์ 11 มิลลิโมลต่อลิตร ไดโซเดียมเอทริลีนไดอามีนเตตราอะซิเตท (Na<sub>2</sub>EDTA) 0.17 โมลต่อลิตร และแอมโมเนีย 5.56 โมลต่อลิตร
2. สารละลายรีดักชัน ประกอบด้วย ไฮดรราซีน 0.1 โมลต่อลิตร
3. นำท่ออะลูมินาที่ผ่านการกระตุ้นผิวหน้า ปิดปลายด้านหนึ่งด้วยเทปลอน และปลายอีกด้านหนึ่งเสียบกับซิลิโคนที่ต่อกับจุกยางและพันด้วยเทปลอน จุ่มในสารละลายชุบ 40 มิลลิลิตร และเติมสารละลายรีดักชัน 6 มิลลิโมล โดยเติม 3 มิลลิโมลแรก ที่ 0 นาที และอีก 3 มิลลิโมล ที่ 120 นาที เพื่อป้องกันการตกตะกอนของสารละลาย

4. อุ่นสารละลายที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กตลอดการทดลองเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างที่ 0 10 20 30 60 120 240 และ 360 นาที นำไปวัดด้วยวิธีอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาออฟติคอลลิมิตรีชันสเปกโทรเมตรี (ICP-OES) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณแพลเลเดียมที่เคลือบบนแท่งอะลูมินาและช่วงระยะเวลาการอุ่นสารละลายที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

5. เตรียมแท่งอะลูมินาที่เคลือบด้วยแพลเลเดียมโดยอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้งเป็นระยะเวลาที่ทำให้มีปริมาณแพลเลเดียมมาเคลือบในปริมาณร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.2 โดยน้ำหนัก ตามผลการวิเคราะห์จากข้อที่ 4 เพื่อใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินาด้วยกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 3.2

### 3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาลงในชุดใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 7 แท่ง แล้วติดตั้งลงในเตาปฏิกรณ์ หลังจากนั้นทำการตรวจสอบจุดรั่วไหล เมื่อตรวจสอบเรียบร้อยแล้วจึงทำการติดตั้งในเตาปฏิกรณ์ และเริ่มอุ่นเตาปฏิกรณ์ให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ

2. ทำการบรรจุกลีเซอรอลบริสุทธิ์และน้ำ ลงในกระบอกฉีดยาที่เตรียมไว้และติดตั้งกับเครื่องควบคุมการป้อนวัตถุดิบ ตั้งโปรแกรมการทำงานให้ได้อัตราส่วนที่ต้องการ โดยการป้อนกลีเซอรอลและอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนตามที่กำหนด

3. จากนั้นทำการเปิดเครื่องระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จนมีอุณหภูมิถึงระดับที่ต้องการ ควบคุมอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิลที่ส่งสัญญาณไปยังเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

4. เมื่อเครื่องระเหยแห้งและเตาปฏิกรณ์มีอุณหภูมิตามที่กำหนด จึงทำการป้อนวัตถุดิบตามโปรแกรมที่ตั้งไว้ เปิดวาล์วแก๊สอาร์กอนและเครื่องควบคุมอัตราการไหล เพื่อได้อัตราไหลตามที่ต้องการคือ 1 ลิตรต่อนาที ตามอุณหภูมิที่กำหนดโดยก่อนต่อท่อเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ควรเดินระบบทิ้งไว้อย่างน้อยประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าวัตถุดิบที่ป้อนได้ผ่านเข้าไปในระบบเรียบร้อยแล้ว

5. จากนั้นต่อท่อจากเครื่องระเหยแห้งเข้าสู่เตาปฏิกรณ์และเริ่มจับเวลา แก๊สผลิตภัณฑ์จะถูกสกัดโดยอุปกรณ์สกัดน้ำมันดินและเก็บตัวอย่างแก๊สผลิตภัณฑ์เป็นช่วงๆ ตามเวลาที่กำหนด เพื่อนำไปวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน โดยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี



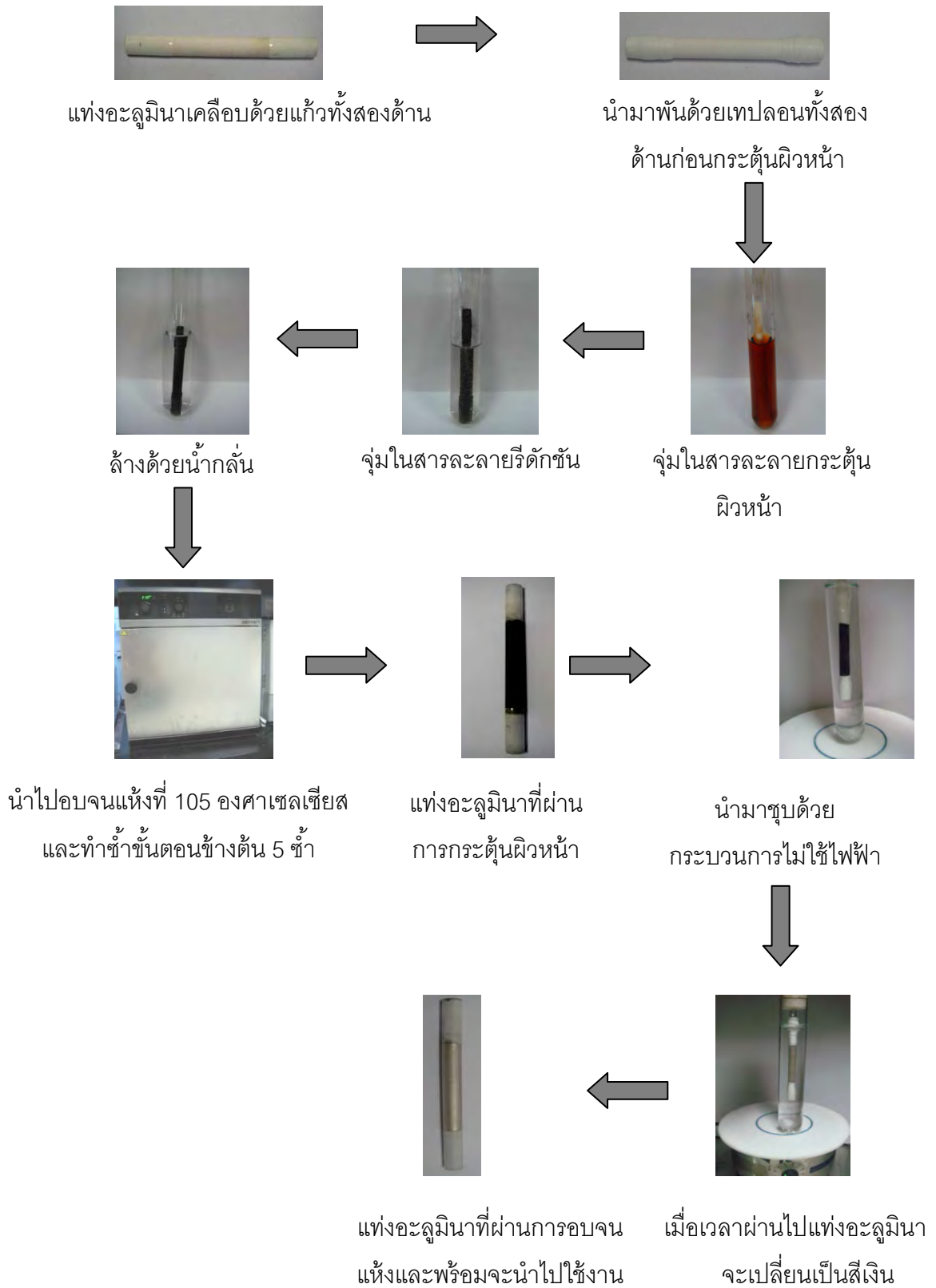
6. นำสภาวะที่เหมาะสมของกลีเซอรอลบริสุทธิ์มาประยุกต์ใช้กับกลีเซอรอลดิบ เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลดิบด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยใช้แพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.5 ศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินา

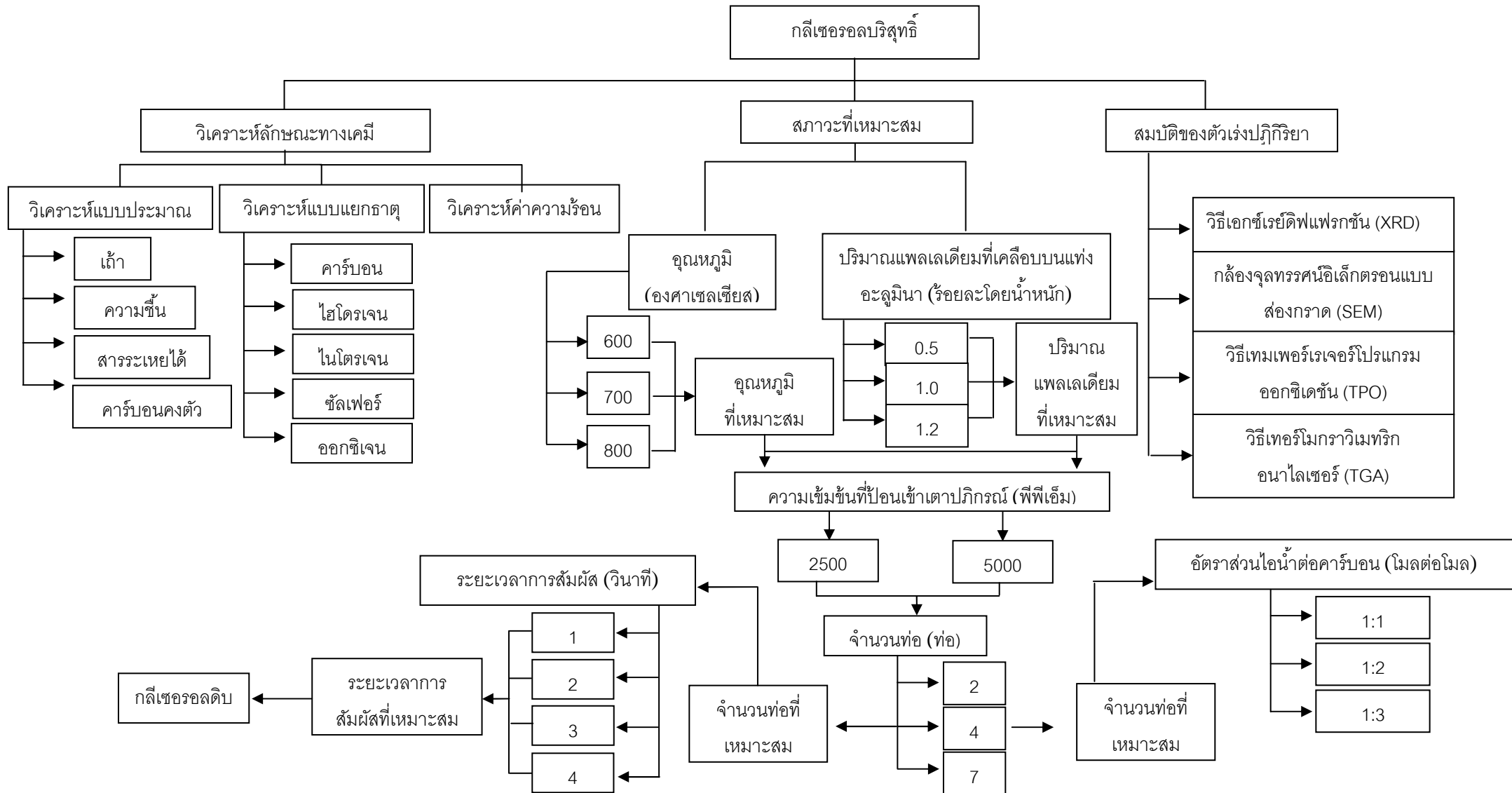
1. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งก่อนการใช้งานและหลังการใช้งาน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิธีเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ตามลำดับ

2. การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม โดยวิธีเทมเพอร์เรเจอร์โปรแกรมออกซิเดชัน (TPO) ซึ่งเป็นการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศของออกซิเจนขณะที่มีการเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อสังเกตตำแหน่งของคาร์บอนหรือโครงสร้างที่แตกต่างกันของคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

3. การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม โดยวิธีเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลซิส (TGA) เพื่อดูปริมาณคาร์บอนที่ฝังตัวอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนโดยรวมของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแท่งอะลูมินาด้วยกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating)



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงกระบวนการแปรสภาพทางความร้อนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลในเตาปฏิกรณ์แบบท่อ โดยภายในเตาปฏิกรณ์จะประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา ซึ่งในการศึกษานี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

ส่วนที่ 1 ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและองค์ประกอบทางเคมีของกลีเซอรอลดิบ ดังนี้

1) วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer : TGA) เพื่อหาค่าความชื้น (Moisture) สารระเหยได้ (Volatile matter) คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และเถ้า (Ash)

2) วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ด้วยเครื่อง CHNS/O analyzer (Perkin Elmer PE2400 Series II) เพื่อหาค่า คาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ไนโตรเจน (Nitrogen) ซัลเฟอร์ (Sulfur) และออกซิเจน (Oxygen)

3) วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Heating Value) ด้วยเครื่องอโตเมตริกบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Automatic Bomb Calorimeter : Leco model AC 350) เพื่อหาค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value: LHV)

ส่วนที่ 2 ศึกษาลักษณะของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมเคลือบอยู่บนตัวรองรับอะลูมินา ซึ่งเตรียมด้วยวิธีการชุบเคลือบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating)

ส่วนที่ 3 ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล โดยศึกษาอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของกลีเซอรอลและจำนวนท่อของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งการดำเนินการศึกษาในส่วนนี้เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจน โดยสามารถแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์ได้สูงสุดและแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกมาีความเสถียรมากที่สุด

ส่วนที่ 4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเมื่อมีการลดท่อของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการทดลองส่วนที่ 3 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุด โดยมีการศึกษาปัจจัยต่างๆ เพิ่มเติม คือ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนและระยะเวลาการสัมผัส อีกทั้งยังได้มีการเปรียบเทียบระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ เพื่อศึกษาผลของสิ่งเจือปน

ในกลีเซอรอลดิบต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการของเสียกลีเซอรอลที่เกิดจากอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล

#### 4.1 ลักษณะทางเคมีและองค์ประกอบทางเคมีของกลีเซอรอลดิบ

##### 4.1.1 ลักษณะทางเคมีของกลีเซอรอลดิบ

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณจะเป็นการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีเบื้องต้น โดยหาค่า ความชื้น (Moisture) สารระเหยได้ (Volatile matter) คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และเถ้า (Ash) โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (TGA) การวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักที่สำคัญคือ ส่วนที่เผาไหม้ได้และส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ โดยส่วนที่เผาไหม้ได้จะประกอบด้วย สารระเหยได้และคาร์บอนคงตัว ซึ่งสารที่ระเหยได้นั้นจะประกอบด้วยพวกสารอินทรีย์และไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลต่ำๆ ส่วนคาร์บอนคงตัวจะประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูงๆ จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.1 พบว่า ไม่พบสารที่ระเหยได้และคาร์บอนคงตัว เนื่องจากเกิดการลุกติดไฟ เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารที่สามารถเผาไหม้ได้ง่าย และสำหรับส่วนที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาหรือส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ จะประกอบด้วย ความชื้น และเถ้า ซึ่งจากการตรวจวัดพบว่ามีค่าเท่ากับ ร้อยละ 13.56 และ 2.43 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการเป็นวัตถุดิบในการเผาไหม้ เนื่องจากวัตถุดิบที่จะนำมาผ่านกระบวนการแปรสภาพทางความร้อนควรมีค่าความชื้นและเถ้า ไม่เกินร้อยละ 50 และ 3 ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการตรวจวัดพบว่า กลีเซอรอลดิบมีศักยภาพในการเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ผ่านทางกระบวนการแปรสภาพทางความร้อน เนื่องจากลดภาระในการกำจัดเถ้าและความชื้นในกลีเซอรอลดิบมีส่วนที่จะช่วยเร่งปฏิกิริยาในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งจะทำให้การศึกษาต่อไป

ตารางที่ 4.1. ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

เชื้อเพลิง	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น	สารระเหยได้	คาร์บอนคงตัว	เถ้า
กลีเซอรอลดิบ	13.56	เกิดการลุกไหม้	-	2.43

ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะเป็นการวิเคราะห์ เพื่อหาค่า คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจนด้วยเครื่อง CHNS/O analyzer (Perkin Elmer PE2400 Series II) จากตารางที่ 4.2 พบว่า จากการตรวจวัดพบ ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ในปริมาณร้อยละ 36.40, 8.76, 0.666 และ 54.17 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ไม่พบธาตุไนโตรเจน และพบปริมาณซัลเฟอร์เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลีเซอรอลดิบมีศักยภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เช่น แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งนอกจากจะพบธาตุพื้นฐานของแก๊สเชื้อเพลิงในปริมาณที่สูงแล้ว อีกทั้งยังพบธาตุซัลเฟอร์ที่น้อยมากและไม่พบธาตุไนโตรเจนเลย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกลีเซอรอลดิบนี้จะไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เนื่องจาก  $SO_x$  และ  $NO_x$

ตารางที่ 4.2. ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

เชื้อเพลิง	ธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
กลีเซอรอลดิบ	36.40	8.76	0.00	0.666	54.17

สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Heating Value) จะทำโดยการนำมาทดสอบด้วยเครื่องออกโตเมทริกบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Leco model AC 350) โดยค่าความร้อนจะเป็นตัวแสดงค่าพลังงานพันธะเคมี (Energy Chemically Bond) ในเชื้อเพลิงหรือเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดนั้นๆ โดยค่าความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ค่าความร้อนต่ำ (LHV) และ ค่าความร้อนสูง (HHV) ซึ่งการหาค่าความร้อนต่ำนั้นทำได้โดยการนำชีวมวลมาหาค่าความร้อนในขณะที่ยังขึ้นอยู่ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ถ้าชีวมวลมีความชื้นสูง ก็จะทำให้ชีวมวลมีค่า LHV ต่ำ ส่วนการหาค่าความร้อนสูงนั้นทำได้โดยการนำชีวมวลมากำจัดความชื้น แล้วนำไปหาค่าความร้อนโดย LHV และ HHV มีความสัมพันธ์กันดังในสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$HHV = LHV + 5.72(9H + M)^* \quad \text{kcal/kg} \quad (4.1)$$

$$HHV = LHV + 23.95(9H + M)^* \quad \text{kJ/kg} \quad (4.2)$$

\* เมื่อ H = ปริมาณร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในชีวมวล และ M = ปริมาณร้อยละของความชื้นในชีวมวล

ในตารางที่ 4.3 จะเป็นการแสดงค่าความร้อนของกลีเซอรอลดิบ โดยจากการวิเคราะห์พบว่า ค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของกลีเซอรอลดิบ มีค่าเท่ากับ 18.13 และ 20.20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลประเภทอื่น พบว่ากลีเซอรอลดิบมีค่าความร้อนที่ค่อนข้างสูง แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3. ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Heating Value)

เชื้อเพลิง	สมบัติทางความร้อน	
	ค่าความร้อนต่ำ (LHV)	ค่าความร้อนสูง (HHV)
	MJ/kg	MJ/kg
กลีเซอรอลดิบ	18.13	20.80

#### 4.1.2 ลักษณะของกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ

กลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Analytical grade glycerol) เป็นกลีเซอรอลที่ผ่านกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ออก รวมถึงสีที่มากับวัตถุดิบ ในงานวิจัยนี้ได้กลีเซอรอลจากบริษัท Merck ประกอบด้วยกลีเซอรอลร้อยละ 87 โดยน้ำหนัก และน้ำ ร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก ลักษณะของกลีเซอรอลบริสุทธิ์นั้น จะเป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น

กลีเซอรอลดิบ (Crude glycerol) เป็นกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ได้เป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอลดิบ โดยกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการนี้เป็นกลีเซอรอลที่ไม่บริสุทธิ์ ซึ่งจะมีสิ่งเจือปนต่างๆ มากมาย โดยมีทั้งสารเคมีที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ แอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ สารที่อยู่ในวัตถุดิบโดยธรรมชาติ ได้แก่ กรดไขมัน (fatty acid) และสิ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการผลิต ได้แก่ สบู่ น้ำ และไบโอดีเซลส่วนที่ถูกชะล้าง ส่งผลให้กลีเซอรอลมีความบริสุทธิ์ต่ำ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้เป็นความแตกต่างระหว่างกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลบริสุทธิ์ โดยลักษณะของกลีเซอรอลดิบนั้นจะมีลักษณะคล้ายขี้ผึ้งที่อุณหภูมิห้อง มีสีน้ำตาล จึงทำให้การนำกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ประโยชน์มีข้อจำกัดหลายด้าน



ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบลักษณะทางเคมีของกลีเซอรอลดิบและซีววมวลชนิดอื่น

ซีววมวล	วิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					สมบัติทางความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	
	ความชื้น	สารระเหยได้	คาร์บอนคง ตัว	เถ้า	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ซัลเฟอร์	ออกซิเจน	ค่าความร้อนสูง	ค่าความร้อนต่ำ
กลีเซอรอลดิบ	13.56	เกิดการลุก ไหม้	-	2.43	36.40	8.76	0.00	0.666	54.17	18.13	20.80
แกลบ	12.00	56.46	18.88	12.65	37.48	4.41	0.17	0.04	33.27	14.755	13.517
ฟางข้าว	10.00	60.70	18.90	10.39	38.17	5.02	0.58	0.09	35.28	13.650	12.330
ชานอ้อย	50.73	41.98	5.86	1.43	21.33	3.06	0.12	0.03	23.29	9.243	7.368
ไม้ยางพารา	45.00	45.70	7.71	1.59	25.58	3.19	0.14	0.02	24.48	10.365	8.600
ใยปาล์ม	38.50	42.68	14.39	4.42	30.82	3.74	0.84	0.08	21.61	13.127	11.400
กะลาปาล์ม	12.00	68.20	16.30	3.50	44.44	5.01	0.28	0.02	34.70	18.267	16.900
ซังข้าวโพด	40.00	45.42	13.68	0.90	28.19	3.36	0.12	0.03	0.03	11.298	9.615
เปลือกไม้ยูคาça	60.00	28.00	9.56	2.44	18.60	2.12	0.15	0.02	0.02	6.811	4.917

## 4.2 ลักษณะของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวรองรับ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวรองรับแบบท่อ โดยขั้นตอนแรกจะทำการขึ้นภาพท่อ (Extrude) ท่อที่ได้จากการขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นและสามารถยืดหยุ่นได้ แสดงดังภาพที่ 4.1 (ก) หลังจากนั้นนำไปทำการเผาผนึก (Sintering) ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ลักษณะท่อที่ได้จะมีลักษณะแสดงดังภาพที่ 4.1 (ข) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (Outer Diameter) 5.72 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (Inner Diameter) 4.82 มิลลิเมตร โดยสมบัติทางกายภาพของตัวรองรับ ความพรุน ขนาดรูพรุน วิเคราะห์ด้วยวิธี mercury poroimetry (Quantachome Intrument) และความหนาแน่น วิเคราะห์ด้วยวิธี Archimedes แสดงดังตารางที่ 4.5 ท่อที่ได้จากการเผาผนึกจะนำมาเคลือบแก้วทั้งสองด้าน ด้านละ 2 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 4.1 (ค)

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกายภาพของตัวรองรับ

ตัวรองรับ	สมบัติทางกายภาพ		
	ความพรุน	ขนาดรูพรุน	ความหนาแน่น
อัลฟา-อะลูมินา	36%	0.32	69%TD



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

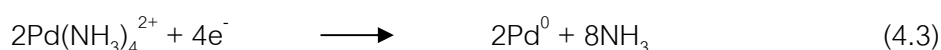


(จ)

ภาพที่ 4.1 รูปของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ท่ออะลูมินาที่ขึ้นรูปแล้ว (ข) ท่ออะลูมินาที่ผ่านการเผาผนึก (ค) ท่ออะลูมินาที่ผ่านการเคลือบแก้ว (ง) ท่อที่ผ่านการกระตุ้นผิวหน้า (จ) ท่อที่ผ่านการชุบเคลือบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

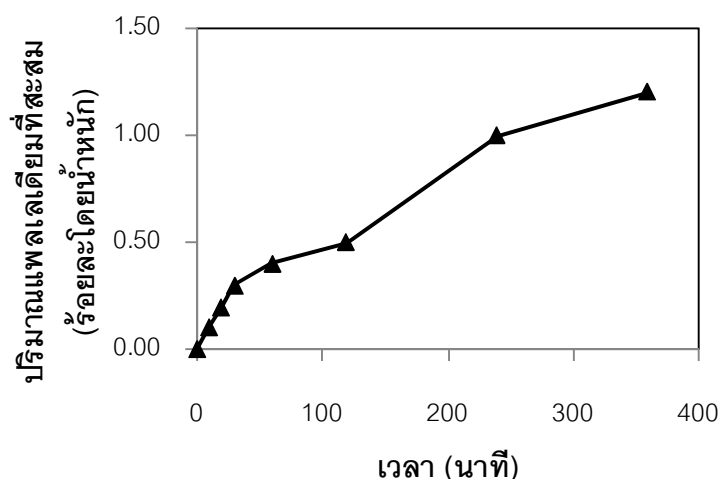
#### 4.2.2 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้ได้ใช้โลหะแพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบอยู่บนตัวรองรับท่ออะลูมินา โดยวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้กระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating) ซึ่งเป็นกระบวนการเคมีไฟฟ้า (electrochemical) เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน ด้วยการส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังระหว่างผิวหน้า (interface) และเป็นปฏิกิริยาเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous reaction) ด้วยการผสมของโลหะเกิดขึ้นที่ระหว่างผิวหน้าของแข็งและของเหลว (solid-liquid interface) ที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของการชุบเคลือบและสารละลาย อีกทั้งการผสมของแพลเลเดียมจะเกิดโดยกลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติ (Autocatalytic) ซึ่งเริ่มต้นด้วยการกระตุ้นผิวหน้าของตัวรองรับอะลูมินาด้วยแพลเลเดียมนิวคลีโอ (Palladium nuclei) ทำให้พื้นผิวของท่ออะลูมินาเปลี่ยนเป็นสีดำ (Tanaka และคณะ, 2005) แสดงดังภาพที่ 4.1 (ง) ในการกระตุ้นพื้นผิวเพื่อลดระยะเวลาเหนี่ยวนำ (induction period) และปรับปรุงประสิทธิภาพของการชุบเคลือบ สารละลายในกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้าจะประกอบด้วย ไดโซเดียมเอทิลีนไดอามีนเตตราอะซีเตต ( $\text{Na}_2\text{EDTA}$ ) ซึ่งมีหน้าที่คือทำให้สารประกอบเชิงซ้อนแพลเลเดียมเอมีน (Pd-amine complex) และไฮดราซีนมีความเสถียร นอกจากนี้แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปจะช่วยให้พีเอชของสารละลายคงที่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของท่อตัวรองรับที่ถูกกระตุ้นแล้ว แสดงดังสมการที่ 4.3-4.5 เริ่มต้นจากไฮดราซีนจะเกิดปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดแก๊สไนโตรเจนและน้ำ ด้วยการปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจะถูกส่งผ่านไปยังแพลเลเดียมเพอร์ดิทิวซ์สารประกอบของ  $\text{Pd}^{2+}$  ให้กลายเป็นโลหะแพลเลเดียม (Basile และคณะ, 2008) ระหว่างกระบวนการชุบเคลือบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า จะมีฟองแก๊สเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดแก๊สไนโตรเจนและแอมโมเนีย แสดงดังสมการ 4.4 ซึ่งผิวหน้าของท่ออะลูมินาที่ผ่านการชุบเคลือบโดยกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้าจะเป็นสีเงินวาว แสดงดังภาพที่ 4.1 (จ)



ปริมาณแพลเลเดียมที่เคลือบบนตัวรองรับอะลูมินาซึ่งใช้กระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้าจะถูกวัดโดยอินดักทีฟเปลพลาสมาออกพติคอลลิมิซชันสเปกโทรเมตรี (ICP-OES) โดยช่วงแรกของกระบวนการจะมีเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการรีดิวซ์สารประกอบของ

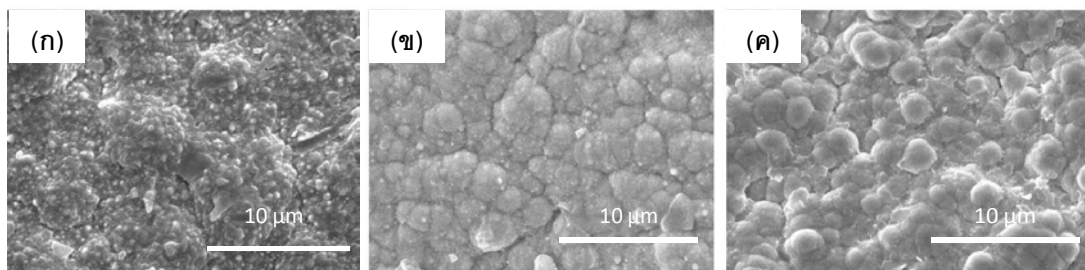
$\text{Pd}^{2+}$  ให้กลายเป็นโลหะแพลเลเดียม แสดงดังภาพที่ 4.2 และหลังจาก 1 ชั่วโมงการเกิดปฏิกิริยาจะเริ่มช้าลง เนื่องจากสารรีดิวซ์เริ่มเกิดปฏิกิริยาจนหมด ดังนั้นจึงได้มีการเติมสารละลายรีดิวซ์อีกครั้งที่เวลา 2 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดตะกอน และเพื่อเร่งปฏิกิริยาให้การชุบเคลือบแพลเลเดียมบนผิวอะลูมินาให้ดีขึ้น จากภาพปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแพลเลเดียมจะเพิ่มขึ้นตามเวลาการชุบเคลือบ โดยที่เวลาการชุบเคลือบ 120, 240 และ 360 นาที การสะสมของแพลเลเดียมประมาณร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการสะสมของแพลเลเดียมที่แตกต่างกันนี้จะใช้ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณแพลเลเดียมที่เคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา (metal loading) ต่อการแปรสภาพของกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 4.2 ปริมาณแพลเลเดียมที่สะสมบนตัวรองรับอะลูมินาต่อเวลาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

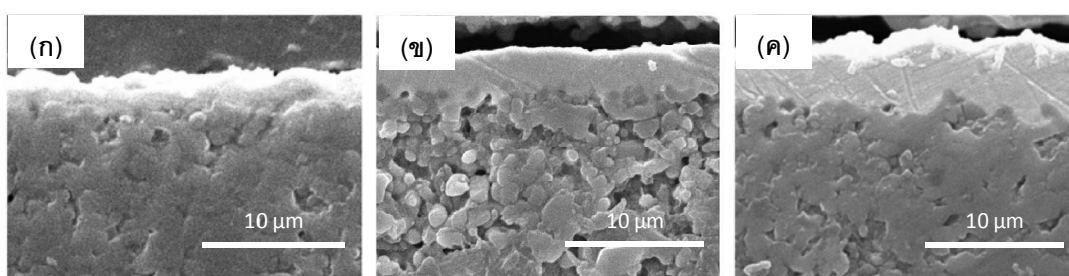
จากภาพที่ 4.3 แสดงภาพลักษณะโครงสร้างผิวหน้าของแพลเลเดียมที่สะสมอยู่บนตัวรองรับอะลูมินาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ก่อนการนำไปใช้ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) ซึ่งจากภาพสามารถสังเกตได้ว่าขนาดอนุภาคของแพลเลเดียมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการชุบเคลือบ จากภาพที่ 4.3 (ก) ปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการชุบเคลือบ 120 นาที โครงสร้างผิวหน้าของแพลเลเดียมมีลักษณะเป็นโครงสร้างจุลภาค (microstructure) โดยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าที่ปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 1.0 และ 1.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้เวลาการชุบ 240 และ 360 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.3 (ข)-(ค) ขนาดอนุภาคแพลเลเดียมอยู่ในช่วง 2.21-2.26 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากข้อมูลสามารถสันนิษฐานได้ว่าที่

ระยะเวลาการชุบเคลือบที่สั้นเกินไป อาจจะไม่เพียงพอสำหรับกลไกขับเคลื่อนการเติบโตของอนุภาคเป็นผลให้เกิดการรวมกลุ่มของแพลเลเดียม



ภาพที่ 4.3 ภาพ SEM แสดงลักษณะโครงสร้างผิวหน้าของแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาที่ปริมาณแพลเลเดียม (ก) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (ข) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (ค) ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก

ภาพตัดขวางของการสะสมของแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาแสดงในภาพที่ 4.4 จากภาพแสดงชั้นความหนาของแพลเลเดียมที่สะสมบนตัวรองรับอะลูมินา ซึ่งค่าที่วัดได้คือ 2.75, 4.07 และ 5.43 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 0.5, 1.0, และ 1.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งสันนิษฐานได้ว่า ที่ระยะเวลาการชุบที่แตกต่างกันส่งผลต่อความหนาของชั้นแพลเลเดียม โดยที่ระยะเวลาการชุบเคลือบสั้นๆ ชั้นความหนาของการสะสมแพลเลเดียมบนที่อะลูมินาจะบางกว่าที่ระยะเวลาการชุบเคลือบยาวนานขึ้น เนื่องจากพื้นที่ในการชุบเคลือบตลอดการทดลองเท่ากัน ดังนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการชุบเคลือบ แพลเลเดียมที่เกาะบนพื้นผิวที่อะลูมินาก็จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการชุบเคลือบและเกิดการซ้อนทับกันทำให้ความหนาของชั้นการแพลเลเดียมเหล่านี้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.4 ภาพตัดขวางของแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาที่ปริมาณแพลเลเดียม (ก) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (ข) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (ค) ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก

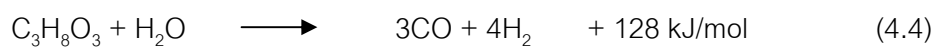
### 4.3 ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล

สำหรับการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการแปรสภาพทางความร้อนของกลีเซอรอล ด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ จะทำการศึกษาโดยทำการป้อนวัตถุดิบคือ กลีเซอรอลบริสุทธิ์ เข้าเตาระเหยแห้งก่อน เพื่อให้กลีเซอรอลและน้ำระเหยกลายเป็นไอก่อนเข้าเตาปฏิกรณ์ โดยจะทำการป้อนกลีเซอรอล 2500 พีพีเอ็มต่อนาที่ ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทำการทดลอง โดยใช้อาร์กอนเป็นแก๊สพา ซึ่งในการทดลองจะทำการทดลองที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ระยะเวลาสัมผัส (Contact time) ของสารระเหยกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1 วินาที ทำการทดลองต่อเนื่อง 5 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างแก๊สขาออกเพื่อนำไปวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC)

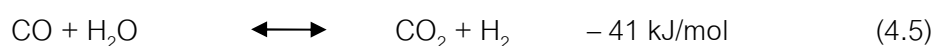
#### 4.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

จากการทดลองการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ แสดงการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.5 จากการทดลองใช้ปริมาณแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส การเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่หลังจากทำปฏิกิริยาได้ประมาณ 100 นาที่ จากการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ขาออกทั้งหมด พบว่ากลีเซอรอลขาเข้าสามารถแปรสภาพไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน โดยจากการสังเกตพบว่าว่ามีแก๊สไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ขณะที่ไม่มีเทนปริมาณน้อย และไม่พบของเหลวหรือน้ำมันดินในองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ขาออก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Luciene และคณะ, (2009) ที่ได้ทดลองผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) และนิกเกิลอิริเดียม (NiIr) พบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์ขาออกประกอบด้วย แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน ซึ่งไม่มีเอพาทิสีน และโพรพิลีน ที่เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) ของกลีเซอรอลและจากงานวิจัยของ Harai และคณะ, (2005) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการแปรสภาพกลีเซอรอลดิบด้วยความร้อน และไอน้ำ พบว่าปฏิกิริยาที่สำคัญที่เกิดขึ้นได้แก่

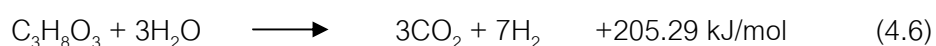
การรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ (Steam reforming of glycerol):



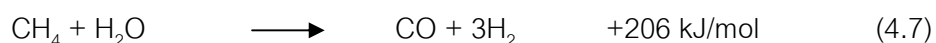
ปฏิกิริยาอวเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water gas shift reaction):



ปฏิกิริยารวม:

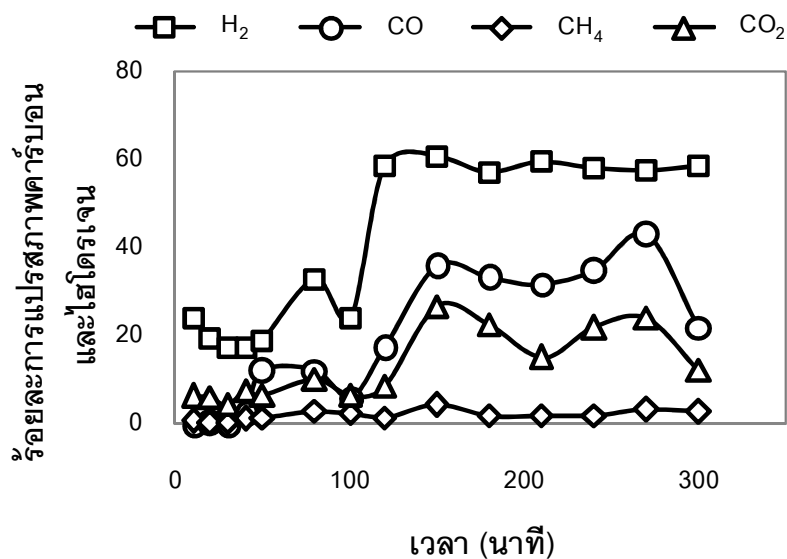


การรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ (Methane steam reforming):



จากสมการที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัตถุดิบถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ น้ำ และสารระเหยได้จะทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอล (Dou และคณะ, 2009) ทำให้ภายในเตาปฏิกรณ์เต็มไปด้วยผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากการแปรสภาพทางความร้อน และจะเห็นได้ว่านอกจากน้ำที่เจือปนอยู่ในวัตถุดิบหรือที่ใส่เข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยาแล้ว ยังมีน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยา ดังสมการที่ 4.5 และ 4.7 ซึ่งเมื่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไป ปฏิกิริยาก็จะผันกลับไปสร้างน้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น

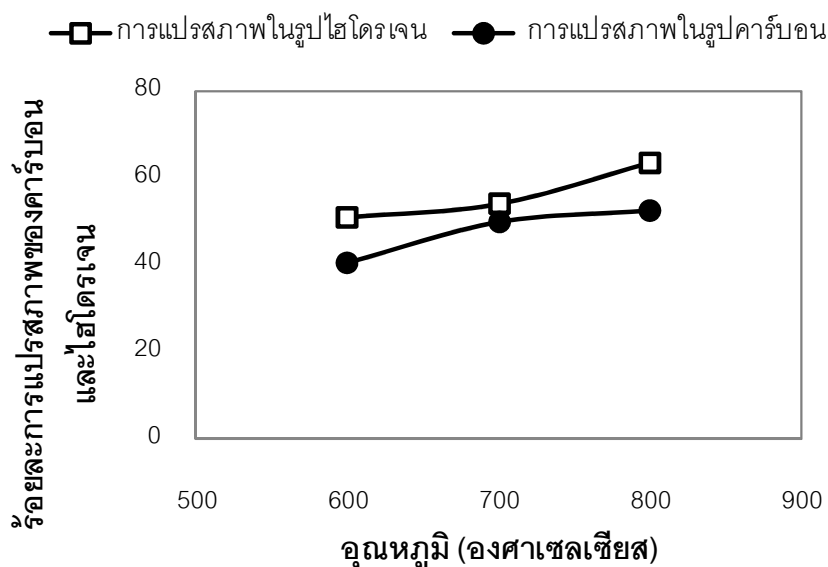




ภาพที่ 4.5 การกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

#### 4.3.2 ผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส จากการพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล พบว่าอุณหภูมิต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อปริมาณโดยรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.6 และการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด แสดงดังภาพที่ 4.7 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจาก 600 องศาเซลเซียส เป็น 700 องศาเซลเซียส และ 800 องศาเซลเซียส ปริมาณการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยพบว่าไฮโดรเจนเข้าแปรสภาพไปเป็นอยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรเจนโดยรวม ร้อยละ 51.06 53.98 และ 63.33 ตามลำดับ และคาร์บอนเข้าแปรสภาพไปอยู่ในรูปของแก๊สคาร์บอน และคาร์บอนเข้าแปรสภาพไปอยู่ในรูปของแก๊สคาร์บอน ร้อยละ 40.60 49.71 และ 52.43 ตามลำดับ



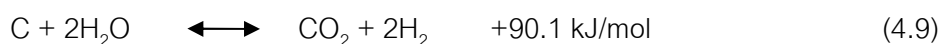
ภาพที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนขาเข้าไปอยู่ในรูปของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมด้วยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดพบว่า ไฮโดรเจนขาเข้าแปรสภาพอยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรเจน และมีเทน ส่วนคาร์บอนขาเข้าแปรสภาพอยู่ในรูปของ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน โดยจากการทดลองไม่พบแก๊สผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ และของเหลว โดยเฉพาะน้ำมันดินที่เกิดจากการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ของกลีเซอรอล โดยการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์ในการทดลองนี้พบว่า แก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเล็กน้อย โดยในรูปของแก๊สไฮโดรเจน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 600 องศาเซลเซียส เป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละการแปรสภาพไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จาก 39.11 เป็น 53.07 เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทำให้วัตุดิบเกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ (4.4) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ทำให้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้าได้ดี และนอกจากปฏิกิริยาที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว ยังมีปฏิกิริยาอื่นๆ ดังสมการ

วอเตอร์แก๊สแบบปฐมภูมิ (Primary water gas):



วอเตอร์แก๊สแบบทุติยภูมิ (Secondary water gas):



การรีฟอร์มมิงคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO<sub>2</sub> reforming):



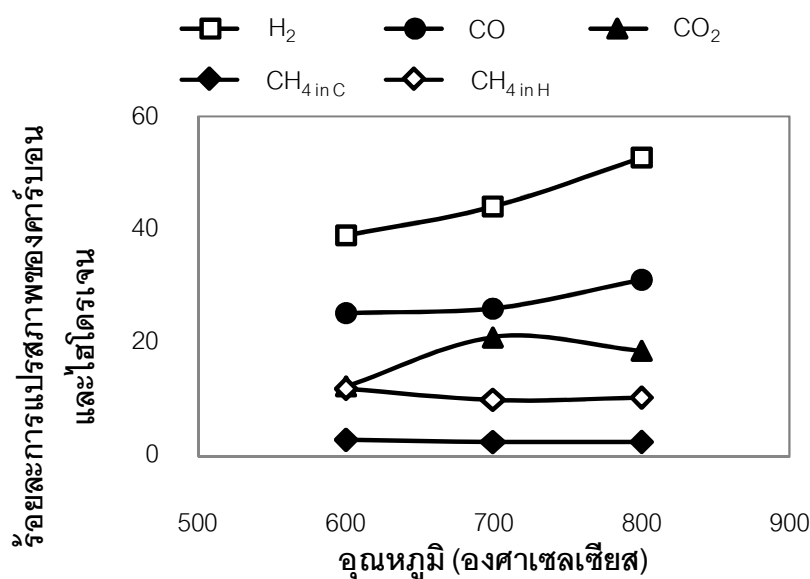
โดยพบว่าทั้งปฏิกิริยวอเตอร์แก๊สแบบปฐมภูมิ ปฏิกิริยวอเตอร์แก๊สแบบทุติยภูมิ และปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการ 4.8-4.10 ปฏิกิริยาเหล่านี้ล้วนเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนทั้งสิ้น ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้า และนอกจากนั้นปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นบางส่วนจะถูกนำไปปฏิกิริยวอเตอร์แก๊สชิฟต์ ดังสมการที่ 4.5 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิดการย้อนกลับ ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนลดลง แต่เนื่องจากค่าความร้อนของการเผาไหม้มีค่าน้อยกว่าปฏิกิริยาอื่นๆ เป็นผลให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ส่วนการเพิ่มอุณหภูมिनอกจากจะมีผลต่อการแปรสภาพไฮโดรเจนให้อยู่ในรูปของแก๊สผลิตภัณฑ์แล้ว ยังมีผลต่อปริมาณร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์เช่นกัน โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมจะเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพที่ 4.7 ซึ่งการแปรสภาพของคาร์บอนที่ตรวจวัดได้อยู่ในรูปแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน พบว่าการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 600 องศาเซลเซียสเป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของปริมาณการแปรสภาพของคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทำนายทางเทอร์โมไดนามิกของปฏิกิริยาบูดูยาร์ด (Boudouard's reaction) ดังสมการ

ปฏิกิริยาบูดูยาร์ด (Boudouard reaction):



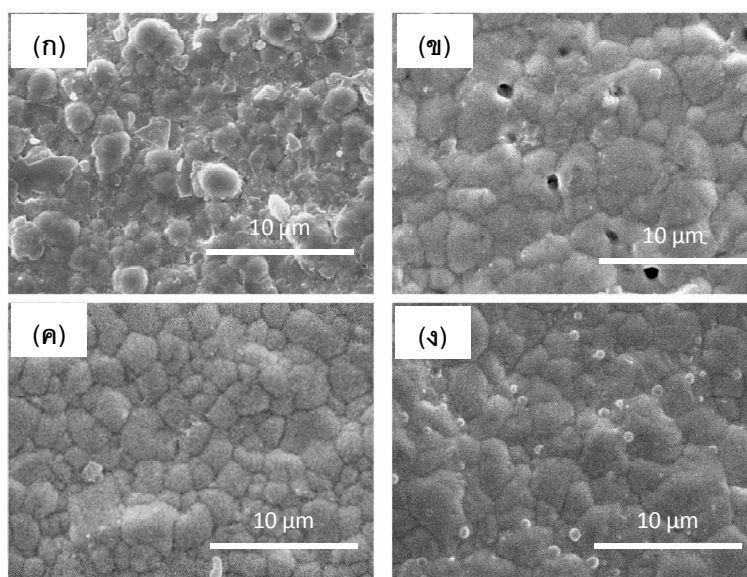
เนื่องจากธรรมชาติของปฏิกิริยาบูดยาร์ดเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาก็คงจะการเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้า คาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินพอเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ร้อยละการแปรสภาพคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงและเนื่องจากธรรมชาติของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาร้อยละการแปรสภาพคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์จึงลดลงและบางส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์จึงทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ลดลงด้วย ดังปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงดังสมการที่ 4.10 นอกจากนี้ยังเกิดจากปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สแบบปฐมภูมิและการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำโดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้า ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเพิ่มขึ้นและบางส่วนถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ ดังสมการที่ 4.5 โดยจากการทดลองพบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส ร้อยละของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สแบบปฐมภูมิ ปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงคาร์บอนมอนอกไซด์ และปฏิกิริยาบูดยาร์ดเกิดได้ดี ในขณะที่ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลง ส่วนร้อยละของมีเทนลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการแตกตัวของมีเทนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบาขึ้น เกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของมีเทน ดังสมการที่ 4.7 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Valliyappan และคณะ, (2008) โดยได้ทำการทดลองการไพโรไลซิสกลีเซอรอลเพื่อผลิตไฮโดรเจนและแก๊สสังเคราะห์ ที่อัตราการไหลของแก๊สพา 50 มล./นาที่ ที่อุณหภูมิ 650-800 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 650 เป็น 800 องศาเซลเซียส การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 17 เป็น 48.6 โดยโมล ซึ่งในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการไพโรไลซิสกลีเซอรอลที่อุณหภูมิสูงคือ 800 องศาเซลเซียส ให้ผลผลิตไฮโดรเจน และแก๊สสังเคราะห์สูงสุด และจากงานวิจัยของ Adhikari และคณะ (2007) ซึ่งได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเลือกเกิดไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์จะสูงขึ้น ขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนลดลง ซึ่งที่นั่นอุณหภูมิสูงปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำเกิดขึ้นทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมิเทนเกิดการแตกตัวเป็นผลให้มีเทนลดลง



ภาพที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก

จากการทดลองนี้สรุปว่า อุณหภูมิมีผลต่อการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์ก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีฟอร์มมิงก็คือ 800 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างลักษณะผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังการใช้งานที่ 5 ชั่วโมง โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 4.8 ตัวอย่างผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้งานแสดงดังภาพที่ 4.8 (ก) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับหลังใช้งาน ขนาดอนุภาคของแพลเลเดียมหลังการใช้งานอยู่ระหว่าง 2.55-2.77 ไมโครเมตร จากการสังเกตขนาดอนุภาคของแพลเลเดียมพบว่าหลังการเกิดปฏิกิริยาโครงสร้างของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงและโครงสร้างผิวหน้าจะเรียบขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ได้ใช้งานแสดงในภาพที่ 4.8 (ก)-(ง)

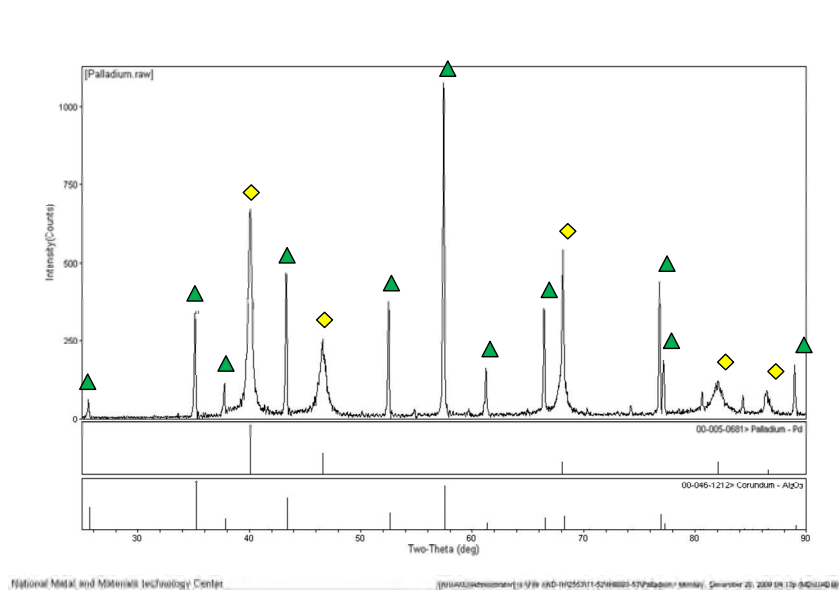


ภาพที่ 4.8 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ด้วยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนอะลูมินา ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังการใช้งานที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ (ก) ก่อนการใช้งาน (ข) ใช้งานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ค) ใช้งานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และ (ง) ใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

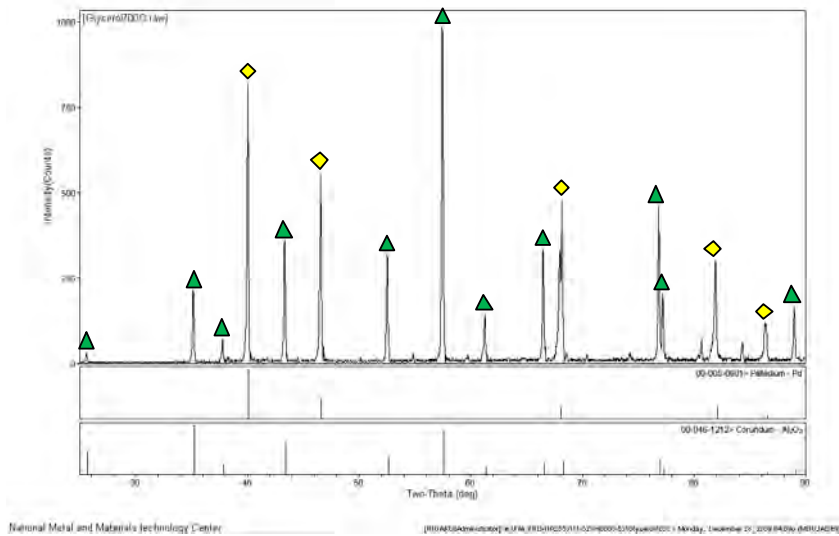
จากผลการวิเคราะห์ด้วย วิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction: XRD) เพื่อหาโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาหลังจากเตรียมด้วยวิธีการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าก่อนและหลังการใช้งาน แสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่าจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบตำแหน่งพีคของอะลูมินา ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $25.9^\circ$ ,  $35.5^\circ$ ,  $43.5^\circ$ ,  $52.5^\circ$ ,  $57.8^\circ$ ,  $61.5^\circ$ ,  $66.5^\circ$ ,  $77^\circ$ ,  $77.2^\circ$  และ  $88.5^\circ$  และปรากฏพีคแสดงถึงตำแหน่งของแพลเลเดียมโดยพบพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $40^\circ$ ,  $46.2^\circ$ ,  $68^\circ$ ,  $82^\circ$  และ  $86.5^\circ$  พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการใช้งานนั้น พีคยังขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกันและไม่พบพีคที่แสดงถึงการสะสมของคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งจากภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน การกระจายตัวของอนุภาคแพลเลเดียมกระจายตัวอย่างดีบนตัวรองรับอะลูมินาทั้งก่อนและหลังการใช้งาน

(ก) ก่อนการใช้งาน

▲ Pd

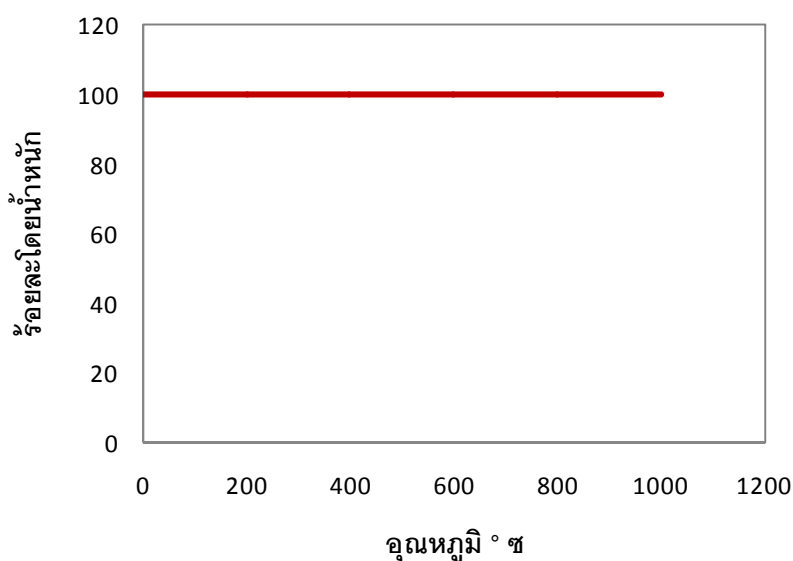
◆ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(ข) หลังการใช้งาน



ภาพที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก (ก) ก่อนใช้งาน และ (ข) หลังการใช้งาน

จากการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบยืนยันเพื่อหาคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการนำไปทดสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกอนาไลเซอร์ (TGA) โดยได้นำตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก หลังการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียสไปทดสอบ แสดงดังภาพที่ 4.10 จากผลการทดสอบพบว่าไม่พบคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แสดงการยับยั้งการเกิดคาร์บอนบนพื้นผิว ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานเพื่อผลิตไฮโดรเจน



ภาพที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์คาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

#### 4.3.3 ผลของปริมาณโลหะต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์

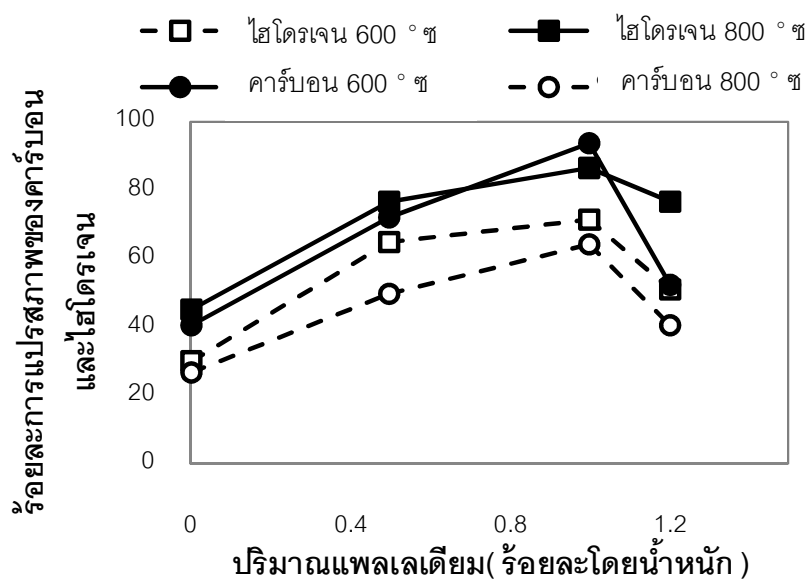
ในการทดลองนี้ทำเพื่อเปรียบเทียบการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำเมื่อมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกันคือ ร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.2 โดยน้ำหนัก เพื่อหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลอง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.11 ซึ่งพบว่าปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลแปรสภาพไปอยู่ในรูปของคาร์บอนและไฮโดรเจนในรูปแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งสองอุณหภูมิ ซึ่งเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีแพลเลเดียมเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินามาเปรียบเทียบกับตัวรองรับที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีแพลเลเดียมนั้นสามารถแปรสภาพกลีเซอรอลไปเป็นอยู่ในรูปของคาร์บอนและไฮโดรเจนในรูปแก๊สได้สูงกว่าการใช้ตัวรองรับที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา



เนื่องจากการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมซึ่งเป็นโลหะที่ว่องไวจะทำให้ตำแหน่งที่ถูกกระตุ้น (active site) เพิ่มมากขึ้น โดยตำแหน่งที่ถูกกระตุ้นนี้คือตำแหน่งที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจับกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนมากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณมีเทนที่ลดลง แสดงดังภาพที่ 4.12 การกระตุ้นการเร่งปฏิกิริยาและการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์สูงที่สุดได้รับเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก โดยการแปรสภาพไฮโดรเจนไปอยู่ในรูปแก๊สเป็นปริมาณร้อยละ 71.72 และ 86.66 โดยน้ำหนัก ขณะที่การแปรสภาพคาร์บอนไปอยู่ในรูปแก๊สเป็นปริมาณร้อยละ 64.08 และ 93.55 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สามารถสรุปความสัมพันธ์ของการกระตุ้นการรีฟอร์มมิ่งกับปริมาณแพลเลเดียมที่เคลือบบนตัวรองรับอะลูมินาได้ดังนี้

ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก > ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก > ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก > อะลูมินา

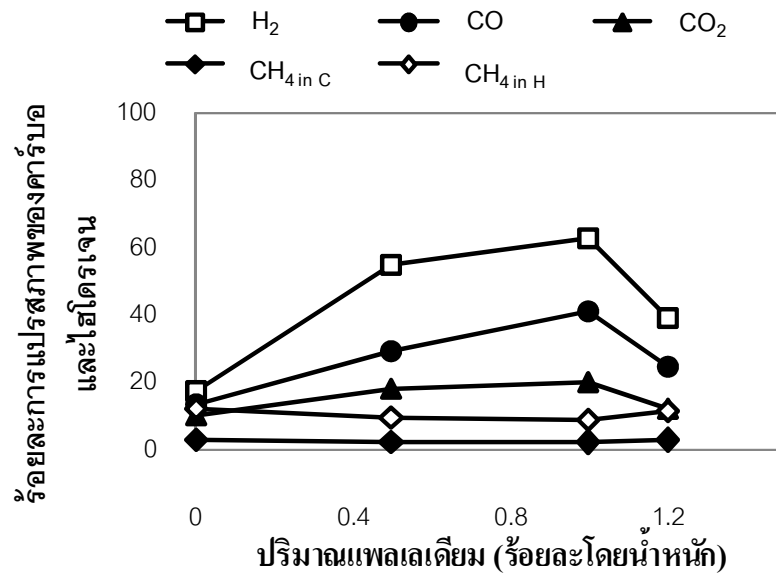
จากผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยกว่าหรือมากกว่า ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก อาจจะไม่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณตัวเร่งที่น้อยกว่าพื้นที่ผิวสัมผัสอาจจะน้อย ทำให้บริเวณเร่ง (active site) ลดลงและปริมาณตัวเร่งที่มากกว่าจะเกิดการสะสมอนุภาคแพลเลเดียมที่มากเกินไปจนเป็นอนุภาคใหญ่ๆ ไม่มีความสม่ำเสมอ ส่งผลต่อการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก การกระจายตัวของอนุภาคแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาจะมีความสม่ำเสมอ จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับวัตถุดิบมากกว่า การเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ก็เพิ่มขึ้นด้วย



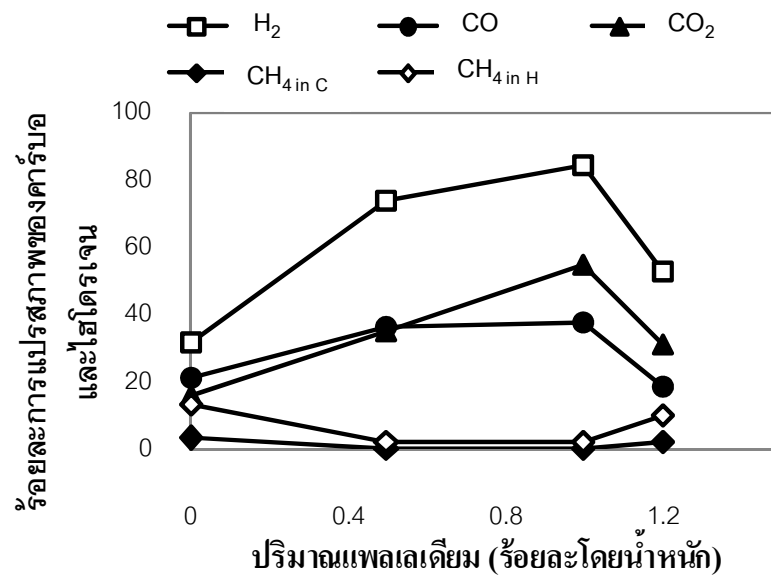
ภาพที่ 4.11 ผลของปริมาณแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4.12 แสดงการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์บนตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$  การเพิ่มอุณหภูมิจาก 600 ไปเป็น 800 องศาเซลเซียส เพิ่มการสลายตัวของกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบตัวรองรับที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาและที่มีแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญกับการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา (ที่อุณหภูมิเดียวกัน) จะช่วยลดพลังงานกระตุ้นส่งผลให้กระบวนการรีฟอร์มมิงเกิดง่ายขึ้น ขณะเดียวกันตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมก็จะช่วยในการเลือกเกิด (selectivity) ของกระบวนการรีฟอร์มมิงดีขึ้น ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (ไฮโดรเจน) จึงสูงขึ้นด้วย จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าที่ปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงการกระตุ้นการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำสูงสุด โดยเกิดการสลายตัวของกลีเซอรอลเพื่อแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนในรูปแก๊สมากที่สุด ซึ่งปริมาณไฮโดรเจนเข้าสามารถแปรสภาพเป็นแก๊สไฮโดรเจนและมีเทน ร้อยละ 84.33 และ 2.32 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณคาร์บอนเข้าสามารถแปรสภาพไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทน ร้อยละ 54.91, 38.06 และ 0.58 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาปริมาณแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาที่ ร้อยละ 0.5 และ 1.2 โดยน้ำหนัก พบว่าการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ทั้งหมดต่ำกว่าที่ ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากการทดลองนี้แสดงให้เห็น ปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจน

(ก) 600 องศาเซลเซียส

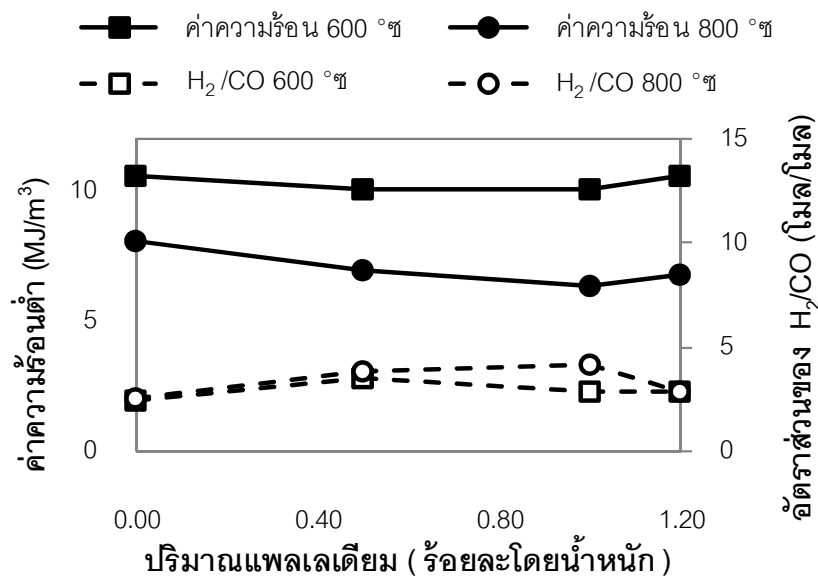


(ข) 800 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.12 ผลของปริมาณไอน้ำเดิมบนตัวรองรับอะลูมินาต่อการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ (ก) 600 องศาเซลเซียส และ (ข) 800 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4.13 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ 600 เป็น 800 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนต่ำที่ได้ลดลง ซึ่งที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนต่ำที่ได้อยู่ในช่วง 10.0-10.6 MJ/m<sup>3</sup> และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนต่ำที่ได้ในช่วง 10.0-8.5 MJ/m<sup>3</sup> เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้แก๊สมีเทนลด จึงทำให้ค่าความร้อนต่ำลดลงด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงปริมาณแพลเลียมที่แตกต่างกัน พบว่าที่ ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ค่าความร้อนต่ำที่ได้มีค่าต่ำสุด เนื่องจากที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานี้ การสลายตัวของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปอยู่ในรูปของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าได้ดี เช่น อยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งสังเกตได้จากอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนนอกไซด์ที่สูงที่สุด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 4.2

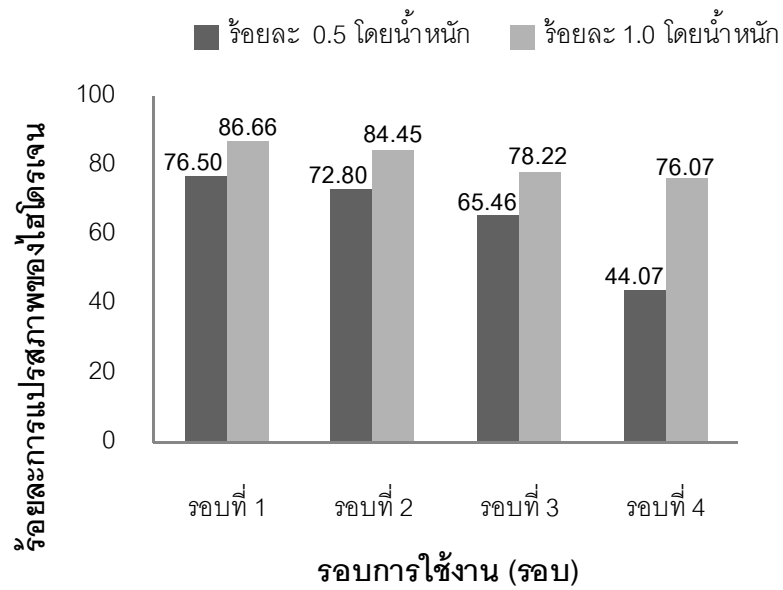


ภาพที่ 4.13 ผลของค่าความร้อนต่ำและอัตราส่วนโดยโมลของ H<sub>2</sub>/CO ที่ได้จากการแปรผันของปริมาณแพลเลียมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส

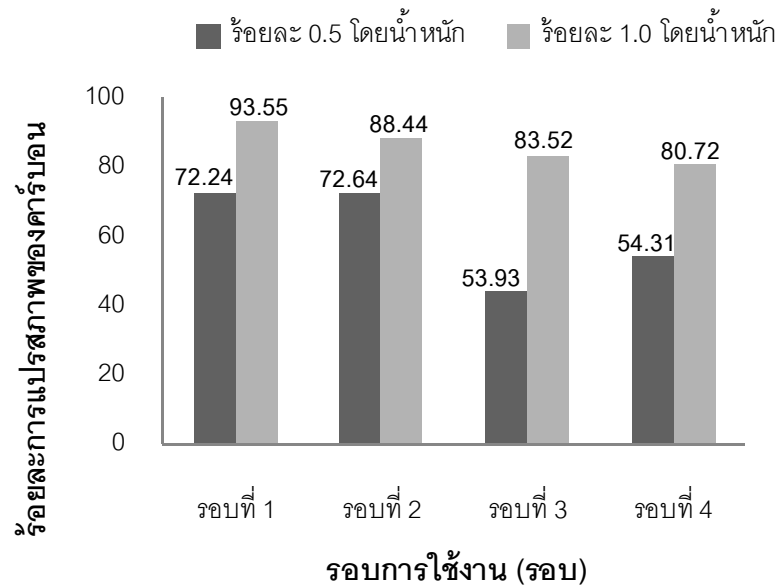
#### 4.3.4 ผลของประสิทธิภาพการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ

ผลของประสิทธิภาพการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่แสดงดังภาพที่ 4.14 ด้วยการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ 4 รอบ โดยรอบละ 5 ชั่วโมง โดยเลือกจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์และลำดับรองลงมา คือที่ปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 1.0 และ 0.5 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าการแปรสภาพไฮโดรเจนลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก การแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์ยังคงอยู่ในช่วงร้อยละ 75-86 และ 80-93 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สนับสนุนการผลิตไฮโดรเจนที่มีความเสถียรสูง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โดยการแปรสภาพไฮโดรเจนลดลงจากร้อยละ 76.50 เป็น 42.52 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 4 ขณะที่การแปรสภาพของคาร์บอนลดลงจากร้อยละ 72.24 เป็น 53.92 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบท่อจะลดลงหลังจากการทำซ้ำหลายๆ ครั้ง เนื่องจากปริมาณการสะสมของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มรอบการใช้งาน ซึ่งอาจจะสรุปได้ว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 ระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำอาจเกิดปรากฏการณ์ทางความร้อน (heating phenomena) และการสะสมของคาร์บอน แสดงดังภาพที่ 4.15 ซึ่งจากภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มาใช้ซ้ำหลายๆ ครั้ง จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางความร้อนเกิดเป็นลักษณะรูพรุนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก จะมีความหนาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งความหนาที่เหมาะสมจะมีผลต่อการนำกลับมาใช้และประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์

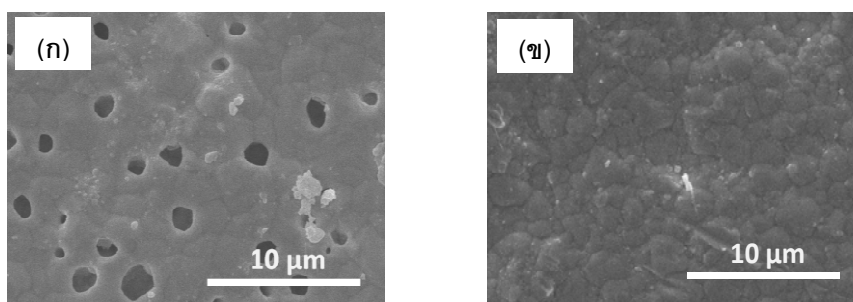
(ก) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก



(ข) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก



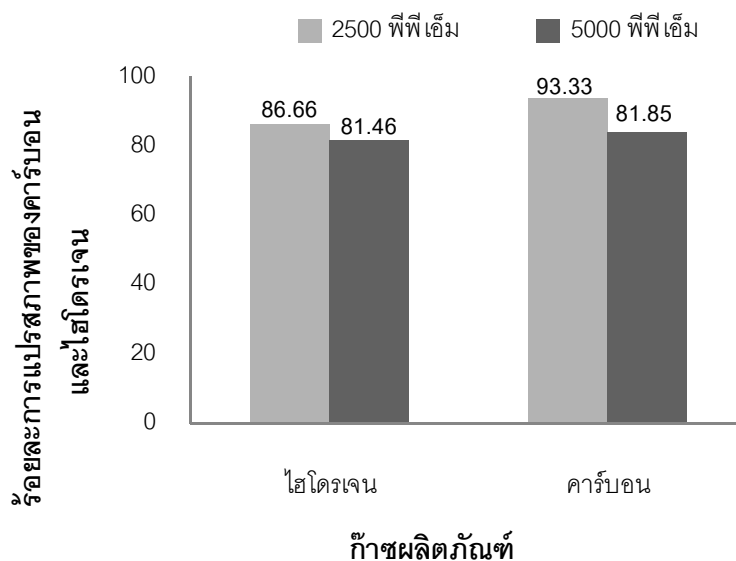
ภาพที่ 4.14 ผลของประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา  
(ก) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และ (ข) 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.15 ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการใช้ซ้ำ 4 รอบ (ก) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และ (ข) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก

#### 4.3.5 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์

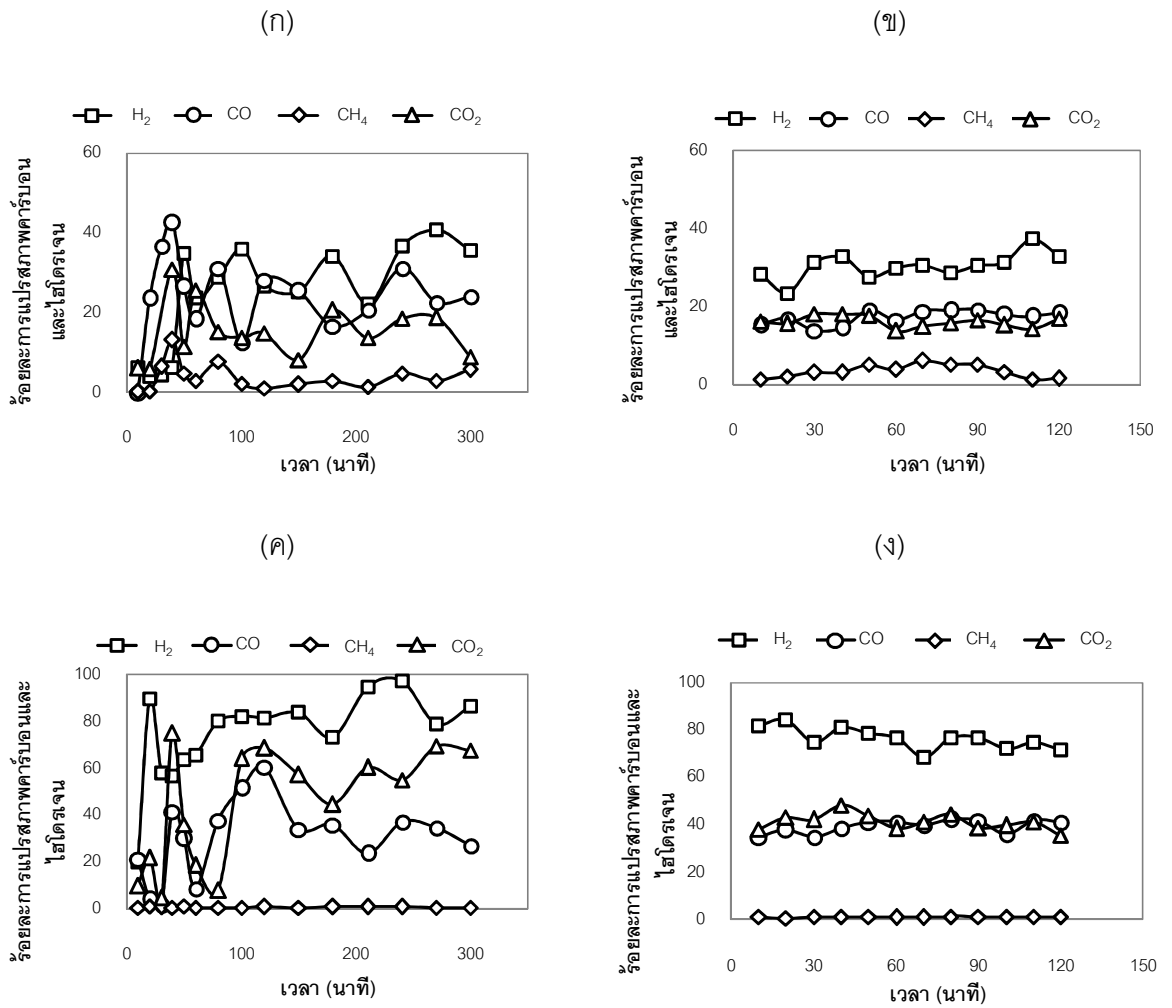
การศึกษานี้ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส โดยทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ ความเข้มข้น 2500 และ 5000 พีพีเอ็ม แสดงดังภาพที่ 4.16 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลจะมีผลต่อปริมาณโดยรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 2500 พีพีเอ็ม เป็น 5000 พีพีเอ็ม พบว่าร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลง จากร้อยละ 93.55 เป็นร้อยละ 84.36 และจากร้อยละ 86.66 เป็น ร้อยละ 81.65 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ลดลง ทำให้ค่าแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมลดลงด้วย ซึ่งการป้อนสารเข้าไปในระบบมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารระเหยกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง มีผลต่อการแตกตัวของกลีเซอรอลไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lou และคณะ, (2008) ที่ได้ทำการทดลองการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตินัม โดยได้ศึกษาผลของความเข้มข้นในการป้อนสารละลายกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ ความเข้มข้น ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถรีฟอร์มเพื่อผลิตคาร์บอนและไฮโดรเจนไปอยู่ในรูปแก๊สได้สูงกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.16 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ป้อนเข้ากับการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม ด้วยปริมาณแพลเลเดียมบนอะลูมินา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ถึงแม้ว่าที่ความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าตาปฏิกรณ์ 2500 พีพีเอ็ม จะทำให้ปริมาณผลผลิตโดยรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากที่ความเข้มข้นนี้การผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ต่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างที่จะไม่เสถียร มีการขึ้นลงของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกมา เนื่องจากการป้อนสารเข้าไปในระบบมีปริมาณน้อยเกินไป ทำให้การไหลของสารระเหยหรือวัตถุดิบไม่เต็มท่อเกิดช่องว่างในท่อ ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ออกมาจึงไม่สม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้นสูงกว่าแสดงดังภาพที่ 4.17 จากกราฟเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 5000 พีพีเอ็ม จะทำให้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีความเสถียร เนื่องจากที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สารระเหยหรือวัตถุดิบที่เข้าท่อก็เพิ่มขึ้น ช่องว่างในท่อก็ลดลง จึงทำให้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกมาต่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยามีความสม่ำเสมอและค่อนข้างเสถียร ทำให้ค่าที่วัดได้มีความแม่นยำมากขึ้นด้วย ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจะมีการศึกษาที่ความเข้มข้นกลีเซอรอล 5000 พีพีเอ็ม เพื่อดูผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์

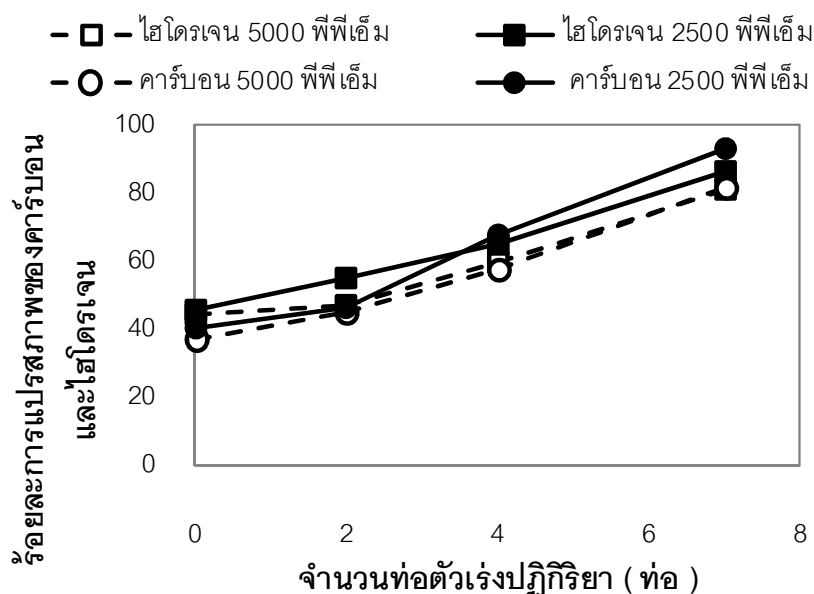




ภาพที่ 4.17 ภาพของการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์ของอะลูมินาที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้น (ก) 2500 และ (ข) 5000 พีพีเอ็ม และตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้น (ค) 2500 และ (ง) 5000 พีพีเอ็ม

#### 4.3.6 ผลของจำนวนท่อแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา

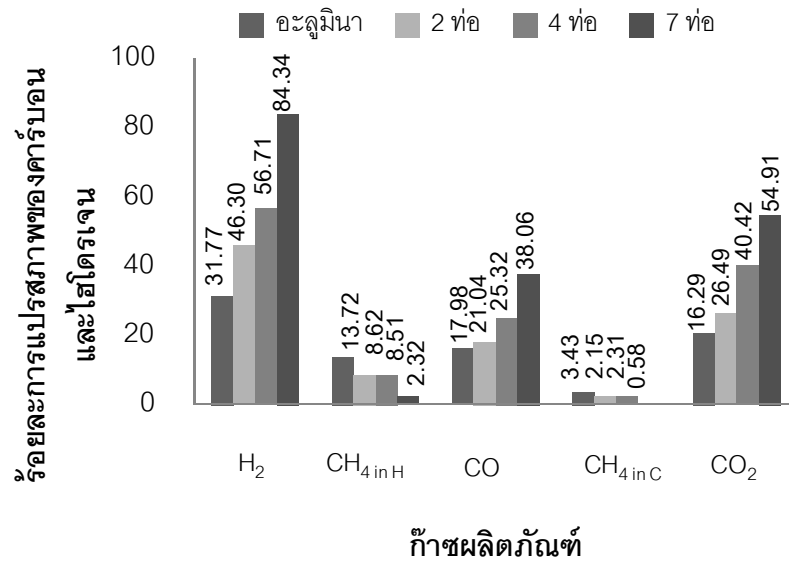
จากการทดลองทำการศึกษาอิทธิพลของจำนวนท่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> รั้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส ด้วยการแปรผันจำนวนท่อของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้จำนวนท่อตัวเร่งปฏิกิริยา จำนวน 0 2 4 และ 7 ท่อ แสดงดังภาพที่ 4.18 พบว่าการใส่ท่อที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปทำให้การแปรสภาพกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์น้อยมากและเมื่อเพิ่มท่อของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไป 2 ท่อ การแปรสภาพกลีเซอรอลไปอยู่ในภาพแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากการสัมผัสของกลีเซอรอลและไอน้ำกับผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ทั่วถึง โดยสารตั้งต้นบางส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับผิวหน้าตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านออกไป โดยไม่เกิดการแตกตัว ทำให้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่มีการเพิ่มท่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 4 ท่อ และ 7 ท่อ ซึ่งเมื่อเพิ่มจำนวนท่อของตัวเร่งปฏิกิริยาสารตั้งต้นที่เข้ามาก็จะมีโอกาสสัมผัสกับผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปริมาณสูงสุดของการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนในรูปแบบแก๊สผลิตภัณฑ์จะได้รับที่จำนวนท่อตัวเร่งปฏิกิริยา 7 ท่อ ซึ่งเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ และรองลงมาคือ จำนวนท่อตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ท่อ



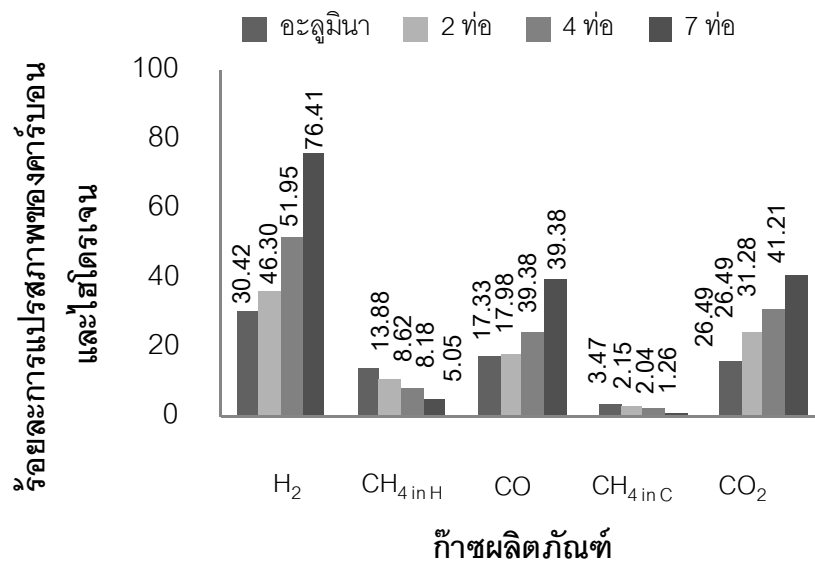
ภาพที่ 4.18 ผลของจำนวนท่อกับการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนในกาลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่ความเข้มข้น 2500 และ 5000 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อแปรผลในรูปของการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.19 พบว่าการแตกตัวของกาลีเซอรอลเป็นแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย แต่การแตกตัวของกาลีเซอรอลเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มท่อนิวเคลียร์ปฏิกริยา ก็จะเป็นการเพิ่มบริเวณการกระตุ้น (active site) ทำให้การแปรสภาพของคาร์บอนหรือไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการใช้แพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกริยา จำนวน 7 ท่อ ที่ความเข้มข้นของกาลีเซอรอล 2500 พีพีเอ็ม ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก พบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและการแตกตัวของกาลีเซอรอลไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสูงและจากการทดสอบความเสถียรในเบื้องต้น เมื่อมีการนำมาใช้ซ้ำพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เนื่องจากแพลเลเดียมอยู่ในหมู่ของโลหะที่มีค่า ต้นทุนในการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกริยาค่อนข้างสูง ดังนั้นในการทดลองถัดไปจึงได้ลดจำนวนท่อนิวเคลียร์ปฏิกริยาแพลเลเดียมเหลือจำนวน 4 ท่อ เพื่อลดต้นทุนในการทดลอง

(ก) 2500 ฟीฟี่เอ็ม



(ข) 5000 ฟีฟี่เอ็ม



ภาพที่ 4.19 ผลของจำนวนท่อกับการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์ความเข้มข้น (ก) 2500 ฟีฟี่เอ็ม และ (ข) 5000 ฟีฟี่เอ็ม ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

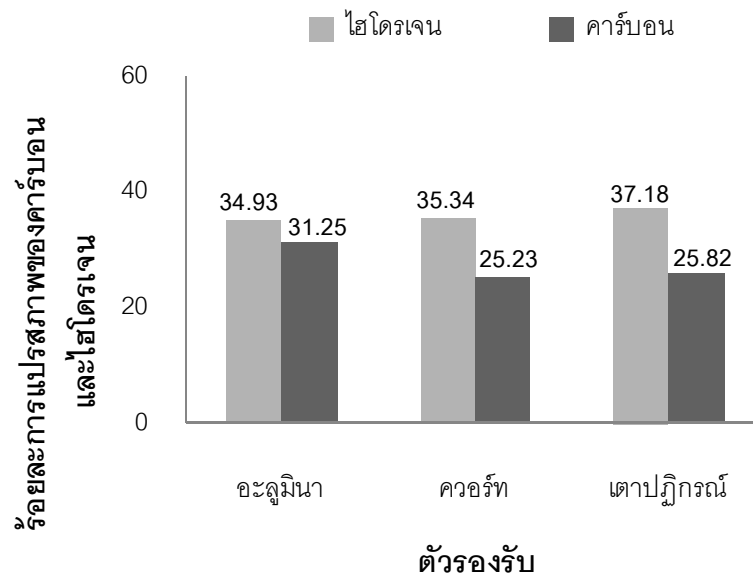
#### 4.4 ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล เมื่อมีการลดทอตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยในการทดลองส่วนนี้จะลดจำนวนทอของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมเหลือจำนวน 4 ทอ เพื่อลดต้นทุนในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะทำการป้อนกลีเซอรอลเข้าเตาปฏิกรณ์ 5000 พีพีเอ็ม ต่อนาที และศึกษาปัจจัยต่างๆ เพิ่มเติม คือ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนและระยะเวลาการสัมผัส นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ เพื่อดูผลของการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

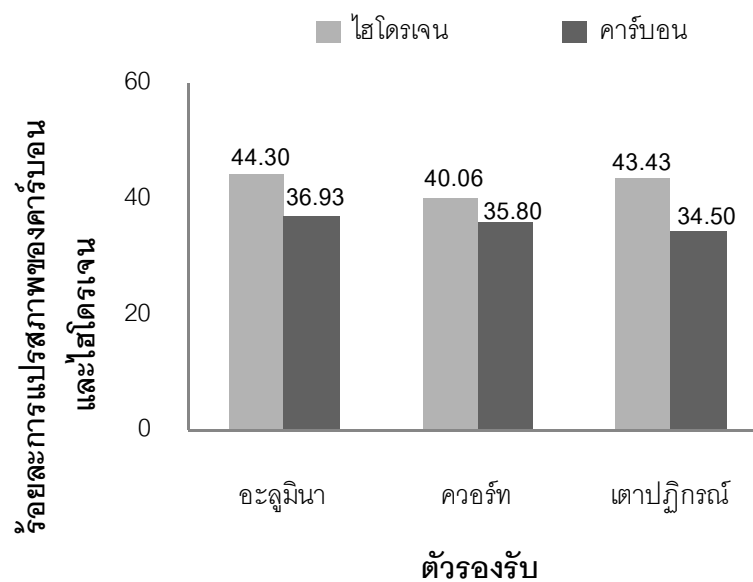
##### 4.4.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา

ก่อนทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาที่แตกต่างกัน โดยใช้จำนวนทอตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 4 ทอ เมื่อทำการป้อนกลีเซอรอลเข้าเตาปฏิกรณ์ด้วยความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลที่มีต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส ระหว่างการใช้ทออะลูมินา ทอควอร์ต และเตาปฏิกรณ์เปล่าๆ ที่ไม่ได้ใส่แท่งอะลูมินาหรือควอร์ตลงไป โดยแสดงดังภาพที่ 4.20 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ตัวรองรับทั้ง 3 แบบ การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งในเตาปฏิกรณ์ที่ใส่อะลูมินาจะมีการแปรสภาพของกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์มากกว่าชนิดอื่นๆ เล็กน้อย โดยอะลูมินาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบแอลฟาซึ่งอยู่ในรูปที่เสถียรจะไม่มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยา แต่ในส่วนนี้การแปรสภาพที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดเนื่องมาจากกลีเซอรอลบางส่วนเกิดการสะสมอยู่บนทออะลูมินาและบางส่วนสะสมอยู่ในรูพรุนของทออะลูมินาจึงทำให้เกิดการแปรสภาพของกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

(ก) 600 องศาเซลเซียส

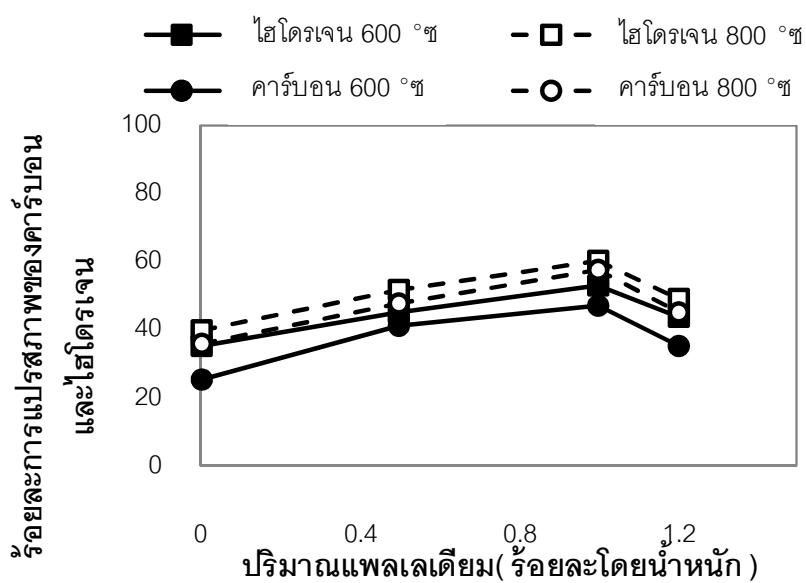


(ข) 800 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.20 ผลของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมกับตัวรองรับที่ใช้ในการทดลอง ที่อุณหภูมิ (ก) 600 องศาเซลเซียส และ (ข) 800 องศาเซลเซียส

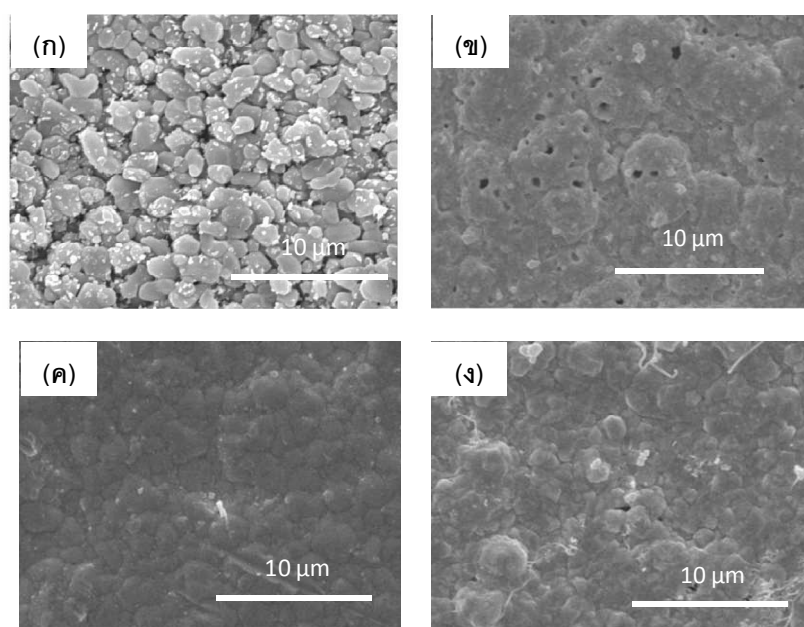
เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.2 โดยน้ำหนัก แสดงดังภาพที่ 4.21 โดยจะมีการใช้แท่งควออร์ทแทนช่องว่างที่ไม่ได้ใส่ตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป เพื่อป้องกันไม่ให้อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง อีกทั้งยังป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากหากใช้อะลูมินาแทนที่อาจมีบางส่วนของสารระเหยสะสมอยู่บนผิวหน้าท่อและบางส่วนอาจเข้าไปในช่องว่าง เกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ จากผลการศึกษากาวิเคราะห์แก๊สขาออกพบว่า ผลการทดลองที่ความเข้มข้นของกลีเซอรอล 5000 พีพีเอ็ม สอดคล้องกับการทดลองที่ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม โดยพบว่าที่อุณหภูมิต่ำ คือ 600 องศาเซลเซียส การสลายตัวของกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ในรูปของคาร์บอนและไฮโดรเจน ต่ำกว่าที่ 800 องศาเซลเซียส และการสลายตัวของกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.21 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมกับการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส

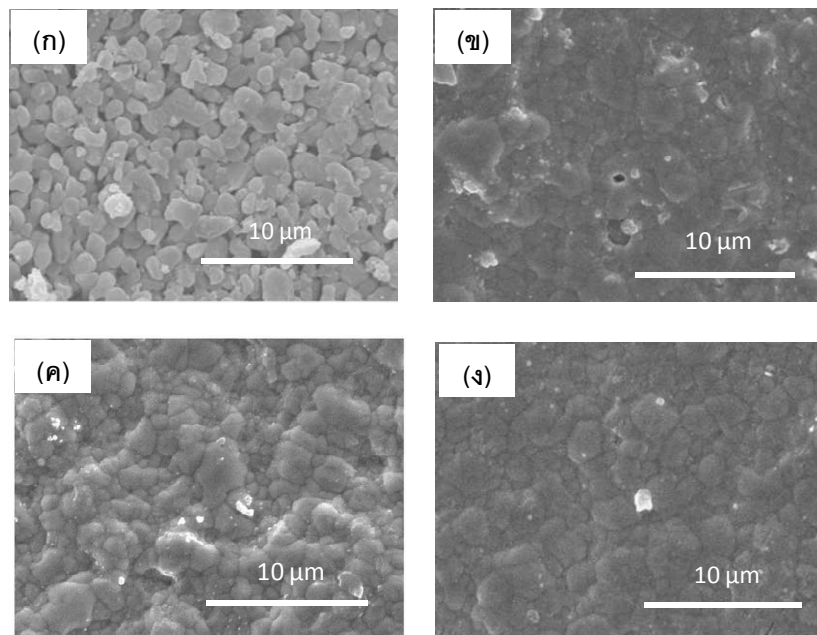
จากภาพที่ 4.22 และ 4.23 แสดงภาพของการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ที่อุณหภูมิ 600 แสดงดังภาพที่ 4.22 และ 800 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.23 หลังการทำปฏิกิริยา จากภาพจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณแพลเลเดียมน้อยกว่าและมากกว่า ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จะเกิดการหลอมตัวรวมกันจนเป็นแผ่นใหญ่ทำให้บริเวณเร่งลดลง จึงส่งผลต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงไปด้วยและจากการ

ทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการเกาะของคาร์บอนบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบด้วยวิธีเทมเพอร์เจอร์โปรแกรมออกซิเดชัน (TPO) แสดงดังภาพที่ 4.24 เพื่อหาคาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา โดยได้ทำการทดสอบที่ตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีคาร์บอนที่ทดสอบได้ ดังนั้นในแง่ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมประสิทธิภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่ลดลงอาจขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยา และปัจจัยอื่นๆ โดยแพลเลเดียมจะแสดงการยับยั้งการเกิดคาร์บอนบนพื้นผิวได้ดี ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลง

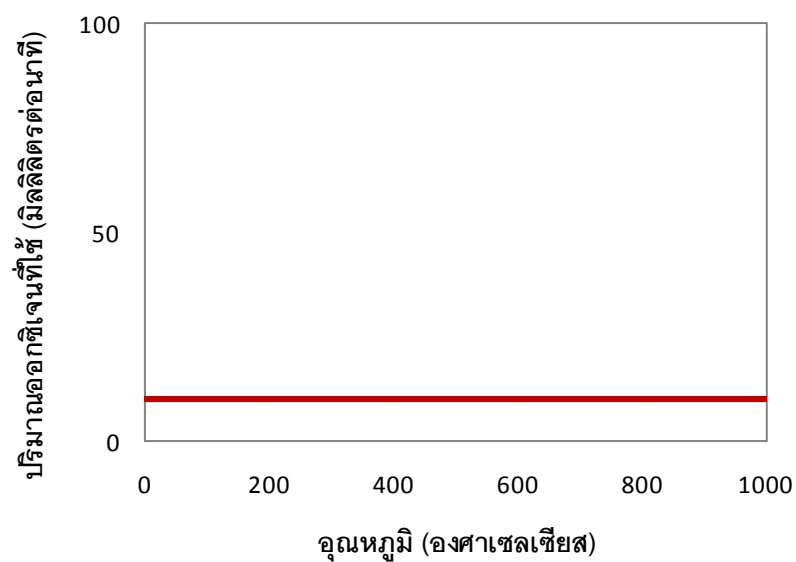


ภาพที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำปฏิกิริยา (ก) อะลูมินา (ข) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (ค) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (ง) ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส





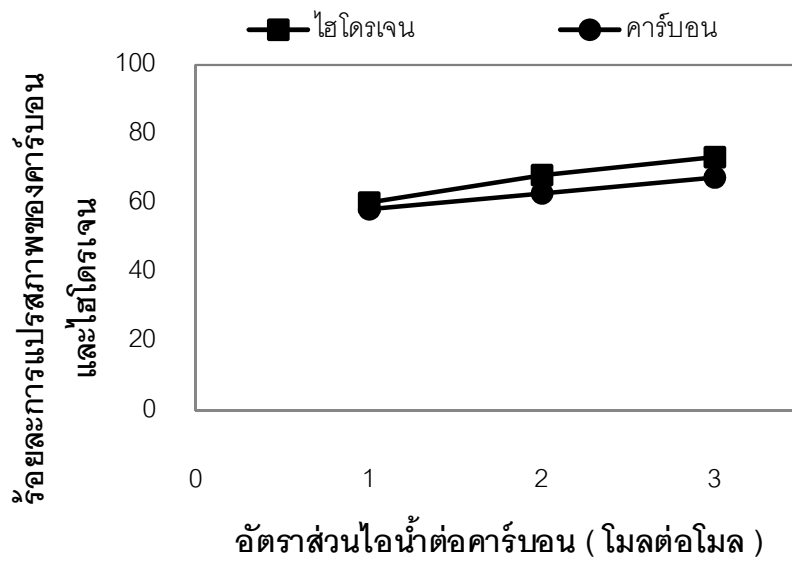
ภาพที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำปฏิกิริยา (ก) อะลูมินา (ข) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (ค) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (ง) ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



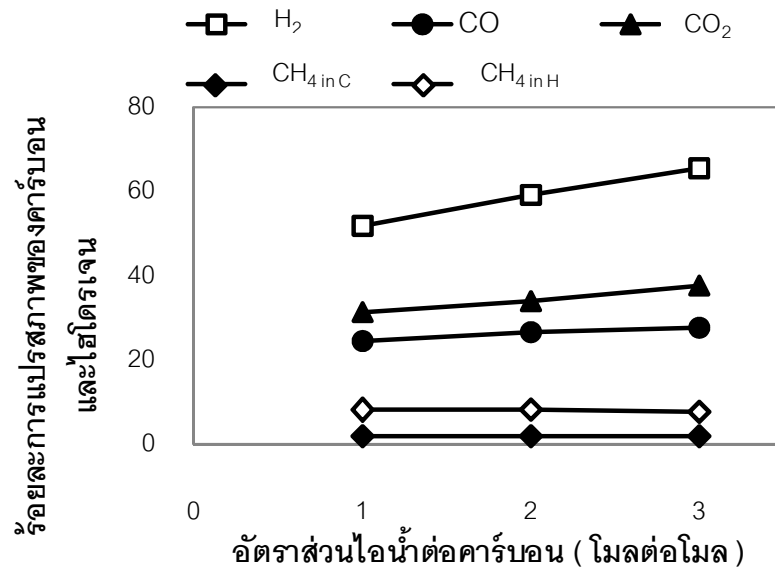
ภาพที่ 4.24 ผลของการวิเคราะห์คาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส

#### 4.4.2 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน (Steam/Carbon ratio)

ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่มีผลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$  รั้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ด้วยจำนวนท่อของตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ท่อ ที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส ทำการเปลี่ยนการป้อนอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่แตกต่างกันคือ 1:1 2:1 และ 3:1 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน มีผลต่อแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมและการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด โดยเมื่อเพิ่มการป้อนอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนจาก 1:1 เป็น 2:1 และ 3:1 แสดงดังภาพที่ 4.25 จากภาพแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า แก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด แสดงดังภาพที่ 4.26 พบว่าเมื่อแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนเพิ่มขึ้น ในขณะที่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากอัตราไอน้ำต่อคาร์บอนที่มากเกินไปตามสมการที่ 4.6 ไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนตามสมการการเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (4.5) นอกจากนั้นการป้อนไอน้ำที่สูง จะเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สแบบทุติยภูมิ (4.9) ได้ดีกว่าปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สแบบปฐมภูมิ (4.8) ดังนั้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำสูงขึ้น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จึงลดลง ขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับเพิ่มขึ้นและจากผลการทดลองพบว่าแก๊สมีเทนลดลงเล็กน้อย การเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนทำให้เกิดการแตกตัวของมีเทนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบาขึ้น ตามปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ (4.7)



ภาพที่ 4.25 ผลของอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

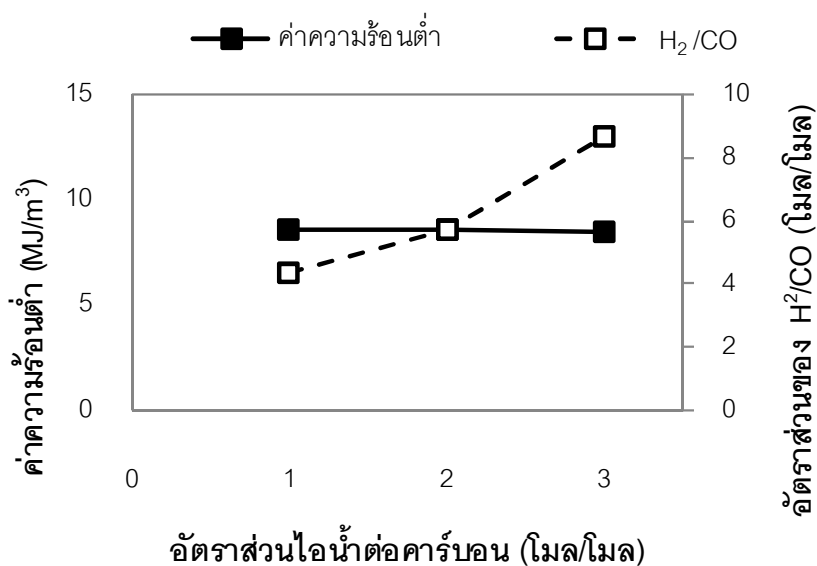


ภาพที่ 4.26 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนต่อการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์

จากงานวิจัยของ Adhikari และคณะ, (2007) ได้ศึกษาการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจนโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบท่อ ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Rh/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อุณหภูมิ การเกิดปฏิกิริยา 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อกลีเซอรอล

3:1 6:1 และ 9:1 โดยถ้าเทียบกับการทดลองนี้ก็คือ ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 2:1 และ 3:1 จากการทดลองพบว่าการแปรสภาพของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน โดยจากการเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน จะเพิ่มการเลือกเกิดไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในทั้งสองตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสามารถอธิบายด้วยปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สซิฟต์ ขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ส่วนการเลือกเกิดมีเทนจะใกล้เคียงศูนย์ โดย Rossi และคณะ (2009) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกของการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ได้กล่าวว่า เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนทำให้การเลือกเกิดคาร์บอนไดออกไซด์และการเลือกเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเล็กน้อยนั้น ผลเหล่านี้เข้าใกล้สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกและเมื่ออัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนไม่เพียงพอจะเกิดการสร้างของแข็งคาร์บอนเนื่องจากการสลายตัวของมีเทน ทำให้เกิดคาร์บอนของแข็งซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่ต้องการ อีกทั้งยังลดการผลิตไฮโดรเจนและเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

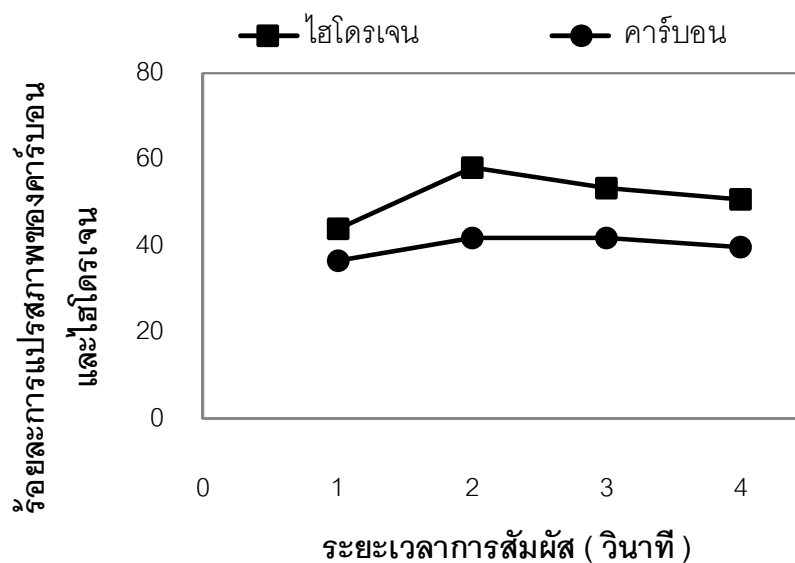
จากภาพที่ 4.27 แสดงค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้และค่า  $H_2/CO$  (Synthesis gas) จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน ค่าความร้อนต่ำลดลงเล็กน้อย อยู่ในช่วง 8.6-8.5 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเพิ่มขึ้น กลีเซอรอลสามารถแปรสภาพอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำได้ดีขึ้น ดังนั้นค่าความร้อนต่ำที่ได้จึงลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของ  $H_2/CO$  พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน ค่าที่ได้มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน จาก 4.35 เป็น 8.35 เนื่องมากจากการเพิ่มไอน้ำเข้าไปเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนและทำให้กลีเซอรอลสามารถแปรสภาพไปอยู่ในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้น แต่ทั้งนี้ก็ควรมีการคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ไปในการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำเข้าไปพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนน้ำให้กลายเป็นไอน้ำก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.27 ผลของค่าความร้อนต่ำและอัตราส่วนโดยโมลของ H<sub>2</sub>/CO ที่ได้จากการแปรผันอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

#### 4.4.3 ผลของระยะเวลาการสัมผัส (Contact time)

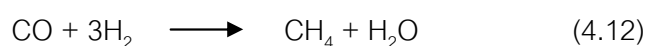
การทดลองนี้ศึกษาผลของระยะเวลาการสัมผัสของกลีเซอรอลและไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยใช้ท่ออะลูมินา อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน 1:1 โดยทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการสัมผัสที่ต่างกันคือ 1, 2, 3 และ 4 วินาที ระยะเวลาการสัมผัสที่ต่างกันทำได้โดยการลดอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนซึ่งเป็นแก๊สพา จากภาพที่ 4.28 พบว่าระยะเวลาสัมผัสที่ต่างกันจะมีผลต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ต่างกัน โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโดยการลดอัตราการไหลของแก๊สพา จาก 1 เป็น 2 วินาที การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสสูงขึ้นพบว่าการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์เริ่มคงที่ อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมินี้ความสามารถในการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลสูงสุดที่ 2 วินาที ถึงแม้จะเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสการสลายตัวของกลีเซอรอลก็ไม่เพิ่มขึ้น

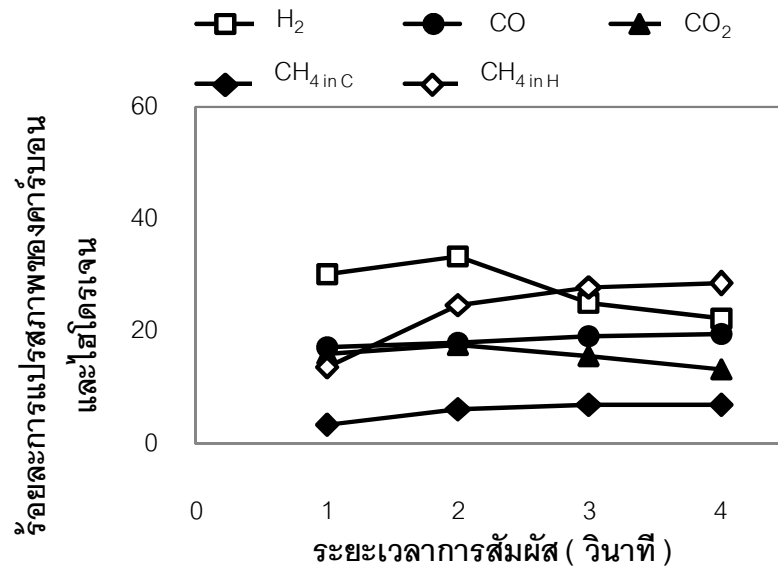


ภาพที่ 4.28 ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ท่ออะลูมินา

การทดลองส่วนนี้ใช้ท่ออะลูมินาเพื่อศึกษาการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.29 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัส จาก 1 เป็น 2 วินาที แก๊สผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น ทั้งแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เนื่องจากเมื่อระยะเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้น กลีเซอรอลและไอน้ำสามารถอยู่ในเตาปฏิกรณ์ได้นานขึ้น โอกาสที่จะเกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มวลโมเลกุลเบาว่าก็เพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสจาก 2 วินาที เป็น 3 วินาที และ 4 วินาที พบว่าการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และพบว่าการผลิตแก๊สไฮโดรเจนลดลงแต่แก๊สมีเทนกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากที่ระยะเวลามากเกินไปอาจเกิดปฏิกิริยาการสร้างมีเทน (methanation) ตามสมการที่ 4.12

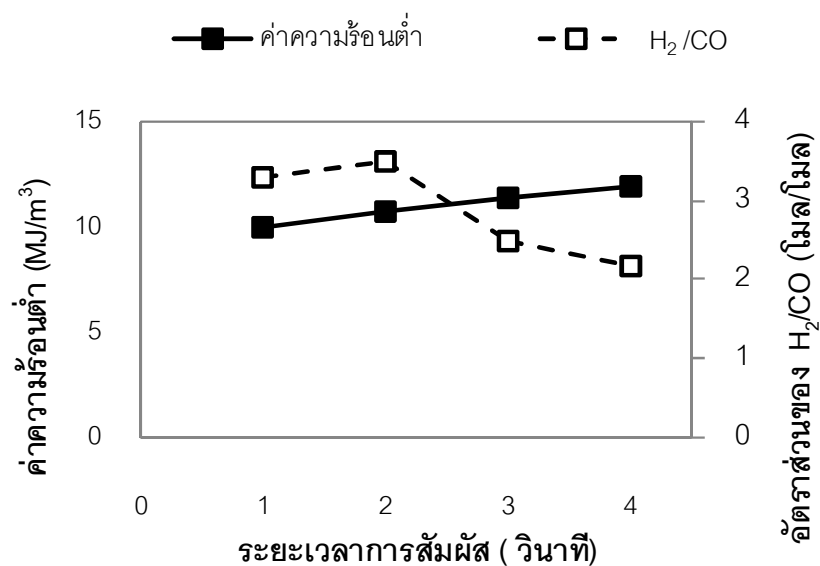
เมทานेशन (Methanation):





ภาพที่ 4.29 ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์

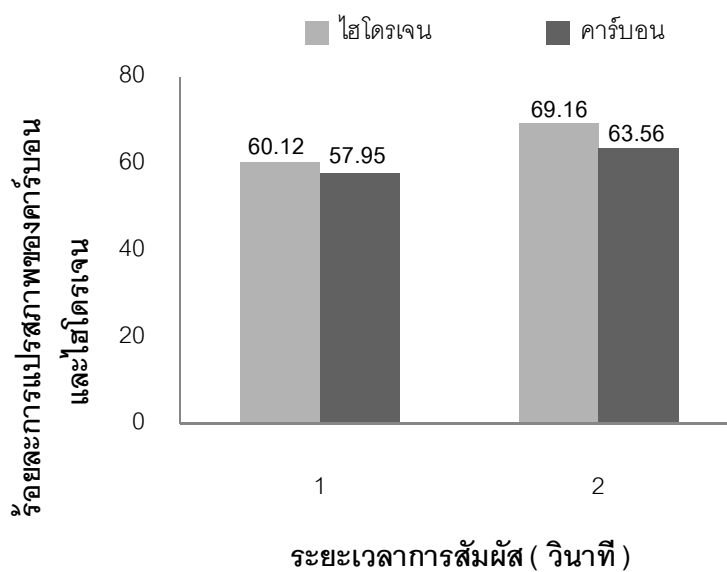
จากการทดลองผลของระยะเวลาการสัมผัสที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4.30 พบว่าให้ค่าความร้อนต่ำที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัส เนื่องจากการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ เช่น มีเทน ซึ่งมีค่าพลังงานสูง โดยมีเทนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มระยะเวลาการสัมผัส ทำให้ค่าความร้อนต่ำสูงขึ้นตามไปด้วยและจากการสังเกตอัตราส่วนของ H<sub>2</sub>/CO พบว่าที่ 2 วินาทีให้ค่า H<sub>2</sub>/CO สูงสุด มีค่าเท่ากับ 3.5 ซึ่งที่ 2 วินาทีนี้สามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงที่สุด



ภาพที่ 4.30 ผลของค่าความร้อนต่ำและอัตราส่วนโดยโมลของ H<sub>2</sub>/CO ที่ได้จากการแปรผันของระยะเวลาการสัมผัส ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

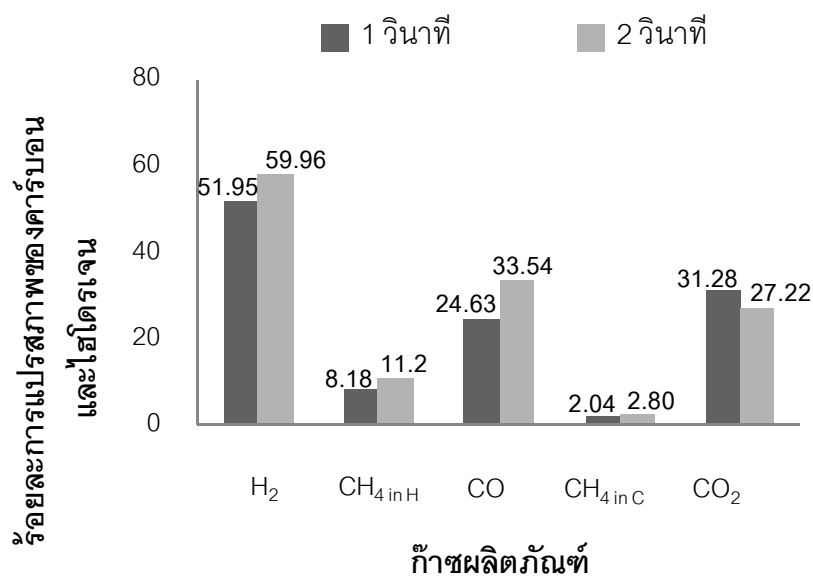
ผลของระยะเวลาการสัมผัสเมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการสัมผัส 1 และ 2 วินาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากภาพที่ 4.31 พบว่าการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัส โดยการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เมื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสจาก 1 วินาทีเป็น 2 วินาที ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน มีเทน และคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง





ภาพที่ 4.31 ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก

ซึ่งในการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า การกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ แก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนนั้น มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการสัมผัสซึ่งระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือ 2 วินาที ซึ่งเป็นสภาวะที่การแปรสภาพของไฮโดรเจนและคาร์บอนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์สูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.32



ภาพที่ 4.32 ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมปริมาณ ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก

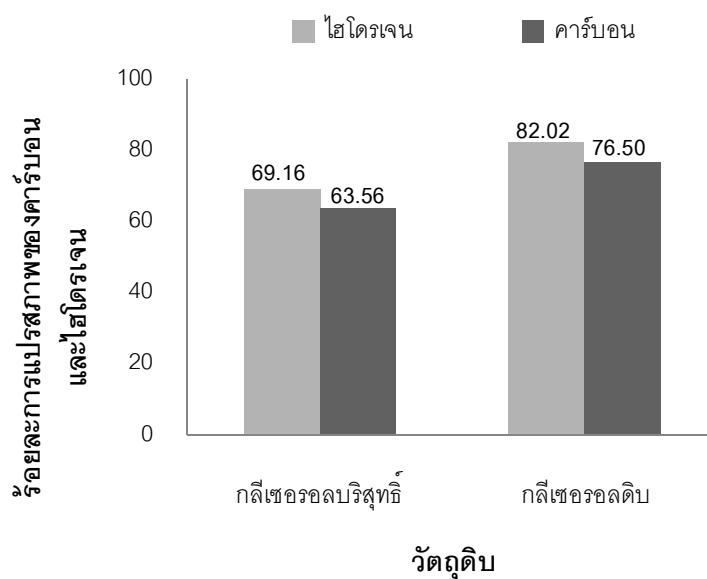
#### 4.4.4 การนำมาประยุกต์ใช้กับกลีเซอรอลดิบ

จากที่ได้กล่าวถึงความแตกต่างของกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบในเบื้องต้นแล้ว ทำให้ทราบว่าสิ่งเจือปนในกลีเซอรอลดิบนั้นมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเตาปฏิกรณ์ โดยจากการศึกษาเปรียบเทียบกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ระยะเวลาการสัมผัส 2 วินาที ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ด้วยจำนวนท่อตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ท่อ จากภาพที่ 4.33 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์กับกลีเซอรอลดิบ การแปรสภาพของกลีเซอรอลดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์มากกว่ากลีเซอรอลบริสุทธิ์อาจเนื่องมาจากในกลีเซอรอลดิบมีการปนเปื้อนสิ่งเจือปนต่างๆ เช่น เมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยา สบู่ ไขมัน น้ำมันบางส่วน และเอสเทอร์ ซึ่งล้วนเป็นสารอินทรีย์ที่มีธาตุประกอบพื้นฐานเป็น คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ซึ่งมีผลต่อการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และจากงานวิจัยอื่นๆ ได้แสดงถึงการปนเปื้อนของสิ่งเจือปนของสารต่างๆ จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งในกลีเซอรอลดิบนั้น จะมีกลีเซอรอลอยู่ประมาณ ร้อยละ 60-80 เมทานอล น้อยกว่าร้อยละ 31 น้ำ น้อยกว่าร้อยละ 15 และสารปนเปื้อนอื่นๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา (โซเดียม) น้อยกว่าร้อยละ 5 แสดงตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงการปนเปื้อนของกลีเซอรอลดิบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ

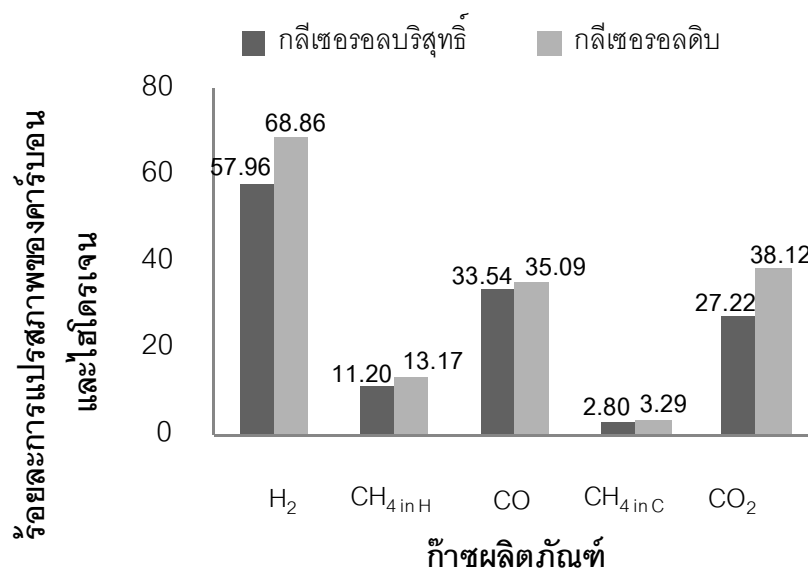
งานวิจัย	กลีเซอรอลดิบ (ร้อยละ)	เมทานอล (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	น้ำ (ร้อยละ)	สบู่ (โซเดียม) (ร้อยละ)
Slinn และคณะ (2008)	73	23	3.8	3.2	-
Valliyappan และคณะ (2008)	60	31	-	7.5	-
Dou และคณะ (2009)	70	< 15		< 15	< 5
Jude และคณะ (2010)	75	20.8	-	-	-
Yoon และคณะ (2010)	80	15	5	-	-

จากงานวิจัยของ Dou และคณะ, (2009) ที่ได้ทำการศึกษาการไพโรไลซิสของกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ ที่อุณหภูมิ 400 - 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 3 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $Ni/Al_2O_3$  ปริมาณ 5 กรัม พบว่าที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส การแปรสภาพของไฮโดรเจนในกลีเซอรอลบริสุทธิ์ไปอยู่ในรูปแก๊สไฮโดรเจน เท่ากับ ร้อยละ 63 92 และ 97 ตามลำดับ และการแปรสภาพของไฮโดรเจนในกลีเซอรอลดิบไปอยู่ในรูปแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ ร้อยละ 71 96 และ 100 ตามลำดับ โดยจากข้อมูลพบว่ากลีเซอรอลดิบสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้มากกว่า เนื่องจากในกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้มีสิ่งเจือปนต่างๆ เช่น น้ำและเมทานอล ซึ่งมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสของกลีเซอรอลดิบ ซึ่งการอธิบายกลไกของกระบวนการไพโรไลซิสกลีเซอรอลดิบนั้นจะค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากการปนเปื้อนของสารต่างๆ จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล



ภาพที่ 4.33 ผลของกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

ดังเช่นในงานวิจัยนี้ เมื่อทำการทดลองการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.34 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ พบว่าการกระจายของแก๊สผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรอลดิบสูงกว่ากลีเซอรอลบริสุทธิ์ ทั้งแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ซึ่งการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ในกลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นร้อยละ 57.96 33.54 27.22 และ 2.80 ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรอลดิบเป็นร้อยละ 68.86 35.08 38.12 และ 3.29 ตามลำดับ โดยเนื่องมาจากในกลีเซอรอลดิบมีการปนเปื้อนของสิ่งเจือปนต่างๆ ซึ่งมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าดังได้แสดงในตารางข้างต้น



ภาพที่ 4.34 ผลกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบต่อการกระจายตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์

#### 4.5 ผลของการเกิดคาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

การเกิดคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิ่ง เนื่องจากคาร์บอนจะปกคลุมพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง โดยคาร์บอนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทน และบูดูยาร์ด จากการวิเคราะห์หาคาร์บอนบนพื้นผิวในงานวิจัยนี้ได้แสดงดังตาราง 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงการวิเคราะห์คาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

วิธีวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์	ปริมาณที่สามารถวิเคราะห์ได้ (Detection Limit)
เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)	ไม่พบ	ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก
เทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลซิส (TGA)	ไม่พบ	ร้อยละ 0.1 มิลลิกรัม
วิธีเทมเปอร์เรเจอร์โปรแกรมนอกซีเดชัน (TPO)	ไม่พบ	ร้อยละ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของตัวเร่งปฏิกิริยา พบพีคของ แพลเลเดียมและอะลูมินา ซึ่งไม่พบพีคของธาตุชนิดอื่นๆ เช่น คาร์บอนที่เกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา อาจเนื่องมาจากปริมาณของคาร์บอนที่เกาะบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยมาก จนไม่สามารถตรวจวัดได้

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลซิส เป็นการวิเคราะห์การสูญเสีย น้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา หลังการใช้งานโดยวัดการสูญเสียของน้ำหนัก ที่ อุณหภูมิ 30-1000 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของออกซิเจน 60 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อศึกษาปริมาณของคาร์บอนที่ฝังตัวอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าไม่มีการสลายตัวของคาร์บอนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์ด้วยวิธีเทมเพอร์เรเจอร์โปรแกรมออกซิเดชัน ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนที่ฝังตัวอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศของออกซิเจนขณะที่มีการเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อดูตำแหน่งของคาร์บอนที่ฝังตัวบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาว่า เป็นตำแหน่งที่ใกล้กับอนุภาคของโลหะที่ใช้เป็นบริเวณกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยา หรือเกิดการฝังตัวของคาร์บอนบนตัวรองรับ ซึ่งคาร์บอนจะถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 100 ถึง 1000 องศาเซลเซียส จากการทดสอบไม่พบคาร์บอนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบท่อและนำตัวเร่งปฏิกิริยาแบบท่อเข้ามาใช้เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณผลผลิตของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ การทดลองถูกออกแบบให้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา ประสิทธิภาพ จำนวนท่อของตัวเร่งปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์ ระยะเวลาการสัมผัส และอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นนำมาประยุกต์ใช้กับกลีเซอรอลดิบ เพื่อเปรียบเทียบผลของการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมด้วยกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า พบว่าเมื่อเวลาการชุบเคลือบเพิ่มขึ้น จาก 120 เป็น 240 และ 360 นาที ปริมาณแพลเลเดียมที่เคลือบบนตัวรองรับอะลูมินาเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.2 โดยน้ำหนัก

5.1.2 จากการศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา จาก 600 เป็น 700 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่าจะได้ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมเพิ่มขึ้นที่ทุกสภาวะอุณหภูมิ โดยการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในกลีเซอรอลไปเป็น CO และ H<sub>2</sub> มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน CO<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> มีค่าลดลง ซึ่งอุณหภูมิที่ให้แก๊สผลิตภัณฑ์สูงสุดคือ 800 องศาเซลเซียส

5.1.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา พบว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าที่ ร้อยละ 0.5 และ 1.2 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการใช้ซ้ำ 4 รอบ ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลงของแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงเพียงเล็กน้อย และจากการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าค่อนข้างมีความเสถียร

5.1.4 ความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่เข้าเตาปฏิกรณ์จะมีผลกับการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยพบว่าที่ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม การผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าที่ 5000 พีพีเอ็ม แต่ที่ความเข้มข้นของกลีเซอรอล 2500 พีพีเอ็ม การผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกมาค่อนข้างไม่มีความเสถียร เนื่องจากที่ความเข้มข้นน้อยๆ การไหลของวัตถุดิบหรือสารระเหยไม่เต็มท่อเกิดช่องว่างขึ้น ทำให้การไหลของแก๊สไม่สม่ำเสมอ

5.1.5 เมื่อลดจำนวนท่อตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า การผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ก็ลดลงเช่นกัน แต่เนื่องจากจากแพลเลเดียมมีราคาค่อนข้างสูง จึงลดจำนวนท่อของตัวเร่งปฏิกิริยาเหลือเพียง 4 ท่อ และพบว่าปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ยังคงสามารถผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ได้สูงที่สุด

5.1.6 ผลของระยะเวลาการสัมผัสที่ 2 วินาที ให้ผลที่ดีกว่า 1 3 และ 4 วินาที โดยสามารถผลิตไฮโดรเจนและแก๊สผลิตภัณฑ์ได้สูงสุด และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสพบว่าแก๊ส  $\text{CH}_4$  ที่ได้เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการสร้างมีเทน (methanation)

5.1.7 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้สูงขึ้น เนื่องจากไอน้ำจะช่วยในการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นการเพิ่มไอน้ำยังมีส่วนช่วยให้ค่าแก๊สสังเคราะห์และการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอีกด้วย

5.1.8 การนำกลีเซอรอลดิบมาประยุกต์ใช้ในการทดลอง โดยใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสัมผัส 2 วินาที อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ที่ปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก พบว่าการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ เนื่องจากในกลีเซอรอลมีการปนเปื้อนของสารต่างๆ ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาได้

5.1.9 จากผลการวิเคราะห์การเกิดคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยวิธีเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) เทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลซิส (TGA) และวิธีเทมเพอร์เรเจอร์โปรแกรมออกซิเดชัน (TPO) ไม่พบคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นสาเหตุการเสื่อมสภาพ ซึ่งทำให้การเร่งปฏิกิริยาลดลง



## 5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเตาปฏิกรณ์

5.2.1 ควรใช้ท่อส่งกลีเซอรอลเข้าสู่ระบบที่เป็นชนวนความร้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น ควรใช้เทปความร้อน (Heating tape) พันตลอดทั้งระบบเพื่อรักษาความร้อนป้องกันการอุดตันของกลีเซอรอลในระบบ

5.2.2 ควรออกแบบระบบป้อนวัตถุดิบให้สามารถป้อนวัตถุดิบเข้าระบบได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น เช่น การใช้ระบบแบบปั๊มสุบแบบรีดน้ำ (Peristaltic pump)

5.2.3 ก่อนการทำการทดลอง ควรตรวจสอบข้อต่อทุกจุดทั้งระบบ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของแก๊สตามระบบข้อต่อ

## 5.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการดำเนินปฏิกิริยา

5.3.1 ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบท่อ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีความจำเป็นในการศึกษาปรับปรุงความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยา เทคนิคการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังวิธีอื่นๆ เพื่อให้มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น อีกทั้งสามารถลดต้นทุนและระยะเวลาในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมในการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปบำบัด (Regenerate) โดยการเผาไล่คาร์บอนที่อยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

5.3.2 การศึกษานี้เป็นการศึกษาในเบื้องต้น เพื่อดูความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบท่อ ซึ่งในอนาคตควรมีการนำไปพัฒนาเพื่อนำไปเป็นการเร่งปฏิกิริยาและแยกแก๊สไฮโดรเจนออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์อื่นๆ ในขั้นตอนเดียวกัน

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2550. แผนปฏิบัติการการ พัฒนาและส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซล(ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=351> . [2552, ตุลาคม 11]
- กระทรวงพลังงาน. 2550. การส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซล (Bio-Diesel) (ออนไลน์). ที่มา: <http://www.energy.go.th/MOEN/Index.aspx?MenuID=60>. [2552, พฤศจิกายน 10]
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2551. องค์ประกอบของชีวมวลที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.efe.or.th>. [2551, กันยายน 26]
- วสิน กาจนภู. 2545. การทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์จากแก๊สสังเคราะห์โดยวอเตอร์แก๊สชิฟต์และตัว ดูดซับทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิต วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. คะตะไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส หลักการทฤษฎีและการประยุกต์. โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์ : จุฬาลงกรณ์, 2534.
- สิทธิ์ศักดิ์ อุบวิวงศ์. 2535. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ของเตาไพโรไลซิส แบบไหลขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุพัตรา ชีวธนาคุปต์. 2546. แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สซิฟิเคชันของยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2550. องค์ประกอบของชีวมวลที่มีผลต่อ การผลิตไฟฟ้า (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.efe.or.th>. [2553, กันยายน 30]
- อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. 2538. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากแกลบในเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

## ภาษาอังกฤษ

- Adhikari, S., Fernando, S., and Haryanto, A. 2007. Production of hydrogen by steam reforming of glycerin over alumina-supported metal catalysts. Catalysis Today. 129: 355-364.
- Adhikari, S., Fernando, S., and Haryanto, A. 2008. Hydrogen production from glycerin by steam reforming over nickel catalysts. Renewable energy. 33:1097-1100..
- Basile, A., Gallucci, F., and Tosti, S. 2008. Inorganic Membranes: Synthesis, Characterization and Applications. USA: Elsevier Science.
- Breag, G.R., and Chittenden, A.E. 1982. Public of Tropical Product Institute. USA: McGraw-Hill.
- Chen, G., Andries, J., and Spliethoff, H. 2003. Catalytic pyrolysis of biomass hydrogen rich fuel gas production. Energy Conversion and Management. 44:2289-2296.
- Dou, B., Dupont, V., Williams, P.T., Chen, H., and Ding, Y. 2009. Thermogravimetric kinetics of crude glycerol. Bioresource Technology. 100:2613-2620.
- Franco, C., Pinto, F., Ramiro, A., and Gonzalez, J.F. 1998. The study of reaction influencing the biomass steam gasification process. Fule Process Technology. 55: 835-842.
- Fukuhara, C., Kamata, Y., and Igarashi, A. 2007. Catalytic performance of plate-type Pd/Zn-based catalysts for steam reforming of methanol, prepared by electroless plating. Applied Catalysis A: General. 330: 108-116.
- Geldart, D. 1986. Gas fluidization Technology. New York: John Wiley & Sons.
- Hirai, T., Ikenaga, N-O., Miyake, T., and Suzuki, T. 2005. Production of Hydrogen by Steam Reforming of Glycerol on Ruthenium Catalyst. Journal of Energy and Fuel. 19:1761-1762.
- Jon, V.G. 2005. Biodiesel processing and production. Fule Processing Technology. 86: 1097-1107
- Jude, A.O., and Paul, T.W. 2010. Hydrothermal reforming of bio-diesel plant waste: Product distribution and characterization. Fule. 89:501-509.

- Knoef, H.A.M. 2005. Handbook Biomass Gasification. The Netherlands: BTG biomass technology group BV.
- Laminine, J., and Dick, A. 2000. Fuel cell System Explained. UK: John Wiley & Sons.
- Luciene, P.R.P, Edson, A.T., and Elisabete, M.A. 2009. Production of hydrogen via steam reforming of biofuels on Ni/CeO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts promoted by noble metals. International Journal of Hydrogen Energy. 34: 5049-5060.
- Luo, N., Fu, X., Cao, F., Xiao, T., and Edwards P,P. 2008. Glycerol aqueous phase reforming for hydrogen generation over Pt catalyst – Effect of catalyst composition and reaction conditions. Fuel. 87: 3483-3489.
- Miller-Klein. 2006. Impact of Biodiesel Production on the Glycerol Market. Miller-Klein Associates October 2006:1-6.
- Olofsson, I., Nordin, A., and Söderlind, U. 2005. Initial Review and Evaluation of Process Technologies and Systems Suitable for Cost-Efficient Medium-Scale Gasification for Biomass to Liquid Fuels. Energy Technology & Thermal Process Chemistry, University of Umeå.
- Ooi, T.L., Yong, K.C., Wanyunus, W.M.Z., Hazimah, A.H., and Dzulkefly, K. 2001. Characterization of Glycerol residue from a palm kernel oil Methyl Ester plant. Journal of Oil palm Research. 13: 1-6.
- Prostein, R.F., and Hicks, R.E. 1982. Synthesis Fuels. USA: McGraw-Hill.
- Rossi, C.C.R.S., Alonso, C.G., Antunes, O.A.C., Guirardello, R., and Cardozo-Filho. L. 2009. Thermodynamic analysis of steam reforming of ethanol and glycerine for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. 34: 323-332.
- Sanchez, E.A., D'Angelo, M.A.D., and Comelli, R.A. 2010. Hydrogen production from glycerol on Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. 35:5902-5907. International Journal of Hydrogen Energy. 35:5902-5907.
- Satterfield, C.N. 1993. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. Singapore: McGraw-Hill.
- Slinn, M., Kendall, K., Mallon, C., and Andrew, J. 2008. Steam reforming of biodiesel by-product to make renewable hydrogen. Journal of Bioresource Technology. 99:5851-5858.

- Stora Enso. 2009. Carbon cycle of the forest products industry [online]. Available from: <http://www.storaenso.com/sustainability/performance/sustainability-targets/Pages/carboncycle.aspx>. [2009, November 24].
- Tanaka, D.A.P., Tanco, M.A.L., Niwa, S.I., Wakui, Y., Mizukami, F., Namba, T., and Suzuki, T.M. 2005. Preparation of palladium and silver alloy membrane on a porous  $\alpha$ -alumina tube via simultaneous electroless plating. Journal of Membrane Science. 247:21-27.
- Thunman, H., Niklasson, F., Johnson, F., and Leckner, B. 2001. Composition of volatile gases and thermochemical properties of wood for modelling of fixed or fluidized beds. Energy & Fuel. 15: 1488-1497.
- Vagia, E.Ch. and Lemonidou, A.A. 2008. Hydrogen production via steam reforming of bio-oil components over calcium aluminate supported nickel and noble metal catalysts. Applied Catalysis A: General. 351:111-121.
- Valliyappan, T., Ferdous, D., Bakhsi, N.N., and Dalai, A.K. 2008. Production of hydrogen and syngas via steam gasification of glycerol in a fixed-bed reactor. Top Catal. 49: 59-67.
- Volken, H.K. 1979. Chemical Industrial. USA: McGraw-Hill.
- Yoon, S.J., Choi, Y.Ch., Son, Y.I., Lee, S.H., and Lee, J.G. 2010. Gasification of biodiesel by-product with air or oxygen to make syngas. Bioresource Technology. 101:1227-1232.
- Zhang, B., Tang, X., Li, Y.Xu.Y., and Shen, W. 2007. Hydrogen production from steam reforming of ethanol and glycerol over ceria-supported metal catalysts. International Journal of Hydrogen Energy. 32: 2367-2373.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟ

## วิธีการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้นั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

โดยแก๊สโครมาโตกราฟีมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. แก๊สพา (Carrier gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (Flow Controller)
3. ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injector port)
4. คอลัมน์ (Column)
5. ดีเทคเตอร์ (Detector)
6. เครื่องบันทึก (Recorder)

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1. แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติคือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำมีการแพร่กระจายดี มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน แก๊สฮีเลียม และแก๊สไนโตรเจน



## 2. คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคทาง GC เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วนๆ ดังนั้นโครมาโตแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์มาก

## 3. ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือ เครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถให้สัญญาณกับสารต่างๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของการใช้งาน

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

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

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

### ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาจากแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้อุ่นด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์แล้ว ดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับ

กระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

### ดีเทคเตอร์แบบ FID

ดีเทคเตอร์แบบ FID เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการตรวจสอบหาสารประกอบอินทรีย์ แก๊สไฮโดรเจนจะถูกจุดให้ติดไปด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า (Heater) ที่อยู่บริเวณใกล้ๆ กับ Flame Jet ส่วนอากาศที่ผ่านเข้าไปนั้นจะทำหน้าที่ 2 อย่างคือ ช่วยเผาไหม้แก๊สไฮโดรเจน และช่วยพาแก๊สที่เผาไหม้ออกไป แก๊สพาและสารตัวอย่างที่ออกมาจากคอลัมน์จะเข้าสู่เปลวไฟ จะทำให้สารเหล่านี้เกิดไอออนไนเซชันได้เป็นอิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังอิเล็กโตรมิเตอร์ และบันทึกสัญญาณด้วยเครื่องบันทึกได้เป็นโครมาโทแกรม

#### 1) เมทาไนเซอร์ (Methanizer)

เป็นเครื่องสำหรับการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปแก๊สมีเทนด้วยแก๊สไฮโดรเจน เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์แก๊สทั้งสองในระดับปริมาณพีพีเอ็ม ในดีเทคเตอร์แบบ FID ได้โดยภายในจะเกิดปฏิกิริยาเมทาไนเซชัน มีโคบอลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่

ภาคผนวก ก-2 แสดงภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส

แก๊สพา	อาร์กอน 99.99%
อุณหภูมิอินเจคเตอร์	50 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์	50 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิดีเทคเตอร์	
(TCD)	130 องศาเซลเซียส
(FID)	380 องศาเซลเซียส
คอลัมน์	Molecular sieve
	Hayesep

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยท่ออะลูมินา อัตราส่วน  
ไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> in H	CO	CH <sub>4</sub> in C	CO <sub>2</sub>	H	C
10	1.69	6.90	0.96	1.72	4.80	8.58	13.42
20	2.24	7.47	0.53	1.87	5.00	9.71	14.34
30	5.04	6.80	1.11	1.70	5.23	11.84	13.73
40	13.39	12.85	1.32	2.00	6.05	26.24	20.90
50	12.91	12.84	3.19	1.00	5.73	25.75	19.57
80	16.48	12.53	11.70	3.13	10.63	29.01	26.29
100	16.67	11.63	17.58	2.91	10.26	28.30	24.79
120	14.11	9.12	13.79	2.28	10.89	23.23	22.29
150	20.53	10.20	18.28	2.55	9.42	30.73	22.17
180	15.51	18.47	10.42	4.62	10.84	33.98	33.93
210	20.73	12.37	12.08	3.09	9.27	33.09	24.73
240	17.19	13.02	10.03	3.26	12.68	30.21	28.96
270	23.04	11.59	14.21	2.90	10.89	34.63	25.38
300	16.75	13.11	12.73	3.28	12.03	29.86	28.41
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	17.89 $\pm 2.89$	12.60 $\pm 2.61$	13.42 $\pm 2.90$	3.11 $\pm 0.65$	10.22 $\pm 1.1$	30.49 $\pm 3.47$	26.75 $\pm 3.68$

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยอะลูมินา อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> in H	CO	CH <sub>4</sub> in C	CO <sub>2</sub>	H	C
10	10.97	7.76	1.33	1.94	5.84	18.72	9.11
20	16.28	13.53	10.90	3.38	19.68	29.81	33.96
30	7.82	7.71	3.83	1.93	8.28	15.53	14.04
40	6.03	6.08	4.17	1.52	8.96	12.12	14.65
50	5.67	7.65	5.14	1.91	10.57	13.32	17.63
60	10.22	7.95	5.91	1.99	12.44	18.17	20.34
80	23.95	17.67	12.22	3.85	18.04	41.62	34.11
100	22.68	10.37	18.80	2.59	18.16	33.05	39.55
120	19.50	8.30	11.22	2.07	10.76	27.79	24.06
150	22.51	9.15	15.90	2.29	17.06	31.66	35.24
180	21.97	7.19	8.56	3.80	12.26	29.16	24.62
210	22.14	8.28	19.13	2.07	18.53	30.42	39.73
240	19.57	11.93	11.61	2.98	11.42	31.50	26.01
270	20.89	12.46	11.22	3.11	10.91	33.35	25.25
300	15.44	11.70	14.35	2.93	15.95	27.14	33.23
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	20.96 ± 2.53	11.92 ± 3.17	13.66 ± 3.64	2.98 ± 0.67	14.79 ± 3.38	32.88 ± 4.29	31.43 ± 6.40

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยอะลูมินา อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> in H	CO	CH <sub>4</sub> in C	CO <sub>2</sub>	H	C
10	6.15	0.86	0.00	0.22	6.10	7.01	6.32
20	3.94	1.30	23.51	0.33	5.99	5.24	29.83
30	4.32	25.76	36.83	6.44	30.86	30.08	74.13
40	6.11	52.71	42.45	13.18	11.61	58.83	67.23
50	34.66	19.54	26.55	4.88	25.64	54.20	57.08
60	23.71	12.20	18.40	3.05	15.10	35.90	36.55
80	28.70	20.00	31.09	3.67	13.81	48.70	48.57
100	35.91	8.92	12.66	2.23	14.82	44.83	29.72
120	26.66	4.43	28.08	3.11	8.25	31.10	39.43
150	25.24	8.08	25.43	2.02	20.55	33.32	48.00
180	34.17	11.56	16.68	2.89	13.64	45.73	33.21
210	22.37	5.82	20.82	3.45	18.61	28.19	42.88
240	36.59	19.17	31.05	4.79	18.73	55.76	54.58
270	40.58	11.96	22.53	2.99	8.94	52.53	34.46
300	35.69	12.00	24.18	5.71	29.30	47.69	59.19
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	31.77 ± 6.18	13.72 ± 5.38	21.04 ± 6.24	3.43 ± 1.18	16.29 ± 6.09	45.49 ± 9.83	40.76 ± 10.06

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักจำนวน 7 ท่ออัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	24.05	2.76	0.00	0.69	6.41	26.81	7.10
20	19.63	1.26	0.18	0.32	6.30	20.90	6.80
30	17.34	2.57	0.00	0.64	4.47	19.91	5.11
40	17.21	5.33	2.36	1.33	7.67	22.55	11.36
50	19.20	5.99	12.13	1.50	6.61	25.19	20.25
60	33.09	12.13	12.31	3.03	10.18	45.21	25.52
80	24.44	10.31	6.17	2.58	6.60	34.75	15.35
100	58.57	6.59	17.26	1.65	8.62	65.17	27.52
120	61.12	17.45	35.87	4.36	26.80	78.57	67.03
150	57.48	7.82	33.23	1.95	22.66	65.30	57.85
180	59.83	7.82	31.93	1.95	15.21	67.64	49.10
210	58.30	8.05	34.94	2.01	22.03	66.35	58.99
240	57.77	13.54	43.21	3.38	24.20	71.31	70.79
270	58.72	11.59	22.32	2.90	12.40	70.31	37.61
300	58.53	7.01	38.73	1.75	23.56	65.54	64.04
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	54.97 $\pm 11.50$	10.02 $\pm 3.61$	29.30 $\pm 11.77$	2.51 $\pm 0.90$	18.01 $\pm 7.43$	64.99 $\pm 12.13$	49.81 $\pm 19.11$

ตารางที่ ๗-5 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (รอบที่ 1) จำนวน 7 ท่ออัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	21.27	1.06	0.00	0.27	5.91	22.33	6.17
20	28.29	1.85	15.34	0.46	13.87	30.14	29.67
30	27.47	2.89	14.90	0.72	11.33	30.36	26.96
40	31.32	3.67	6.33	0.92	5.41	34.98	12.66
50	47.32	1.87	12.90	0.47	4.85	49.18	18.21
60	30.63	1.37	13.24	0.34	11.17	31.99	24.76
80	36.77	1.31	27.44	0.33	10.00	38.08	37.77
100	71.25	2.64	35.17	0.66	41.97	73.89	77.79
120	72.89	1.98	36.02	0.50	37.73	74.87	74.25
150	62.40	2.30	20.08	0.57	33.98	64.69	54.63
180	78.04	3.81	37.34	0.95	39.35	81.85	77.64
210	92.11	3.54	44.58	0.89	34.78	95.65	80.25
240	88.81	2.86	38.89	0.71	38.14	91.67	77.74
270	85.31	2.74	46.84	0.69	43.78	88.05	91.31
300	78.22	1.56	38.98	0.39	39.50	79.77	78.86
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	73.98 $\pm 9.87$	2.53 $\pm 0.84$	36.14 $\pm 8.20$	0.63 $\pm 0.21$	35.47 $\pm 3.30$	76.50 $\pm 10.24$	72.24 $\pm 10.19$



ตารางที่ ข-6 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (รอบที่ 2) จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> in H	CO	CH <sub>4</sub> in C	CO <sub>2</sub>	H	C
10	0.68	0.66	0.00	0.17	18.42	1.3419	18.59
20	0.57	1.14	0.29	0.28	24.40	1.7081	24.98
30	1.09	5.89	3.52	1.47	42.47	6.9755	47.46
40	2.35	5.85	11.30	1.46	22.57	8.1979	35.34
50	1.91	6.34	5.68	1.58	49.25	8.2478	56.52
60	5.22	5.90	16.19	1.47	36.94	11.1131	54.61
80	72.92	6.23	27.59	1.56	38.06	79.1481	67.21
100	75.97	6.13	29.20	1.53	43.36	82.1022	74.09
120	61.71	6.19	29.38	1.55	44.17	67.9029	75.09
150	71.58	6.75	32.24	1.69	34.46	78.3293	68.39
180	63.45	6.66	24.18	1.66	24.01	70.1082	49.86
210	67.92	2.51	36.28	0.63	31.12	70.4288	68.03
240	65.74	2.12	36.03	0.53	39.46	67.8586	76.02
270	72.43	2.56	44.24	0.64	42.11	74.9910	86.99
300	61.97	2.36	49.67	0.59	37.82	64.3292	88.08
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	68.19 $\pm 5.26$	4.61 $\pm 2.12$	34.31 $\pm 8.24$	1.15 $\pm 0.53$	37.17 $\pm 6.47$	72.80 $\pm 6.07$	72.64 $\pm 11.47$

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (รอบที่ 3) จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	54.87	1.48	13.00	0.37	17.03	56.35	30.40
20	41.83	1.01	12.34	0.25	12.54	42.84	25.13
30	23.07	0.84	6.70	0.21	5.65	23.91	12.56
40	32.12	1.57	6.52	0.39	6.14	33.69	13.05
50	87.95	3.51	9.44	0.88	42.13	91.46	52.45
60	46.72	4.78	44.49	1.19	57.05	51.50	102.74
80	59.65	3.15	32.80	0.79	26.50	62.80	60.08
100	79.41	4.22	41.25	1.05	21.68	83.63	63.98
120	49.78	6.88	34.81	1.72	24.32	56.66	60.85
150	56.63	6.48	32.30	1.62	18.69	63.11	52.61
180	59.70	6.63	18.63	1.66	29.34	66.33	49.63
210	58.70	2.96	27.95	0.74	41.90	61.66	70.58
240	68.76	1.45	23.92	0.36	14.25	70.21	38.52
270	68.54	0.91	16.91	0.23	25.10	69.45	42.23
300	55.29	1.01	19.20	0.25	27.09	56.30	46.54
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	61.72 $\pm 8.92$	3.74 $\pm 2.44$	27.57 $\pm 8.41$	0.94 $\pm 0.61$	25.43 $\pm 7.72$	65.46 $\pm 8.35$	53.93 $\pm 10.68$

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (รอบที่ 4) จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	0.85	0.37	0.00	0.09	5.32	1.22	5.41
20	2.06	0.68	1.54	0.17	7.02	2.74	8.73
30	2.57	0.78	4.90	0.20	14.13	3.35	19.22
40	5.01	0.78	13.34	0.20	13.72	5.80	27.26
50	5.77	1.34	12.43	0.34	30.49	7.11	43.26
60	6.01	2.78	8.20	0.69	7.39	8.79	16.28
80	40.59	1.88	21.32	0.47	33.93	42.47	55.72
100	35.89	1.54	23.03	0.38	23.21	37.43	46.63
120	34.32	1.96	30.39	0.49	25.65	36.28	56.53
150	39.07	6.01	26.19	1.50	21.17	45.08	48.86
180	48.82	6.77	26.46	1.69	25.96	55.59	54.11
210	42.87	6.22	20.58	1.56	24.15	49.09	46.28
240	43.96	1.79	29.47	0.45	23.33	45.75	53.24
270	27.36	0.93	16.69	0.23	29.43	28.29	46.35
300	53.42	3.24	43.95	0.81	36.29	56.66	81.05
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	40.70 $\pm 7.81$	3.37 $\pm 2.31$	26.45 $\pm 7.90$	0.84 $\pm 0.58$	27.01 $\pm 5.16$	44.07 $\pm 9.20$	54.31 $\pm 10.84$

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	15.96	0.24	3.26	0.06	6.96	16.20	10.28
20	26.78	3.62	44.72	0.91	23.48	30.40	69.11
30	40.85	12.46	30.90	3.11	34.34	53.31	68.36
40	50.91	10.51	52.25	2.63	25.00	61.42	79.87
50	67.11	10.84	50.55	2.71	30.28	77.94	83.54
60	48.01	10.64	51.86	2.66	28.64	58.65	83.16
80	46.91	6.82	35.58	1.70	19.20	53.72	56.49
100	56.54	7.76	37.76	1.94	21.91	64.30	61.61
120	71.85	7.28	35.89	1.82	14.85	79.13	52.56
150	69.86	3.15	40.30	0.79	9.04	73.01	50.13
180	76.72	9.34	40.91	2.34	14.68	86.06	57.93
210	66.96	12.76	52.32	3.19	27.19	79.72	82.70
240	62.20	9.90	50.43	2.48	22.67	72.10	75.58
270	74.62	12.79	53.34	3.20	29.02	87.41	85.56
300	81.25	11.21	44.75	2.80	26.37	92.46	73.92
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	62.71 $\pm 10.73$	9.00 $\pm 3.12$	41.29 $\pm 7.02$	2.25 $\pm 0.78$	20.55 $\pm 6.68$	71.72 $\pm 12.15$	62.71 $\pm 13.34$

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก (รอบที่1) จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	20.22	1.49	21.33	0.37	9.58	21.71	31.28
20	89.69	4.00	3.90	1.00	21.76	93.69	26.67
30	57.80	3.27	1.55	0.82	4.56	61.07	6.93
40	56.99	1.89	41.77	0.47	74.89	58.88	117.13
50	63.64	4.35	29.96	1.09	35.73	67.98	66.78
60	65.74	1.56	8.52	0.39	18.46	67.31	27.36
80	80.14	1.85	37.98	0.46	37.69	81.99	76.13
100	82.36	1.57	51.43	0.39	44.21	83.93	96.03
120	81.65	2.57	50.52	0.64	58.52	84.22	109.68
150	83.71	2.30	34.19	0.58	57.08	86.01	91.84
180	73.27	2.55	35.79	0.64	54.51	75.82	90.94
210	95.04	2.75	33.57	0.69	60.27	97.79	94.52
240	97.12	2.65	37.26	0.66	54.95	99.77	92.88
270	79.09	2.41	34.57	0.60	59.52	81.49	94.70
300	86.64	2.26	27.17	0.57	67.44	88.90	95.18
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	84.34 $\pm 7.60$	2.32 $\pm 0.39$	38.06 $\pm 7.95$	0.58 $\pm 0.10$	54.91 $\pm 8.92$	86.66 $\pm 7.75$	93.55 $\pm 8.55$

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก (รอบที่2) จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	13.27	1.63	7.31	0.41	39.04	14.90	46.76
20	17.65	4.67	43.23	1.17	85.41	22.31	129.81
30	17.34	2.51	24.26	0.63	59.19	19.85	84.07
40	34.43	2.40	19.30	0.60	50.52	36.83	70.42
50	26.51	1.98	19.89	0.50	48.09	28.49	68.48
60	26.51	2.21	21.18	0.55	50.80	28.72	72.54
80	63.76	2.36	25.28	0.59	58.24	66.12	84.11
100	81.29	2.51	33.34	0.63	54.36	83.79	88.33
120	82.62	6.43	26.86	1.61	56.58	89.05	85.05
150	74.07	2.58	30.49	0.64	46.94	76.65	78.07
180	73.34	6.45	22.07	1.61	41.34	79.79	65.03
210	82.47	2.11	38.21	0.53	58.04	84.58	96.77
240	94.92	2.17	47.49	0.54	63.26	97.09	98.29
270	86.84	2.27	40.98	0.57	51.10	89.11	92.64
300	91.86	1.97	43.99	0.49	50.14	93.84	94.62
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	81.24 $\pm 9.71$	3.21 $\pm 1.85$	34.30 $\pm 8.87$	0.80 $\pm 0.46$	53.33 $\pm 6.67$	84.45 $\pm 9.42$	88.44 $\pm 10.54$

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก (รอบที่3) จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	5.95	1.46	21.69	0.36	89.42	7.41	97.32
20	4.77	0.80	13.56	0.20	78.11	5.57	91.87
30	7.82	1.43	21.88	0.36	79.49	9.25	101.73
40	31.85	2.88	49.46	0.72	86.08	34.73	136.26
50	16.01	1.67	26.71	0.42	85.15	17.68	112.28
60	85.49	3.22	75.75	0.80	71.78	88.71	148.34
80	80.13	2.20	37.67	0.55	41.30	82.33	79.52
100	91.87	1.67	31.30	0.42	51.17	93.54	82.88
120	81.43	2.45	28.00	0.61	52.93	83.88	81.55
150	86.25	2.23	40.03	0.56	57.73	88.48	98.32
180	78.43	1.71	31.66	0.43	55.82	80.14	87.91
210	64.77	2.17	39.04	0.54	42.56	66.94	82.14
240	64.69	2.15	23.32	0.54	53.32	66.84	77.18
270	72.21	1.04	22.46	0.26	59.80	73.25	82.52
300	67.69	0.86	31.46	0.22	47.82	68.56	79.50
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	76.39 $\pm 9.65$	1.83 $\pm 0.56$	31.66 $\pm 6.41$	0.46 $\pm 0.14$	51.41 $\pm 5.93$	78.22 $\pm 9.80$	83.52 $\pm 8.02$

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก (รอบที่4) จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	5.71	0.56	2.20	0.14	8.66	6.27	11.01
20	3.18	0.95	1.34	0.24	6.28	4.13	7.86
30	5.41	1.73	16.45	0.43	5.82	7.14	22.71
40	29.81	2.89	30.63	0.72	82.69	32.71	114.05
50	23.47	1.39	23.79	0.35	68.77	24.87	92.90
60	30.86	1.83	28.54	0.46	80.44	32.69	109.44
80	75.37	2.76	29.74	0.69	46.67	78.13	77.10
100	67.62	2.73	24.21	0.68	49.27	70.35	74.17
120	78.92	2.54	20.79	0.64	32.86	81.46	54.28
150	77.35	2.47	23.06	0.62	48.48	79.82	72.16
180	81.91	2.21	33.76	0.55	56.46	84.12	90.78
210	74.81	3.15	32.12	0.79	56.89	77.96	89.79
240	61.29	2.01	36.76	0.50	53.15	63.30	90.42
270	57.58	2.42	28.28	0.60	60.39	60.00	89.27
300	87.59	1.86	34.88	0.46	53.21	89.45	88.55
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	73.60 $\pm 9.72$	2.46 $\pm 0.40$	29.29 $\pm 5.62$	0.62 $\pm 0.10$	50.82 $\pm 8.05$	76.07 $\pm 9.67$	80.72 $\pm 10.45$



ตารางที่ ข-14 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> in H	CO	CH <sub>4</sub> in C	CO <sub>2</sub>	H	C
10	2.37	1.98	4.63	0.50	6.89	4.35	12.01
20	2.72	2.31	4.86	0.58	6.83	5.03	12.26
30	5.65	2.14	4.76	0.54	6.42	7.80	11.72
40	22.72	5.08	3.84	1.27	6.76	27.80	11.87
50	34.68	20.06	12.77	5.02	29.39	54.74	47.18
60	34.19	30.21	15.87	7.55	31.44	64.40	54.86
80	49.01	14.74	36.64	3.69	19.23	63.75	59.55
100	47.99	9.06	17.55	2.27	8.57	57.05	28.38
120	42.75	15.75	36.94	3.94	20.41	58.50	61.29
150	37.29	9.55	14.31	2.39	8.62	46.84	25.32
180	50.43	10.00	19.15	2.50	10.56	60.43	32.21
210	42.75	15.33	35.24	3.83	13.06	58.08	52.13
240	31.40	12.86	27.77	3.21	11.62	44.26	42.60
270	23.72	15.15	29.88	3.79	11.97	38.88	45.63
300	26.68	5.11	8.82	1.28	8.20	31.79	18.30
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	39.11 $\pm 9.91$	11.95 $\pm 3.70$	25.14 $\pm 10.49$	2.99 $\pm 0.92$	12.47 $\pm 4.50$	51.06 $\pm 11.03$	40.60 $\pm 15.41$

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	11.74	0.86	11.74	0.22	6.75	12.10	18.70
20	12.55	1.30	12.55	0.33	7.23	16.48	20.10
30	11.94	25.76	11.94	6.44	53.06	90.63	71.44
40	52.88	52.71	52.88	13.18	32.21	96.10	98.27
50	22.01	19.54	22.01	4.88	12.82	46.40	39.72
60	26.02	12.20	26.02	3.05	15.41	52.90	44.48
80	25.19	14.68	25.19	3.67	14.88	39.91	43.74
100	40.97	8.92	40.97	2.23	23.42	69.26	66.62
120	35.44	12.44	35.44	3.11	21.35	83.62	59.90
150	44.92	8.08	44.92	2.02	30.61	71.43	77.55
180	57.36	11.56	57.36	2.89	32.86	89.33	93.11
210	48.16	13.80	48.16	3.45	29.04	78.64	80.65
240	49.44	19.17	49.44	4.79	19.98	91.36	74.21
270	42.76	11.96	42.76	2.99	22.96	89.31	68.71
300	33.42	22.85	33.42	5.71	27.17	98.49	66.30
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	44.02 $\pm 13.84$	9.96 $\pm 7.35$	26.27 $\pm 12.11$	2.49 $\pm 0.84$	20.95 $\pm 4.36$	53.98 $\pm 16.52$	49.71 $\pm 15.73$

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	1.96	16.10	5.49	4.03	11.95	18.06	21.46
20	1.75	1.05	2.56	0.26	9.97	2.80	12.79
30	1.18	0.83	2.48	0.21	14.54	2.02	17.23
40	1.06	0.94	0.43	0.23	5.10	2.00	5.76
50	26.12	0.76	0.45	0.19	5.04	26.87	5.68
60	19.51	0.88	0.92	0.22	4.74	20.39	5.88
80	29.24	5.52	13.77	1.38	19.52	34.77	34.67
100	29.27	10.01	13.56	2.50	16.93	39.28	33.00
120	30.17	10.06	24.99	2.51	16.85	40.23	44.36
150	36.48	5.85	27.51	1.46	17.09	42.34	46.06
180	50.77	10.10	26.69	2.52	20.97	60.86	50.19
210	69.29	15.25	53.80	3.81	29.40	84.54	87.01
240	54.72	14.08	33.05	3.52	18.85	68.80	55.43
270	45.30	7.30	22.86	1.82	25.35	52.60	50.04
300	50.96	11.49	20.25	2.87	23.63	62.45	46.75
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	53.07 $\pm 16.29$	10.26 $\pm 4.72$	31.39 $\pm 9.61$	2.57 $\pm 1.18$	18.47 $\pm 5.71$	63.33 $\pm 17.49$	52.43 $\pm 13.88$

ตารางที่ ข-17 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 2 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	50.51	8.86	20.18	2.21	23.16	59.37	45.55
20	35.05	10.96	25.18	2.74	35.98	46.01	63.90
30	36.00	9.44	16.28	2.36	32.42	45.44	51.06
40	42.54	11.28	23.57	2.82	30.89	53.82	57.28
50	53.72	12.96	28.99	3.24	39.12	66.68	71.35
60	51.20	14.48	37.61	3.62	27.93	65.68	69.16
80	65.65	14.64	24.16	3.66	38.19	80.29	66.01
100	49.10	11.48	19.42	2.87	30.50	60.58	52.79
120	66.23	10.28	15.96	2.57	30.24	76.51	48.77
150	50.73	11.35	13.41	2.84	28.31	62.08	44.56
180	57.31	8.80	17.89	2.20	23.21	66.11	43.30
210	48.65	9.12	13.92	2.28	22.94	57.77	39.14
240	52.81	11.88	20.34	2.97	35.28	64.69	58.59
270	69.44	11.96	16.73	2.99	40.70	81.40	60.42
300	56.87	8.08	24.99	2.02	39.01	64.95	66.02
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	46.30 $\pm 7.92$	8.62 $\pm 2.02$	17.98 $\pm 4.11$	2.15 $\pm 0.50$	26.49 $\pm 6.64$	54.92 $\pm 8.81$	46.62 $\pm 10.00$

ตารางที่ ข-18 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	5.32	15.22	65.79	3.81	34.39	20.54	43.99
20	6.83	14.11	83.70	3.53	26.50	20.94	43.73
30	4.23	4.24	33.05	1.06	7.98	8.47	42.09
40	15.10	7.91	54.00	1.98	18.83	23.01	74.81
50	30.83	12.70	68.48	3.17	37.16	43.53	48.81
60	31.71	5.75	30.22	1.44	16.89	37.46	48.54
80	56.30	11.99	25.56	3.00	33.88	68.29	62.44
100	51.44	3.03	24.97	0.76	32.19	54.47	57.92
120	40.19	3.21	14.64	0.80	34.26	43.40	49.70
150	58.16	3.92	28.25	0.98	38.90	62.08	68.13
180	57.82	5.69	22.35	1.42	43.81	63.51	67.58
210	57.86	9.39	28.24	2.35	41.61	67.25	72.19
240	64.96	13.89	26.60	3.47	39.07	78.85	69.14
270	58.86	18.10	25.90	4.53	59.02	76.96	89.45
300	64.82	7.39	31.36	1.85	31.08	72.21	64.28
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	56.71 $\pm 7.45$	8.51 $\pm 5.27$	25.32 $\pm 4.72$	2.13 $\pm 1.32$	40.42 $\pm 8.57$	65.22 $\pm 11.13$	67.87 $\pm 10.88$

ตารางที่ ข-19 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 2 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	38.14	11.12	19.35	2.78	26.31	49.26	48.44
20	43.89	12.48	18.30	3.12	23.78	56.37	45.20
30	42.18	8.60	17.31	2.15	27.34	50.78	46.80
40	45.78	8.04	20.43	2.01	23.56	53.82	46.00
50	49.30	8.68	14.89	2.17	27.24	57.98	44.30
60	50.21	4.76	24.53	1.19	29.96	54.97	55.68
70	47.93	7.60	19.56	1.90	23.21	55.53	44.67
80	45.89	11.92	15.90	2.98	24.72	57.81	43.60
90	43.21	9.64	17.34	2.41	21.45	52.85	41.20
100	49.89	8.12	19.50	2.03	31.86	58.01	53.39
110	42.90	7.80	14.21	1.95	27.73	50.70	43.89
120	41.90	5.28	15.90	1.32	30.17	47.18	47.39
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	46.30 $\pm 3.73$	8.62 $\pm 2.36$	17.98 $\pm 2.84$	2.15 $\pm 0.59$	26.49 $\pm 3.20$	54.92 $\pm 3.65$	46.62 $\pm 4.15$

ตารางที่ ข-20 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	57.31	8.48	22.74	2.12	32.78	65.79	60.64
20	48.31	8.27	16.42	2.07	31.67	56.58	50.16
30	50.52	10.20	15.42	2.55	31.52	60.72	49.49
40	49.93	11.32	21.28	1.10	30.56	61.25	54.67
50	50.84	8.84	28.51	2.21	31.74	59.68	62.46
60	57.21	10.38	27.14	2.60	31.92	67.59	61.65
70	52.25	10.06	20.97	2.51	32.11	62.31	55.59
80	49.32	7.68	20.65	1.92	28.92	57.00	51.50
90	54.37	5.56	23.13	1.39	31.78	59.93	64.30
100	57.82	4.41	22.63	2.83	28.67	62.22	63.40
110	53.05	5.12	22.61	1.28	32.89	58.17	56.78
120	42.73	6.24	24.71	1.56	29.51	48.97	59.78
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	51.95 $\pm 4.38$	8.18 $\pm 2.28$	24.63 $\pm 3.77$	2.04 $\pm 0.57$	31.28 $\pm 3.40$	60.12 $\pm 4.76$	57.95 $\pm 5.26$

ตารางที่ ข-21 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 7 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	82.04	5.66	34.78	1.42	38.28	87.71	74.48
20	84.14	2.44	37.68	0.61	43.03	86.58	81.33
30	74.73	5.39	35.06	1.35	42.26	80.12	78.67
40	80.87	5.00	38.72	1.25	48.34	85.88	88.31
50	78.61	5.40	41.09	1.35	43.98	84.01	86.42
60	76.60	4.37	41.31	1.09	38.48	80.97	80.88
70	68.22	4.33	39.99	1.08	41.11	72.55	82.18
80	76.45	5.98	42.25	1.49	44.26	82.43	88.00
90	76.86	5.26	42.01	1.31	38.58	82.12	81.90
100	72.16	5.49	36.26	1.37	39.60	77.65	77.22
110	74.85	5.87	41.89	1.47	41.06	80.72	84.42
120	71.34	5.44	41.47	1.36	35.52	76.78	78.35
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	76.41 $\pm 4.60$	5.05 $\pm 0.97$	39.38 $\pm 2.79$	1.26 $\pm 0.24$	41.21 $\pm 3.44$	81.46 $\pm 4.38$	81.85 $\pm 4.33$



ตารางที่ ข-22 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยอะลูมินา อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	19.05	13.36	11.13	3.34	10.71	32.41	25.18
20	16.34	17.64	11.47	4.41	11.86	33.98	27.74
30	16.40	19.76	11.91	4.94	11.72	36.16	28.57
40	17.86	16.04	11.80	4.01	9.80	33.90	25.61
50	15.59	18.56	14.86	4.64	10.37	34.15	29.87
60	16.38	21.68	15.25	5.42	11.51	38.06	32.18
70	15.33	17.68	11.09	4.42	10.11	33.01	25.62
80	15.76	19.32	13.67	4.83	13.27	35.08	31.77
90	20.94	16.44	15.44	4.11	8.45	37.38	28.00
100	20.22	15.96	17.79	3.99	12.82	36.18	34.60
110	17.92	23.04	15.06	5.76	7.36	40.96	28.18
120	17.19	20.44	17.22	5.11	11.08	37.63	33.41
$\bar{X} \pm SD$ (1-120)	17.47 $\pm 1.84$	17.46 $\pm 2.71$	16.35 $\pm 2.38$	4.37 $\pm 0.68$	10.53 $\pm 1.70$	34.93 $\pm 2.47$	31.25 $\pm 3.16$

ตารางที่ ข-23 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยควออร์ท อัตราส่วน  
ไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	14.82	20.32	10.15	5.08	11.36	35.14	26.59
20	15.48	18.16	8.16	4.54	9.54	33.64	22.25
30	13.81	20.24	11.35	5.06	6.92	34.05	23.33
40	14.25	20.29	8.91	5.07	7.81	34.55	21.79
50	14.09	22.75	16.05	5.69	6.77	36.85	28.50
60	16.80	22.00	15.07	5.50	8.33	38.80	28.90
70	16.67	20.51	8.83	5.13	9.23	37.18	23.19
80	14.57	16.28	9.24	4.07	8.24	30.85	21.55
90	15.54	21.23	12.48	5.31	6.76	36.77	24.55
100	14.05	19.07	14.06	4.77	8.75	33.12	27.58
110	13.42	21.33	14.01	5.33	7.92	34.75	27.26
120	14.68	23.00	13.72	5.75	7.73	37.68	27.21
$\bar{X} \pm SD$ (1-120)	14.90 $\pm 1.08$	20.44 $\pm 1.91$	11.83 $\pm 2.74$	5.11 $\pm 0.48$	8.28 $\pm 1.33$	35.34 $\pm 2.25$	25.23 $\pm 2.73$

ตารางที่ ข-24 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยเตาปฏิกรณ์เปล่า อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	19.89	22.92	17.14	5.73	10.06	42.81	32.93
20	11.23	27.28	11.08	6.82	9.04	38.51	26.95
30	18.08	22.13	15.75	5.53	5.14	40.21	26.42
40	11.90	20.66	11.64	5.16	6.26	32.56	23.06
50	13.43	27.27	11.05	6.82	9.55	40.70	27.41
60	11.94	22.74	13.41	5.68	5.73	34.68	24.82
70	16.34	19.39	12.22	4.85	4.81	35.73	21.88
80	19.62	16.22	15.94	4.05	3.19	35.84	23.19
90	12.54	22.73	12.69	5.68	7.77	35.27	26.15
100	15.32	20.04	10.21	5.01	6.13	35.36	21.35
110	17.24	22.20	17.46	5.55	4.31	39.44	27.32
120	14.23	21.39	13.97	5.35	9.16	35.62	28.47
$\bar{X} \pm SD$ (1-120)	15.14 $\pm 3.07$	22.04 $\pm 3.07$	13.55 $\pm 2.50$	5.51 $\pm 0.77$	6.76 $\pm 2.29$	37.18 $\pm 3.03$	25.82 $\pm 3.23$

ตารางที่ ข-25 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก จำนวนท่อแพลเลเดียม 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	33.13	5.59	25.94	1.40	6.90	38.72	34.24
20	35.83	8.99	24.57	2.25	6.96	44.82	33.78
30	34.24	9.00	34.61	2.25	8.30	43.24	45.16
40	37.80	10.52	26.69	2.63	7.42	48.32	36.74
50	31.99	8.12	32.53	2.03	7.95	40.11	42.51
60	33.90	9.01	32.99	2.25	8.10	42.92	43.34
70	32.19	11.03	31.99	2.76	7.76	43.22	42.51
80	38.63	9.70	27.20	2.43	9.03	48.33	38.65
90	41.63	7.09	33.98	1.77	8.08	48.72	43.83
100	32.74	10.97	34.07	2.74	9.92	43.71	46.74
110	38.45	7.74	38.29	1.94	8.58	46.19	48.80
120	39.18	11.27	28.12	2.82	8.08	50.45	39.02
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	35.81 $\pm 3.23$	9.10 $\pm 1.75$	30.91 $\pm 4.26$	2.28 $\pm 0.44$	8.09 $\pm 0.84$	44.91 $\pm 3.60$	41.28 $\pm 4.80$

ตารางที่ ข-26 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวนท่อแพลเลเดียม 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	37.09	6.18	37.86	1.54	11.33	43.27	50.73
20	41.20	8.65	33.75	2.16	16.27	49.85	52.18
30	42.10	8.34	25.69	2.09	9.32	50.44	37.09
40	43.12	7.44	35.86	1.86	12.26	50.55	49.97
50	43.04	7.48	31.10	1.87	11.37	50.52	44.34
60	44.70	7.43	30.60	1.86	12.29	52.13	44.75
70	43.89	10.58	31.21	2.64	10.18	54.47	44.03
80	48.68	7.80	38.77	1.95	10.01	56.48	50.73
90	48.04	7.44	38.36	1.86	10.39	55.48	50.61
100	42.83	9.94	31.36	2.48	12.68	52.76	46.53
110	49.96	9.59	35.48	2.40	12.92	59.55	50.79
120	40.91	10.96	35.16	2.74	10.54	51.87	48.44
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	44.63 $\pm 3.64$	8.48 $\pm 1.48$	33.77 $\pm 3.89$	2.12 $\pm 0.37$	11.63 $\pm 1.86$	53.11 $\pm 4.07$	47.52 $\pm 4.36$

ตารางที่ ข-27 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก จำนวนท่อแพลเลเดียม 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	34.73	10.24	16.88	2.56	18.22	44.97	37.66
20	36.57	6.53	15.51	1.63	14.08	43.10	31.22
30	38.70	6.37	20.31	1.59	12.16	45.07	34.06
40	30.18	9.37	20.49	2.34	10.37	39.55	33.21
50	32.56	10.18	16.92	2.54	10.76	42.74	30.22
60	30.68	10.70	15.24	2.67	10.33	41.38	28.24
70	35.05	9.68	14.71	2.42	14.06	44.73	31.19
80	35.21	10.59	20.56	2.65	15.29	45.80	38.50
90	36.95	8.36	20.03	2.09	15.03	45.31	37.15
100	33.32	11.38	18.44	2.85	20.94	44.70	42.23
110	38.10	7.81	19.66	1.95	20.06	45.91	41.67
120	34.59	10.72	18.09	2.68	20.59	45.31	41.36
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	34.72 $\pm 2.69$	9.32 $\pm 1.68$	18.07 $\pm 2.18$	2.33 $\pm 0.42$	15.16 $\pm 3.97$	44.04 $\pm 1.96$	35.56 $\pm 4.85$

ตารางที่ ข-28 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยอะลูมินา อัตราส่วน  
ไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> in H	CO	CH <sub>4</sub> in C	CO <sub>2</sub>	H	C
10	28.39	13.88	15.30	3.47	16.33	42.27	35.10
20	23.47	16.64	17.09	4.16	15.70	40.11	36.95
30	31.30	12.54	13.95	3.14	18.14	43.85	35.22
40	32.76	12.65	14.55	3.16	18.04	45.42	35.76
50	27.70	12.40	19.28	3.10	17.72	40.10	40.10
60	29.96	15.26	16.58	3.81	13.76	45.22	34.15
70	30.68	16.48	19.01	4.12	14.87	47.16	38.00
80	28.67	13.20	19.12	3.30	15.84	41.87	38.26
90	30.49	12.64	19.22	3.16	16.56	43.13	38.94
100	31.33	13.23	17.93	3.31	15.26	44.56	36.50
110	37.37	13.32	17.57	3.33	14.34	50.69	35.24
120	32.96	14.32	18.37	3.58	17.02	47.28	38.97
$\bar{X} \pm SD$ (1-120)	30.42 $\pm 3.37$	13.88 $\pm 1.50$	17.33 $\pm 1.88$	3.47 $\pm 0.37$	16.13 $\pm 1.43$	44.30 $\pm 3.12$	36.93 $\pm 1.90$

ตารางที่ ข-29 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยควออร์ท อัตราส่วน  
ไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> in H	CO	CH <sub>4</sub> in C	CO <sub>2</sub>	H	C
10	22.27	13.72	16.93	3.43	18.22	35.99	38.58
20	28.08	12.44	13.79	3.11	22.39	40.52	39.29
30	23.54	14.92	16.86	3.73	18.85	38.46	39.44
40	26.64	17.54	14.03	4.38	18.16	44.18	36.57
50	26.70	18.94	17.55	4.74	19.35	45.64	41.63
60	25.15	14.72	15.29	3.68	10.16	39.87	29.13
70	27.83	15.39	14.65	3.85	14.06	43.23	32.56
80	29.32	13.32	14.65	3.33	10.98	42.64	28.96
90	29.68	17.41	15.44	4.35	18.13	47.09	37.92
100	28.64	15.69	13.19	3.92	20.01	44.33	37.12
110	28.08	17.20	17.36	4.30	20.39	45.28	42.05
120	23.65	10.72	15.32	2.68	13.49	34.37	31.49
$\bar{X} \pm SD$ (1-120)	26.63 $\pm 2.45$	13.43 $\pm 2.38$	15.42 $\pm 1.46$	3.36 $\pm 0.60$	17.02 $\pm 3.89$	40.06 $\pm 3.99$	35.80 $\pm 4.58$



ตารางที่ ข-30 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยเตาปฏิกรณ์เปล่า อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	11.83	12.36	12.87	3.09	9.09	24.19	25.05
20	27.31	13.48	11.67	3.37	15.67	40.79	30.71
30	29.96	13.60	13.25	3.40	17.37	43.56	34.01
40	29.60	13.88	15.38	3.47	20.50	43.48	39.36
50	32.93	11.04	17.55	2.76	17.79	43.97	38.10
60	30.03	12.84	13.77	3.21	12.35	42.87	29.33
70	29.77	14.72	13.45	3.68	13.98	44.49	31.11
80	29.73	14.80	17.03	3.70	16.10	44.53	36.83
90	29.44	14.76	14.26	3.69	16.73	44.20	34.67
100	29.58	14.72	16.59	3.68	15.67	44.30	35.94
110	24.90	12.24	12.92	3.06	15.65	37.14	31.64
120	24.82	10.52	12.04	2.63	17.78	35.34	32.45
$\bar{X} \pm SD$ (1-120)	27.49 $\pm 2.38$	15.94 $\pm 1.52$	14.23 $\pm 1.96$	3.99 $\pm 0.37$	16.28 $\pm 2.14$	43.43 $\pm 3.18$	34.50 $\pm 3.27$

ตารางที่ ข-31 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	39.19	5.66	14.35	1.42	28.71	44.85	44.48
20	39.65	7.82	17.16	1.96	25.78	47.47	44.90
30	35.74	6.36	20.11	1.59	19.89	42.10	41.59
40	46.32	8.71	18.12	2.18	30.40	55.03	50.69
50	43.31	9.01	15.53	2.25	26.97	52.32	44.76
60	49.93	8.00	12.70	2.00	28.41	57.93	43.11
70	43.31	8.52	15.36	2.13	31.05	51.82	48.54
80	45.51	9.92	17.70	2.48	32.11	55.43	52.29
90	43.06	9.40	20.76	2.35	27.44	52.46	50.55
100	48.17	8.90	20.48	2.22	30.79	57.07	53.50
110	43.05	10.25	18.07	2.56	29.62	53.30	50.25
120	45.74	8.79	20.40	2.20	28.49	54.53	51.09
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	43.58 $\pm 3.98$	8.38 $\pm 1.34$	17.56 $\pm 2.65$	2.10 $\pm 0.33$	28.29 $\pm 3.22$	51.97 $\pm 4.86$	47.95 $\pm 3.99$

ตารางที่ ข-32 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	32.53	11.44	21.04	2.86	20.39	43.97	44.29
20	34.19	8.27	12.93	2.07	20.45	42.46	35.45
30	39.89	10.20	21.65	2.55	19.92	50.09	44.12
40	34.70	11.32	20.64	2.83	25.96	46.02	49.43
50	44.69	8.84	21.92	2.21	21.87	53.53	46.00
60	42.38	10.38	21.92	2.60	20.32	52.76	44.84
70	48.10	10.06	17.77	2.51	27.71	58.16	47.99
80	44.75	8.30	20.91	2.08	25.44	53.05	48.43
90	38.85	10.76	19.18	2.69	20.82	49.61	42.69
100	44.61	6.72	22.60	1.68	21.74	51.33	46.02
110	37.98	9.12	21.59	2.28	23.74	47.10	47.61
120	37.29	6.24	23.29	1.56	19.77	43.53	44.62
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	39.99 $\pm 4.93$	9.28 $\pm 1.70$	20.45 $\pm 2.79$	2.32 $\pm 0.42$	22.35 $\pm 2.70$	49.27 $\pm 4.78$	45.12 $\pm 3.66$

ตารางที่ ข-33 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยอะลูมินา อัตราส่วน  
ไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 2 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	35.24	26.41	19.46	6.60	11.60	61.65	37.66
20	34.77	24.44	21.89	6.11	20.85	59.21	48.85
30	32.49	25.28	19.30	6.32	16.96	57.77	42.58
40	33.05	26.68	19.25	6.67	15.42	59.73	41.34
50	34.20	25.12	17.79	6.28	20.57	59.32	44.64
60	36.10	29.88	15.47	7.47	21.07	65.98	44.01
70	30.84	25.31	15.64	6.33	17.47	56.15	39.44
80	37.17	25.52	17.47	6.38	21.39	62.70	45.24
90	29.08	22.72	18.13	5.68	20.88	51.80	44.69
100	30.31	25.78	16.29	6.44	17.11	56.09	39.85
110	34.04	20.92	18.10	5.23	15.25	54.96	38.58
120	33.98	20.84	17.69	5.21	15.17	54.82	38.07
$\bar{X} \pm SD$ (80-300)	33.44 $\pm 2.41$	24.91 $\pm 2.51$	18.04 $\pm 1.80$	6.23 $\pm 0.63$	17.82 $\pm 3.15$	58.35 $\pm 3.82$	42.09 $\pm 3.48$

ตารางที่ ข-34 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยอะลูมินา อัตราส่วน  
ไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 3 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	20.64	26.94	18.97	6.73	18.16	47.58	43.86
20	22.97	25.93	18.75	6.48	18.44	48.90	43.67
30	26.30	27.08	15.53	6.77	18.94	53.38	41.24
40	24.13	30.43	18.26	7.61	10.26	54.56	36.13
50	29.74	23.51	20.29	5.88	12.56	53.25	38.73
60	23.43	28.08	20.75	7.02	15.53	51.51	43.31
70	28.88	31.34	18.75	7.84	12.94	60.22	39.52
80	24.55	29.20	19.48	7.30	17.04	53.75	43.82
90	28.61	34.03	20.57	8.51	17.46	62.65	46.55
100	27.94	27.36	19.28	6.84	17.80	55.31	43.92
110	24.17	27.80	18.04	6.95	15.94	51.97	40.94
120	22.39	24.56	20.46	6.14	14.13	46.95	40.73
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	25.31 $\pm 2.92$	28.03 $\pm 2.92$	19.10 $\pm 1.45$	7.01 $\pm 0.73$	15.77 $\pm 2.75$	53.34 $\pm 4.65$	41.87 $\pm 2.86$

ตารางที่ ข-35 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยอะลูมินา อัตราส่วน  
ไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 4 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> in H	CO	CH <sub>4</sub> in C	CO <sub>2</sub>	H	C
10	21.32	29.96	18.96	7.49	12.96	51.28	39.41
20	21.37	28.22	20.49	7.06	13.17	49.59	40.72
30	21.04	27.92	14.27	6.98	10.77	48.95	32.01
40	20.70	29.23	16.33	7.31	11.77	49.93	35.41
50	15.62	32.52	23.77	8.13	12.47	48.14	44.37
60	21.73	29.83	24.34	7.46	12.28	51.56	44.08
70	20.28	26.87	23.72	6.72	8.28	47.15	38.72
80	19.36	28.29	20.09	7.07	20.12	47.64	47.28
90	24.68	29.85	16.48	7.46	13.99	54.52	37.93
100	26.36	25.05	18.69	6.26	15.73	51.41	40.68
110	27.61	25.06	20.59	6.27	15.46	52.67	42.32
120	30.03	30.32	17.59	7.58	11.67	60.35	36.84
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	22.51 $\pm 3.97$	28.59 $\pm 2.18$	19.61 $\pm 3.20$	7.15 $\pm 0.55$	13.22 $\pm 2.95$	51.10 $\pm 3.63$	39.98 $\pm 4.22$

ตารางที่ ข-36 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณ แพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 2 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	52.37	7.50	31.21	1.87	26.26	59.87	59.34
20	56.40	9.15	34.54	2.29	25.82	65.55	62.65
30	59.24	12.30	37.13	3.08	28.50	71.54	68.71
40	52.66	13.44	30.60	3.36	26.30	66.10	60.26
50	60.56	12.92	39.47	3.23	30.10	73.48	72.80
60	57.07	11.41	33.11	2.85	21.06	68.48	57.02
70	61.47	12.77	30.12	3.19	30.02	74.24	63.33
80	62.16	13.26	38.68	3.32	25.39	75.42	67.39
90	56.95	12.89	28.48	3.22	24.33	69.84	56.03
100	62.15	11.25	33.90	2.81	28.47	73.40	65.19
110	56.90	9.86	30.80	2.46	32.70	66.76	65.96
120	57.58	7.77	34.45	1.94	27.66	65.35	64.06
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	57.96 $\pm 3.31$	11.20 $\pm 2.14$	33.54 $\pm 3.51$	2.80 $\pm 0.53$	27.22 $\pm 3.06$	69.16 $\pm 4.64$	63.56 $\pm 4.90$

ตารางที่ ข-37 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณ แพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 2:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	62.53	5.48	26.78	1.37	36.95	68.01	65.10
20	59.91	6.16	26.86	1.54	34.06	66.07	62.45
30	57.48	7.00	24.60	1.75	31.07	64.48	57.43
40	57.85	7.80	24.09	1.95	32.93	65.65	58.97
50	59.10	5.80	27.78	1.45	32.35	64.90	61.58
60	60.72	8.72	27.46	2.18	30.95	69.44	60.58
70	57.71	6.88	23.62	1.72	35.53	64.59	60.87
80	66.79	11.74	30.48	2.94	35.38	78.53	68.79
90	59.26	11.13	24.61	2.78	34.07	70.39	61.46
100	55.96	9.31	27.13	2.33	39.78	65.27	69.24
110	55.54	6.80	26.89	1.70	32.17	62.34	60.76
120	60.52	8.81	27.50	2.20	35.84	69.33	65.55
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	59.45 $\pm 3.07$	8.30 $\pm 2.02$	26.48 $\pm 1.94$	2.08 $\pm 0.51$	34.26 $\pm 2.59$	67.75 $\pm 4.25$	62.82 $\pm 3.69$



ตารางที่ ข-38 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณ แพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 3:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 1 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	63.99	6.05	25.81	1.51	40.86	70.04	68.18
20	66.19	5.79	28.46	1.45	43.52	71.97	73.43
30	65.63	5.11	25.17	1.28	42.16	70.74	68.61
40	65.71	5.44	28.52	1.36	35.23	71.15	65.11
50	65.15	8.15	30.86	2.04	37.56	73.30	70.46
60	62.44	8.36	31.15	2.09	33.94	70.79	67.18
70	65.46	7.47	31.07	1.87	35.62	72.93	68.55
80	61.59	7.16	24.86	1.79	33.55	68.75	60.21
90	64.18	7.81	29.91	1.95	32.83	71.99	64.70
100	68.66	9.14	26.90	2.28	41.18	77.79	70.36
110	63.99	8.98	26.95	2.24	40.86	72.97	70.05
120	62.24	13.48	25.86	3.37	33.27	75.72	62.49
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	65.44 $\pm 1.97$	7.76 $\pm 2.26$	27.96 $\pm 2.36$	1.94 $\pm 0.57$	37.55 $\pm 3.94$	73.20 $\pm 2.48$	67.45 $\pm 3.73$

ตารางที่ ข-39 ข้อมูลการทดลองผลของกลีเซอรอลดิบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทดลองด้วยปริมาณแพลเลียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม ระยะเวลาการสัมผัส 2 วินาที

เวลา	การแปรสภาพในรูปไฮโดรเจน (ร้อยละ)		การแปรสภาพในรูปคาร์บอน (ร้อยละ)			การแปรสภาพในรูปแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม (ร้อยละ)	
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4 in H</sub>	CO	CH <sub>4 in C</sub>	CO <sub>2</sub>	H	C
10	68.79	10.24	33.89	2.56	34.94	79.03	71.39
20	55.78	9.10	28.45	2.27	35.17	64.88	65.90
30	52.57	11.27	41.69	2.82	42.45	63.84	86.96
40	77.96	13.60	42.81	3.40	51.47	91.56	97.68
50	77.35	13.98	30.72	3.49	45.37	91.33	79.58
60	62.35	15.91	28.16	3.98	35.97	78.26	68.11
70	59.40	19.70	41.38	4.92	34.41	79.09	80.72
80	75.91	11.78	31.42	2.95	29.50	87.69	63.87
90	74.48	13.64	36.95	3.41	31.45	88.13	71.81
100	73.13	14.46	42.86	3.62	33.57	87.59	80.05
110	69.31	11.42	31.30	2.86	41.35	80.74	75.51
120	79.24	12.89	31.42	3.22	41.77	92.13	76.41
$\bar{X} \pm SD$ (10-120)	68.86 $\pm 9.20$	13.17 $\pm 2.81$	35.09 $\pm 5.72$	3.29 $\pm 0.70$	38.12 $\pm 6.40$	82.02 $\pm 9.71$	76.50 $\pm 9.48$

ตารางที่ ข-40 ผลของอุณหภูมิ 600 – 800 องศาเซลเซียส ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำด้วยอะลูมินา ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1

อุณหภูมิ (° ซ)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
600	10.62	2.52
700	9.65	2.52
800	10.09	2.54

ตารางที่ ข-41 ผลของอุณหภูมิ 600 – 800 องศาเซลเซียส ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอล ด้วยไอน้ำด้วยปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 1.2 ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1

อุณหภูมิ (° ซ)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
600	10.62	2.94
700	9.56	2.92
800	8.51	2.94

ตารางที่ ข-42 ผลของปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 0.5-1.2 โดยน้ำหนัก ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1

ปริมาณแพลเลเดียม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
อะลูมินา	10.62	2.52
0.5	10.05	3.54
1.0	10.09	2.87
1.2	10.62	2.94

ตารางที่ ข-43 ผลของปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 0.5-1.2 โดยน้ำหนัก ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1

ปริมาณแพลเลเดียม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
อะลูมินา	10.09	2.54
0.5	8.74	3.86
1.0	7.94	4.18
1.2	8.51	2.94

ตารางที่ ข-44 ผลของประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของแพลเลเดียม ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1

รอบการใช้ซ้ำ (รอบ)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
รอบที่ 1	8.74	3.86
รอบที่ 2	8.60	3.75
รอบที่ 3	8.73	4.23
รอบที่ 4	8.46	2.90

ตารางที่ ข-45 ผลของประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของแพลเลเดียม ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1

รอบการใช้ซ้ำ (รอบ)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
รอบที่ 1	7.94	4.18
รอบที่ 2	7.90	4.47
รอบที่ 3	7.76	4.55
รอบที่ 4	7.69	4.74

ตารางที่ ข-46 ผลของจำนวนท่อต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ด้วยความเข้มข้น 2500 พีพีเอ็ม

จำนวนท่อ (ท่อ)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
อะลูมินา	9.26	2.54
2 ท่อ	8.66	4.86
4 ท่อ	8.10	4.23
7 ท่อ	7.94	4.18

ตารางที่ ข-47 ผลของจำนวนท่อต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ด้วยความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม

จำนวนท่อ (ท่อ)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
อะลูมินา	9.97	3.31
2 ท่อ	9.00	3.56
4 ท่อ	8.60	4.35
7 ท่อ	8.56	3.66

ตารางที่ ข-48 ผลของปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 0.5-1.2 โดยน้ำหนัก ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1 ท่อตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ท่อ ที่ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม

ปริมาณแพลเลเดียม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
อะลูมินา	11.32	2.02
ควอร์ท	12.29	2.37
เตาปฏิกรณ์	12.98	2.09
0.5	11.14	2.19
1.0	10.68	2.49
1.2	9.77	3.63

ตารางที่ ข-49 ผลของปริมาณแพลเลเดียม ร้อยละ 0.5-1.2 โดยน้ำหนัก ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนไอน้ำ 1:1 ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ท่อ ที่ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม

ปริมาณแพลเลเดียม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
อะลูมินา	9.97	3.31
ควอร์ท	9.65	3.26
เตาปฏิกรณ์	9.99	3.70
0.5	8.39	4.68
1.0	8.60	4.35
1.2	9.09	3.69

ตารางที่ ข-50 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 1:1-3:1 ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ ที่ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม

อัตราส่วนไอน้ำต่อ คาร์บอน (โมล/โมล)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
1:1	8.60	4.35
2:1	8.60	5.75
3:1	8.50	8.71

ตารางที่ ข-51 ผลของระยะเวลาการสัมผัส 1-4 วินาที ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนไอน้ำ 1:1 ด้วยอะลูมินา จำนวน 4 ท่อ ที่ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาการสัมผัส (วินาที)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
1	9.97	3.31
2	10.75	3.50
3	11.39	2.50
4	11.94	2.17

ตารางที่ ข-52 ผลของระยะเวลาการสัมผัส 1-2 วินาที ต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนไอน้ำ 1:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ ที่ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาการสัมผัส (วินาที)	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
1	9.16	4.35
2	9.46	3.43

ตารางที่ ข-53 ผลของกลีเซอรอลดิบต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนไอน้ำ 1:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 ท่อ ระยะเวลาสัมผัส 2 วินาที ที่ความเข้มข้น 5000 พีพีเอ็ม

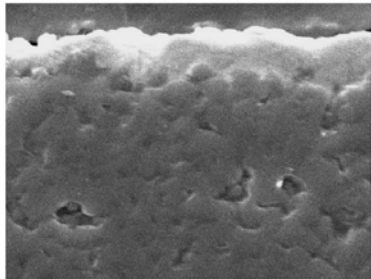
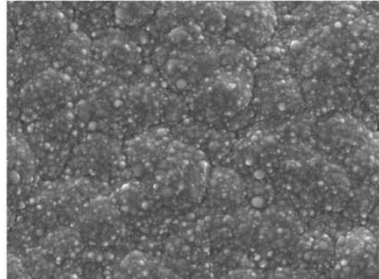
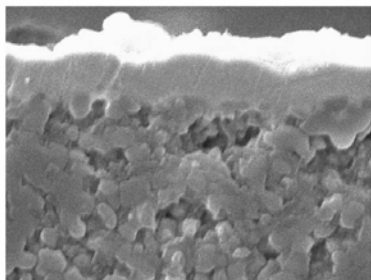
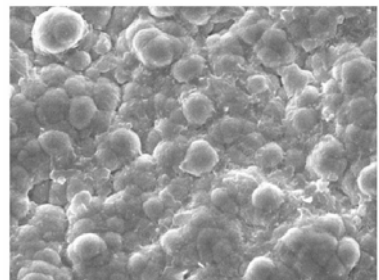
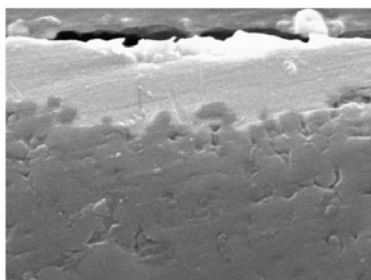
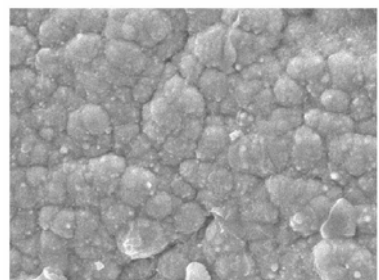
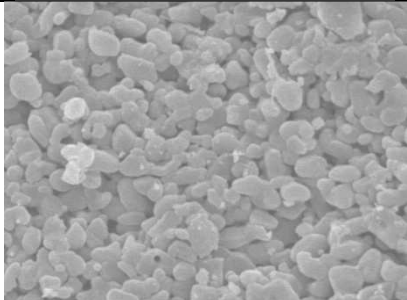
วัตถุดิบ	LHV (เมกะจูล/ลบ.ม.)	H <sub>2</sub> /CO
กลีเซอรอลบริสุทธิ์	9.46	3.43
กลีเซอรอลดิบ	8.98	3.18



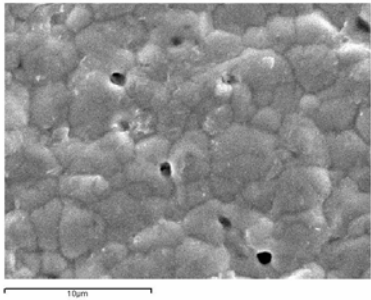
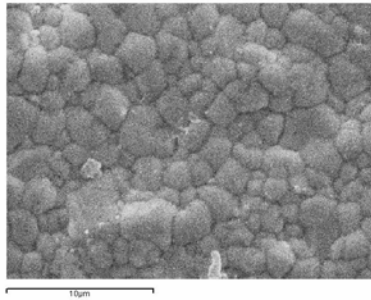
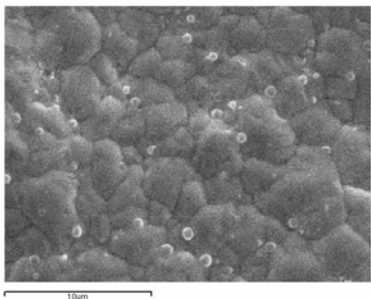
ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างและคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

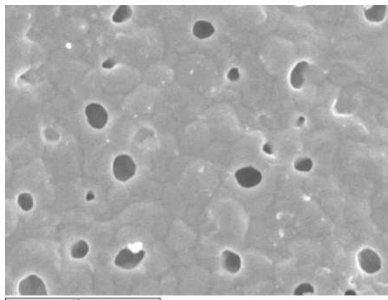
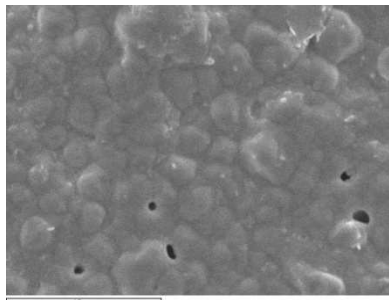
ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของแพลเลเดียมก่อนทำปฏิกิริยา

ปริมาณ แพลเลเดียม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ภาพตัดขวาง	ภาพโครงสร้างผิวหน้า
ร้อยละ 0.5 โดย น้ำหนัก		
ร้อยละ 1.0 โดย น้ำหนัก		
ร้อยละ 1.2 โดย น้ำหนัก		
อะลูมินา		

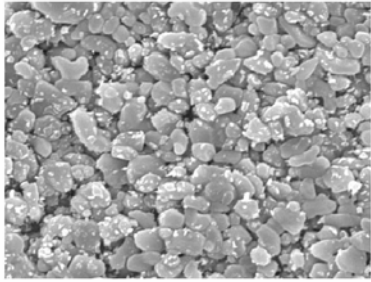
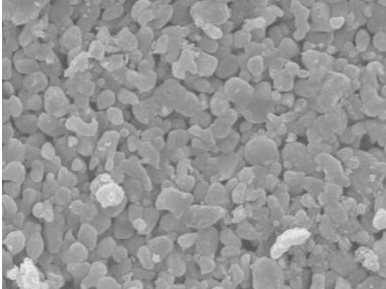
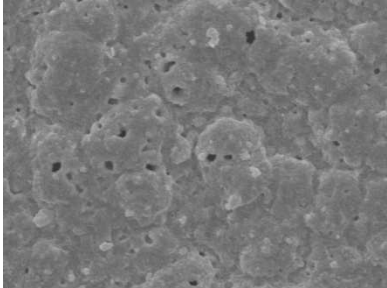
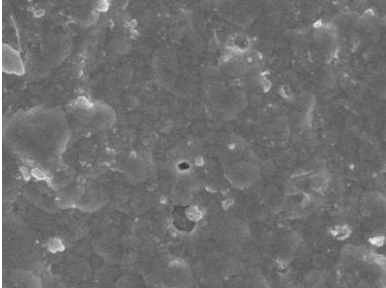
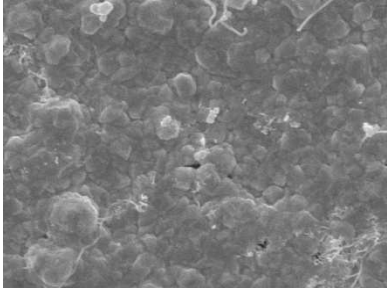
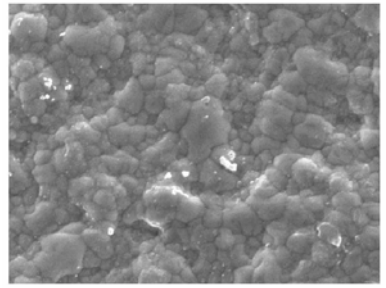
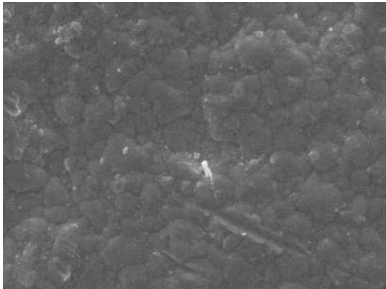
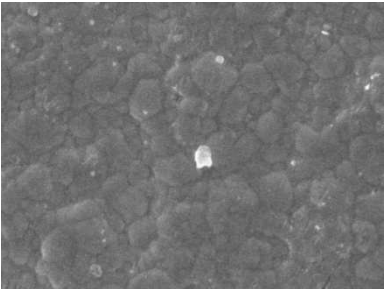
ตารางที่ ค-2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของแพลเลเดียมหลังทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 600 – 800 องศาเซลเซียส ด้วยปริมาณแพลเลเดียม 1.2 โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	หลังทำปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	หลังทำปฏิกิริยา
600		700	
800			

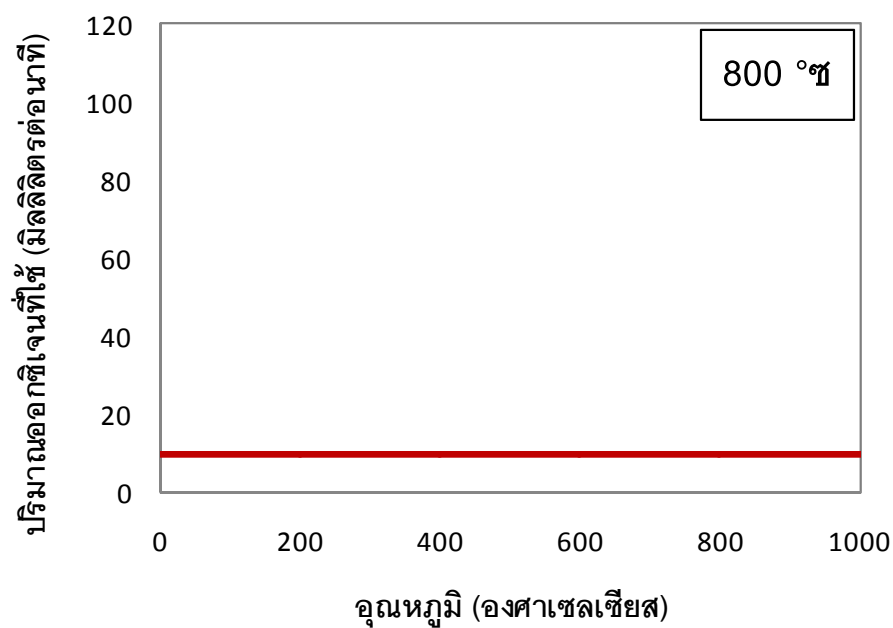
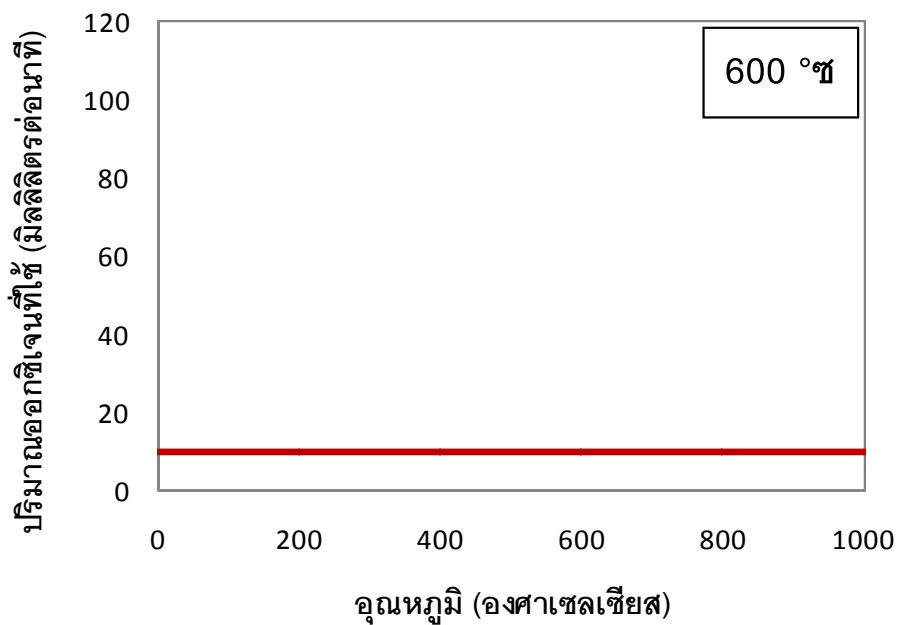
ตารางที่ ค-3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของแพลเลเดียมหลังทำปฏิกิริยา โดยการใช้ซ้ำ 4 รอบ ที่ปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก
	

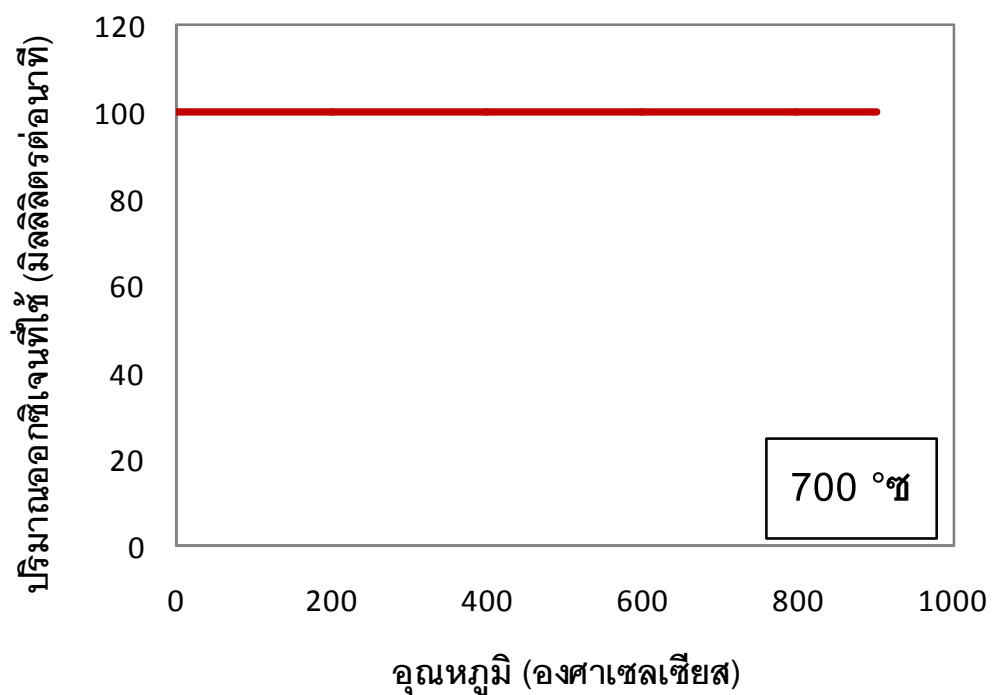
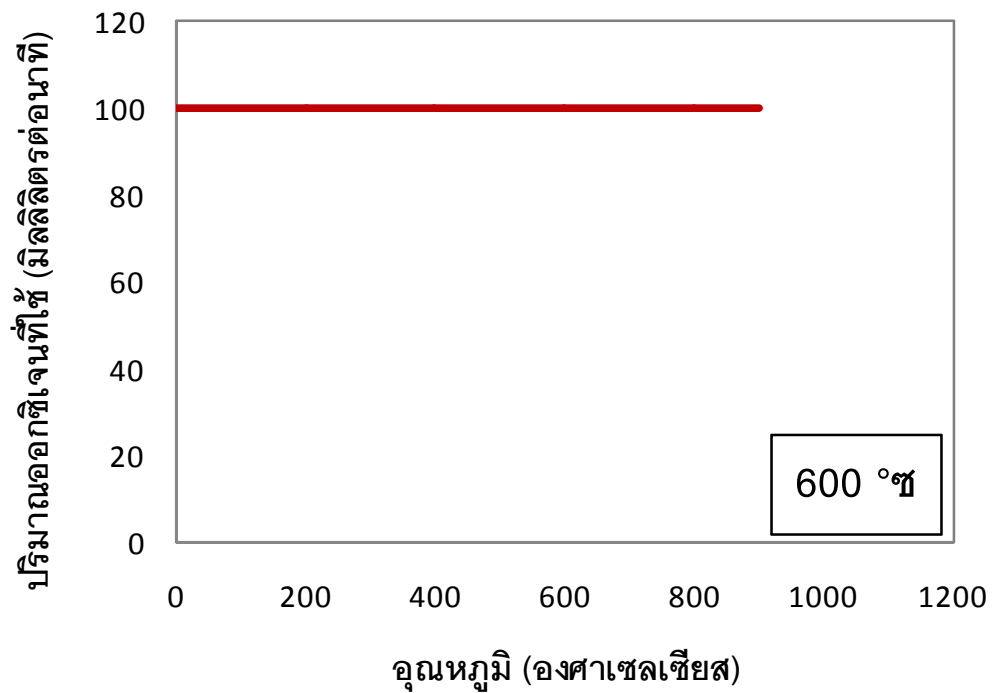
ตารางที่ ค-4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของแพลเลเดียมหลังทำปฏิกิริยา โดยการใช้ท่อตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ท่อ ที่ ปริมาณแพลเลเดียมร้อยละ 0.5 -1.2 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส
อะลูมินา		
ร้อยละ 0.5 โดย น้ำหนัก		
ร้อยละ 1.0 โดย น้ำหนัก		
ร้อยละ 1.2 โดย น้ำหนัก		

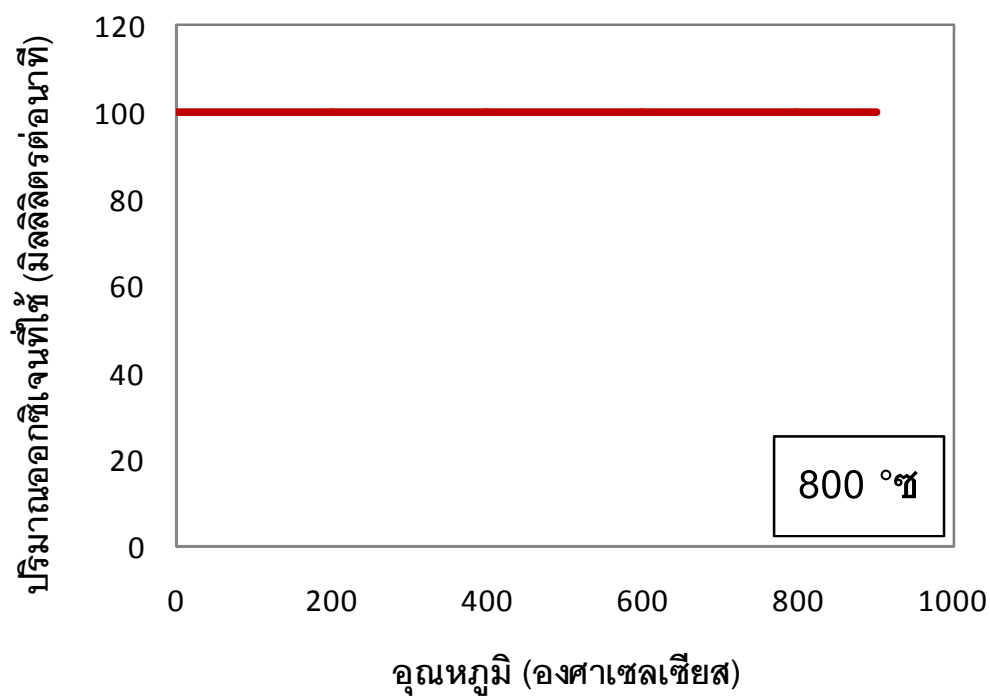
ภาพที่ ค-5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนทำปฏิกิริยาด้วยวิธีเทมเพลตเจอร์โปรแกรมออกซิเดชัน (TPO) ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักหลังทำปฏิกิริยาอุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส



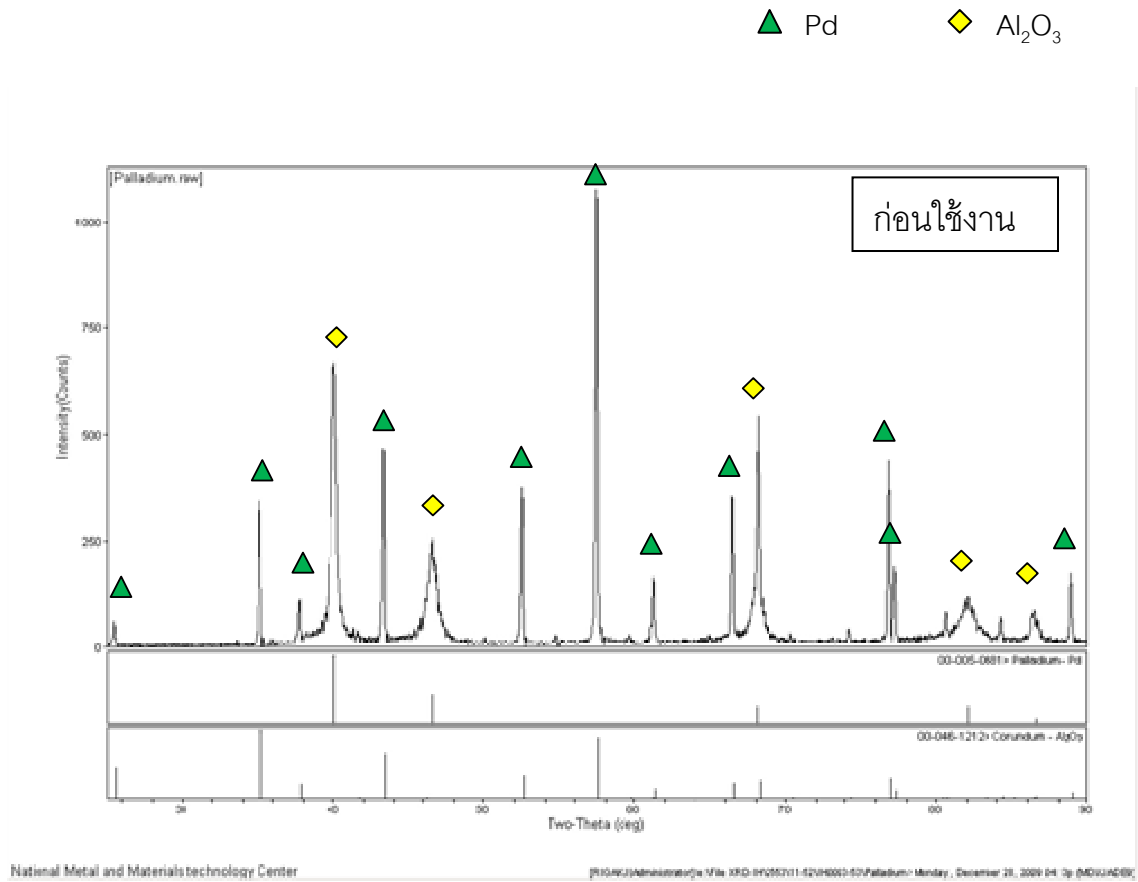
ภาพที่ ค-6 วิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน โดยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนักหลังการใช้งานที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ค-6 วิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน โดยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนักหลังการใช้งานที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส (ต่อ)



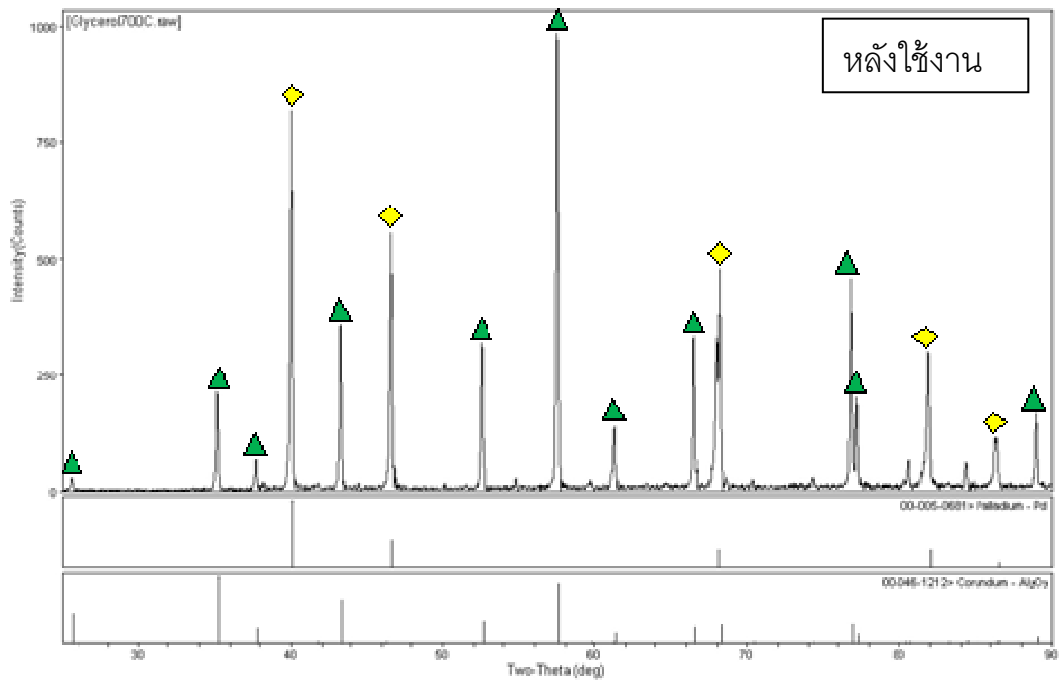
ภาพที่ ค-7 โครงสร้างผลึกด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ก่อนการใช้งาน





ภาพที่ ค-8 โครงสร้างผลึกด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก หลังการใช้งาน

▲ Pd      ◆  $\text{Al}_2\text{O}_3$



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอภัสราภรณ์ เจียวก๊ก เกิดเมื่อวันที่ 13 เมษายน 2529 สถานที่เกิด จังหวัดกระบี่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551

### การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

#### การเสนอผลงานในการประชุมวิชาการแบบปากเปล่าในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

A. Jiewkok, D. Atong, and V. Sricharoenchaikul, "Catalytic Syngas Generation from Glycerol Waste Using Palladium Supported on Alumina Rod", The 7th Asian Meeting on Ferroelectricity and The 7th Asian Meeting on Electroceramics, June 28 – July 1, Jeju, Korea, pp 201 (2010)

#### การเสนอผลงานในการประชุมวิชาการแบบโปสเตอร์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

A. Jiewkok, D. Atong and V. Sricharoenchaikul. "Catalytic Hydrogen Production from Glycerol Using Palladium Supported on Alumina Tube". The International Conference of Solid Waste 2011 Moving Towards Sustainable Resource Management, ICSWHK2011 Hong Kong Baptist University, Hong Kong SAR, China. 3-7 May 2011.