

การสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์  
ผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียม  
ออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

DIRECT SYNTHESIS OF LIQUEFIED PETROLEUM GAS  
FROM SYNGAS VIA COPPER ZINC-OXIDE ALUMINIUM-  
OXIDE OVER HZSM-5 CATALYSTS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมขอคืนเอกสารทันที  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร  
ปีการศึกษา 2562 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIRECT SYNTHESIS OF LIQUEFIED PETROLEUM GAS  
FROM SYNGAS VIA COPPER ZINC-OXIDE ALUMINIUM-  
OXIDE OVER HZSM-5 CATALYSTS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ**

การสังเคราะห์แก๊สซิโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์  
ผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียม  
ออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

Direct Synthesis of Liquefied Petroleum Gas from Syngas  
via Copper Zinc-Oxide Aluminium-Oxide over HZSM-5  
Catalysts

**ชื่อนักศึกษา**

นางสาวเมธาพร โสมกลาง รหัสนักศึกษา 59050472

นางสาวอารีญา สุวรรณรังษี รหัสนักศึกษา 59050526

**ปริญญา**

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

**ภาควิชา**

เคมี

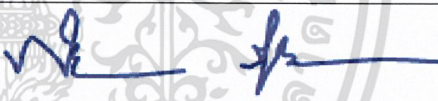
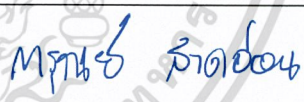

**ปีการศึกษา**

2562

**อาจารย์ที่ปรึกษา**

ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.การุณย์ สาดอ่อน กรรมการ	
ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ปรับปรุงใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ ผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียม ออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวเมธาพร โสมกลาง	รหัสนักศึกษา 59050472
	นางสาวอารีญา สุวรรณรังษี	รหัสนักศึกษา 59050526
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2562	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์โดยผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เพื่อศึกษาเรื่องความสามารถในเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$ ) ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{CuO} : \text{ZnO} : \text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็น 4.5:4.5:1 ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม และเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน ( $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3 : \text{HZSM-5}$ ) เป็น 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีผสมกันทางกายภาพ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ไปใช้ในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ ( $\text{H}_2:\text{CO}$  เป็น 2:1) ด้วยอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และความดัน 40 บาร์ พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เป็น 2:1 ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด เป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวและค่าผลิตภัณฑ์ของแก๊สปีโตรเลียมเหลวที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าเป็นร้อยละ 86.97 โดยโมล ร้อยละ 47.63 โดยโมล และร้อยละ 41.45 โดยโมล ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** การตกตะกอนร่วม การผสมกันทางกายภาพ แก๊สปีโตรเลียมเหลว คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์ ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Direct Synthesis of Liquefied Petroleum Gas from Syngas via Copper Zinc-Oxide Aluminium-Oxide over HZSM-5 Catalysts	
<b>Students</b>	Miss Methaporn Somklang	59050472
	Miss Areeya Suwannarungsee	59050526
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
<b>Department</b>	Chemistry	
<b>Faculty</b>	Science	
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
<b>Academic Year</b>	2019	
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Montree Thongkam	

### Abstract

The catalyst for liquefied petroleum gas synthesis from syngas by using  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  with different weight ratio preparation methods. As  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$  catalyst was prepared by co-precipitation method of  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZnO}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in molar ratio of 4.5:4.5:1. After  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  catalysts were prepared by physical mixing in weight ratio 1:1 (0.2516:0.2510g) 2:1 (0.3346:0.1723g) 3:1 (0.3750:0.1250g) and 1:2 (0.1710:0.3300g), the catalysts were then used as a bifunctional catalyst for direct liquefied petroleum gas synthesis from synthesis gas ( $\text{H}_2 : \text{CO} = 2:1$ ), that had flow rate 20 mL/min with following the condition at temperature  $350^\circ\text{C}$  and high pressure 40 bar. It was found that the  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  catalyst prepared by physical mixing in ratio 2:1 by weight dominated CO conversion percentage, LPG selectivity percentage and LPG yield percentage of 86.97 mol%, 47.63 mol% and 41.45 mol% respectively.

**Keywords :** Co-precipitation, Physical mixing, Liquefied petroleum gas,  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$ , Zeolite HZSM-5

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์และความกรุณาจากคณะอาจารย์และบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ อาจารย์ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ช่วยแนะนำและให้คำปรึกษารวมถึงเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหา ตลอดจนถ่ายทอดประสบการณ์ในการทำงานของท่านเพื่อเป็นประโยชน์ในการคิดวิเคราะห์ การวางแผนในโครงการนี้ โดยท่านได้ให้คำปรึกษาตั้งแต่การค้นหาข้อมูลจนการทำงานวิจัยสำเร็จ รวมทั้งตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร และ ผศ.ดร.กฤษฎ์ สาตอ่อน ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษ อีกทั้งยังให้ความรู้ คำแนะนำและช่วยตรวจสอบแก้ไขให้โครงการพิเศษเล่มนี้ออกมาสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ จนสามารถนำความรู้มาประยุกต์ใช้ในโครงการพิเศษนี้ได้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดาและบุคคลในครอบครัว รวมทั้งเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษนี้

เมธาพร โสมกลาง

อารียา สุวรรณรังษี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>4</b>
2.1 แก๊สสังเคราะห์.....	4
2.1.1 กระบวนการรีฟอร์มมิง.....	4
2.1.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	4
2.2 แก๊สซิโตรเลียมเหลว.....	6
2.2.1 คุณสมบัติทางเคมี.....	6
2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ.....	7
2.2.3 แหล่งที่มาของแก๊สซิโตรเลียมเหลว.....	11
2.2.4 การสังเคราะห์แก๊สซิโตรเลียมเหลว.....	13
2.2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการสังเคราะห์แก๊สซิโตรเลียมเหลว .....	15
2.3 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับสังเคราะห์แก๊สซิโตรเลียมเหลว.....	17
2.3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิง.....	17
2.3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์.....	18
2.4 การใช้ประโยชน์แก๊สซิโตรเลียมเหลวในด้านต่าง ๆ .....	19
2.4.1 การใช้งานแก๊สซิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง .....	19
2.4.2 การใช้งานแก๊สซิโตรเลียมเหลวในภาคอุตสาหกรรม .....	19
2.4.3 การใช้งานแก๊สซิโตรเลียมเหลวในภาคเกษตรกรรม .....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีสำหรับการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลว.....	20
2.5.1 โลหะว่องไว .....	20
2.5.2 ตัวรองรับ.....	20
2.5.3 ตัวสนับสนุน .....	20
2.5.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	21
2.6 คอปเปอร์ออกไซด์ .....	21
2.6.1 ความรู้เกี่ยวกับคอปเปอร์ออกไซด์.....	21
2.6.2 สมบัติทางกายภาพของคอปเปอร์ออกไซด์.....	22
2.7 ซิงค์ออกไซด์ .....	22
2.7.1 ความรู้เกี่ยวกับซิงค์ออกไซด์.....	22
2.7.2 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์.....	23
2.8 อะลูมิเนียมออกไซด์.....	24
2.8.1 ความรู้เกี่ยวกับอะลูมิเนียมออกไซด์.....	24
2.8.2 สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมออกไซด์ .....	24
2.9 ซีโอไลต์.....	25
2.9.1 ความรู้เกี่ยวกับซีโอไลต์ .....	25
2.9.2 สมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์ .....	26
2.10 เทคนิคในการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาและเครื่องมือที่ใช้.....	27
2.10.1 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	27
2.10.2 เทคนิคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	28
2.10.3 เทคนิคการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม.....	29
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
2.11.1 Synthesis of LPG from synthesis gas.....	30
2.11.2 High performance Cu-ZnO/Pd $\beta$ catalysts for syngas to LPG.....	30
2.11.3 Synthesis of LPG via DME from syngas in two-stage reaction system .....	31
2.11.4 Stability of CuZnOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /HZSM-5 catalysts in dimethyl ether steam reforming operating in reaction-regeneration cycles.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11.5 Direct syngas conversion to liquefied petroleum gas: Importance of a multifunctional metal-zeolite interface.....	32
2.11.6 Direct synthesis of LPG from syngas derived from air-POM .....	32
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>33</b>
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	33
3.2 แก๊สและสารเคมี.....	34
3.3 วิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	34
3.4 วิธีการเตรียมซีโอไลท์ชนิด HZSM-5.....	36
3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	36
3.5.1 การอัดเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา.....	36
3.5.2 การสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวโดยตรง.....	37
3.6 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	39
3.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน .....	39
3.6.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค .....	39
3.6.3 การวิเคราะห์การแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม.....	40
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>41</b>
4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	34
4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน .....	41
4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค .....	43
4.1.3 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ.....	46
4.2 การศึกษาผลการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	51
4.2.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนนอกไซด์.....	52
4.2.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด.....	54
4.2.3 ร้อยละผลติดกันท์.....	58
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>62</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	63
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า	
เอกสารอ้างอิง.....	64
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก .....	69
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง .....	70
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	83
ภาคผนวก ค การคำนวณค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด.....	85
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ .....	94
ภาคผนวก จ กลไกการสังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน.....	98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของแก๊สปีโตรเลียมเหลวและเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ .....	7
2.2 ค่าความหนืดของแก๊สปีโตรเลียมเหลว.....	8
2.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก๊สปีโตรเลียมเหลว .....	9
4.1 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก .....	47
4.2 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก .....	48
4.3 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก .....	49
4.4 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 1:2 (0:1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก .....	50
4.5 ผลการวิเคราะห์ร้อยละธาตุแต่ละชนิดที่ปรากฏบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก.....	51
4.6 ผลการคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการทำ ปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	53
4.7 ผลการคำนวณร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของแก๊สปีโตรเลียมเหลวกับเวลาที่ใช้ใน การทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	55
4.8 ผลการคำนวณร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์กับเวลาที่ใช้ในการ ทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	56
4.9 ผลการคำนวณร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของเมทานอลกับเวลาที่ใช้ในการทำ ปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ผลการคำนวณร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไฮโดรคาร์บอนกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	58
4.11 ผลการคำนวณร้อยละผลผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	59
4.12 ผลการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวโดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .	60
ก.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก .....	70
ก.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก .....	71
ก.3 ร้อยละผลผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก .....	72
ก.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก .....	73
ก.5 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก .....	74
ก.6 ร้อยละผลผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346กรัม:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก .....	75
ก.7 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1	

เอกสารนี้เป็น (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก เมื่อการศึกษานี้ยังไม่สมบูรณ์ให้แก้ไขได้ประโยชน์ได้ 76 การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.8 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก .....	77
ก.9 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก .....	78
ก.10 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก .....	79
ก.11 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก .....	80
ก.12 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก .....	81
ก.13 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดและ ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปีโตรเลียมที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียม ออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน.....	82

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พันธะเคมีของกลุ่มไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbon).....	6
2.2 พันธะเคมีของกลุ่มไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon).....	7
2.3 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่นน้ำมัน .....	13
2.4 กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ .....	14
2.5 โครงสร้างทางเคมีของซีโอไลต์ .....	16
2.6 โครงสร้างและลักษณะโพรงของ ZSM-5 .....	17
2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor).....	18
2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชซ์ (fluidized-bed reactor).....	18
2.9 ลักษณะคอปเปอร์ออกไซด์ .....	22
2.10 ลักษณะของซิงค์ออกไซด์ .....	23
2.11 ลักษณะอะลูมิเนียมออกไซด์ .....	24
2.12 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5.....	26
2.13 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ .....	28
2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29
2.15 ส่วนประกอบของเครื่อง gas chromatography .....	30
3.1 การติดตั้งเครื่องมือในขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	35
3.2 การเตรียมตัวโลหะวงไวคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ .....	35
3.3 ผงตะกอน.....	36
3.4 ชุดอุปกรณ์เครื่องอัดเม็ด .....	36
3.5 การอัดเม็ดและคัดขนาด .....	37
3.6 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor).....	38
3.7 ขั้นตอนการสังเคราะห์และตรวจวัดแก๊สปีโตรเลียมเหลว.....	40
4.1 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์เทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของคอปเปอร์ออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์.....	42
4.2 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 .....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ถูกเตรียม 4 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก เทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของคอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 .....	43
4.4 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่กำลังขยาย 20000 เท่า .....	44
4.5 รูปร่างสัณฐานวิทยาของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 กำลังขยาย 10000 เท่า .....	44
4.6 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 .....	45
4.7 Map Spectrum CuOZnOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก .....	47
4.8 Map Spectrum CuOZnOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก .....	48
4.9 Map Spectrum CuOZnOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก .....	49
4.10 Map Spectrum CuOZnOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0:1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก .....	50
4.11 กราฟแสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	53
4.12 กราฟแสดงค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	54
4.13 กราฟแสดงค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นโดเมทิลอีเทอร์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	55
4.14 กราฟแสดงค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นเมทานอลกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟแสดงค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	57
4.16 กราฟแสดงค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของแก๊สปีโตรเลียมเหลวกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก .....	59
ก.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก .....	70
ก.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก .....	71
ก.3 ร้อยละผลผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก .....	72
ก.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก .....	73
ก.5 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก .....	74
ก.6 ร้อยละผลผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก .....	75
ก.7 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก .....	76
ก.8 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก .....	77
ก.9 ร้อยละผลผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก .....	78

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.10 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก .....	79
ก.11 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก .....	80
ก.12 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก .....	81
จ.1 กลไกของปฏิกิริยาสังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนโดยการเติมไฮโดรเจนในแก๊สคาร์บอนมอน นอกไซด์ .....	98
จ.2 กลไกของปฏิกิริยาสังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนโดยการเติมไฮโดรเจนในแก๊สคาร์บอนมอน นอกไซด์และในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนร่วมและการผสมกันทางกายภาพในอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ได้แก่ 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม)

1.3.2 กระบวนการการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor) ภายใต้สภาวะดังนี้

1.3.2.1 รีดิซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย 5%  $H_2$  ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง

1.3.2.2 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา (reactor temperature) 350 องศาเซลเซียส

1.3.2.3 ความดัน (pressure) 40 บาร์

1.3.2.4 เวลาใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (reaction time) 4 ชั่วโมง

1.3.2.5 อัตราการไหล (flow rate) 20 มิลลิลิตรต่อนาที

1.3.2.6 ใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้น ( $H_2:CO = 2:1$ )

1.3.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกตรวจสอบด้วย off-line gas chromatography ที่มี detector แบบ FID (Flame Ionize Detector) และ TCD (Thermal Conductivity Detector)

1.3.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ทั้งหมดด้วยวิธีต่าง ๆ คือ

1.3.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

1.3.3.2 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3.3 ตรวจสอบปริมาณธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิคการกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เพื่อใช้ในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวได้

1.4.2 สามารถวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาได้

1.4.3 สามารถวิเคราะห์หาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของตัวเร่งปฏิกิริยาในการเร่งปฏิกิริยา เพื่อสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวได้

1.4.4 สามารถสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ที่เป็นเชื้อเพลิง พลังงานทดแทนในส่วนต่าง ๆ โดยไม่ก่อมลพิษกับสิ่งแวดล้อมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้นำเสนอเกี่ยวกับข้อมูลทางวิชาการของแก๊สปิโตรเลียมเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 วิธีการที่ใช้สังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.1 แก๊สสังเคราะห์ (synthesis gas) [ปวีณสุดา, 2555]

แก๊สสังเคราะห์ (synthesis gas) เป็นแก๊สที่มีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอนมอนอกไซด์และ ไฮโดรเจน ในสัดส่วนของแก๊สสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบเริ่มต้น แก๊สสังเคราะห์สามารถผลิตได้จากหลายกระบวนการ แต่กระบวนการที่มีความเป็นไปได้ที่จะใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ คือ กระบวนการ ความร้อนเคมี (thermo-chemical processes) เช่น กระบวนการรีฟอร์มมิง และกระบวนการแก๊ส ซิฟิเคชัน

#### 2.1.1 กระบวนการรีฟอร์มมิง (reforming processes)

ในกระบวนการรีฟอร์มมิงสามารถแบ่งออกได้เป็นอีกหลายกระบวนการย่อยขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการรีฟอร์มมิงหลัก ๆ ที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย คือกระบวนการรีฟอร์ม มิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) ซึ่งในกระบวนการนี้เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และไอน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งจะได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นสารผลิตภัณฑ์

กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide reforming or dry reforming) กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) และกระบวนการร่วมของ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำกับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (combined partial oxidation -steam reforming or autothermal reforming) โดยกระบวนการเหล่านี้จะผลิตแก๊สสังเคราะห์จากวัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นของเหลวหรือแก๊ส เช่น เอทานอล เมทานอล แก๊สธรรมชาติ แก๊สชีวภาพ และแก๊สหุงต้ม

#### 2.1.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification processes)

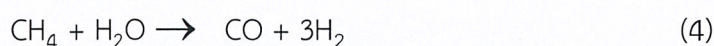
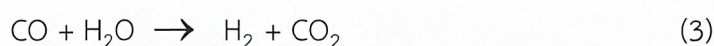
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการในการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง อาศัยหลักการการเผาไหม้ในภาวะที่มีอากาศจำกัด โดยทั่วไปกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันประกอบด้วย ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับอากาศ ออกซิเจน ไอน้ำ หรือของผสมของสารดังกล่าวข้างต้น ที่อุณหภูมิ สูงกว่า 700 องศาเซลเซียส แก๊สผลิตภัณฑ์หรือแก๊สสังเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงใน เอกสาร การผลิตกระแสไฟฟ้า ความร้อน หรือเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเคมีภัณฑ์ต่าง ๆ เชื้อเพลิงเหลว รวมทั้ง ก๊าซชีวภาพ และแก๊สซิฟิเคชัน

ไม่ว่า แก๊สเชื้อเพลิงนั้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงแข็งได้หลากหลายชนิด ปัจจุบันมีการนำมาใช้จริงในกระบวนการนี้ได้แก่ ถ่านหิน (coal) และสารชีวมวลชนิดต่าง ๆ เช่น แกลบ ชี้อ้อย เป็นต้น ถ้าเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลวที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไม่พึงประสงค์ เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ และถ้าจะถูกกำจัดออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเผาไหม้ซึ่งมีปริมาณอากาศมากเกินพอ กระบวนการแกซิฟิเคชันต้องการความร้อนไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ โดยส่วนใหญ่ความร้อนส่วนนี้ได้จากการเผาไหม้บางส่วนของเชื้อเพลิงแข็งเองโดยการป้อนอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ โดยปกติอากาศที่ป้อนจะไม่เกินร้อยละ 35 ของปริมาณอากาศที่ต้องการทางทฤษฎี ดังนั้นแก๊สที่ได้จึงมีความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการสูงส่งผลให้กระบวนการแยกหรือทำความสะอาดแก๊สมีประสิทธิภาพสูงด้วย กระบวนการแกซิฟิเคชันบางกระบวนการอาจใช้แหล่งความร้อนอื่นจากภายนอกทำให้ลดการสูญเสียเชื้อเพลิงแข็งเนื่องจากการเผาไหม้ รวมทั้งสามารถเพิ่มคุณค่าทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยการลดปริมาณไนโตรเจนจากอากาศที่ป้อน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งแก๊สเหล่านี้ถ้าออกมาพร้อมกับผลิตภัณฑ์แก๊สในปริมาณมากแล้วจะทำให้ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของแก๊สลดลง

กระบวนการแกซิฟิเคชันถ่านหินนั้นมีการพัฒนามาเป็นระยะเวลานานแล้ว โดยมีรายงานการทดลองเกี่ยวกับแกซิฟิเคชันครั้งแรกตั้งแต่ช่วงศตวรรษที่ 17 เป็นต้นมา มีรายงานระบุว่า โรงงานผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแห่งแรกจากกระบวนการแกซิฟิเคชันได้สร้างขึ้นที่ประเทศอังกฤษ เมื่อปีค.ศ. 1812 โดยบริษัท London and Westminster Chartered Gas, Light and Coke โดยผลิตแก๊สที่เรียกกันในสมัยนั้นว่า town gas หรือ water gas ซึ่งหมายถึงแก๊สจากการทำปฏิกิริยาของถ่านหินกับไอน้ำในเครื่องแกซิฟายเออร์ (gasifier) เครื่องแกซิฟายเออร์ที่พบในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะของการไหลของสารป้อนและสารร่วมทำปฏิกิริยาหรือแก๊สในเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed) หรือเบดเคลื่อนที่ (moving bed) เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed) และ เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผ่าน (entrained flow)

กระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลนั้นเริ่มจากการย่อยสลายสารประกอบลิกโนเซลลูโลสโดยใช้ความร้อนให้ออกมาเป็นถ่านชาร์และสารระเหยอื่น ๆ จากนั้นเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันของถ่านชาร์ขึ้นเพื่อเปลี่ยนชีวมวลเป็นแก๊สสังเคราะห์ตามขั้นตอน ดังสมการเคมีต่อไปนี้



กระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลนี้จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สในปริมาณมากและมีสิ่งเจือปนจากการเผาไหม้จำพวกถ่านในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

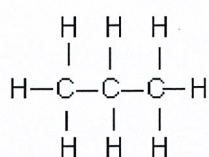
## 2.2 แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas) [กรมธุรกิจพลังงาน, 2551]

แก๊สปิโตรเลียมเหลว หมายถึง แก๊สไฮโดรคาร์บอนเหลว คือ โพรเพน โพรพิลีน นอร์มัลบิวเทน ไอโซบิวเทน หรือบิวทิลีน อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างผสมกันเป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปมักเรียกแก๊สปิโตรเลียมเหลวนี้อีกว่า ก๊าซ แก๊ส แก๊สเหลว หรือแก๊สหุงต้ม ส่วนในวงการค้าและอุตสาหกรรม ชื่อที่รู้จักกันดี คือ แอลพีแก๊ส (LP GAS) หรือ แอลพีจี (LPG) ซึ่งเป็นอักษรย่อ มาจาก Liquefied Petroleum Gas

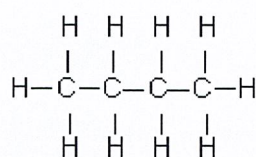
แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยทั่วไปมีสภาพเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ โดยมีน้ำหนัก ประมาณ 1.5 - 2 เท่าของอากาศ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแก๊สปิโตรเลียมเหลว การที่ชื่อว่าเป็นปิโตรเลียมเหลวนั้นเป็นเพราะแก๊สจะถูกอัดให้อยู่ในสภาพของเหลวภายใต้ความดันจนมีสถานะเป็นของเหลวเพื่อสะดวกต่อการเก็บและการขนส่ง แต่เมื่อลดความดันแก๊สเหลวนี้อาจกลายเป็นไอเพื่อสามารถนำมาใช้งานได้ ในประเทศไทยแก๊สหุงต้มส่วนใหญ่ได้จากการกลั่นน้ำมัน โดยใช้อัตราส่วนผสมของโพรเพนและบิวเทนประมาณ 70:30 ซึ่งจะให้ค่าความร้อนที่สูง เป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น เป็นแก๊สหุงต้มภายในครัวเรือน เชื้อเพลิงสำหรับการเกษตร การขนส่ง และเป็นเชื้อเพลิงสำคัญในกระบวนการอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งถือเป็นพลังงานทางเลือกอีกชนิด เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้งานง่ายราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับแหล่งเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ

### 2.2.1 คุณสมบัติทางเคมี

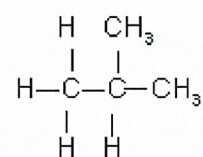
แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน ที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน (C) 3 อะตอม และคาร์บอน (C) 4 อะตอม ใน 1 โมเลกุล ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ประกอบด้วย โพรเพน (propane) โพรพิลีน (propylene) บิวเทน (butane) บิวทิลีน (butylene) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปรากฏอยู่ในส่วนผสมของแก๊สปิโตรเลียมเหลว อาจแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbon) ได้แก่ โพรเพน (propane) นอร์มัลบิวเทน (n-butane หรือ normal butane;  $nC_4$ ) และ ไอโซบิวเทน (iso-butane หรือ isobutane;  $iC_4$ ) เพราะมีพันธะเคมี จับตัวกันระหว่าง C และ H เป็นพันธะเดี่ยว ดังรูปที่ 2.1



Propane



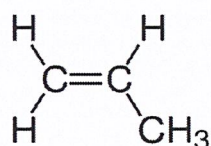
n-butane



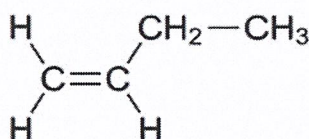
iso-butane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.1 พันธะเคมีของกลุ่มไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbon)  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

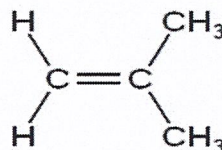
กลุ่มไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon) ได้แก่ โพรพิลีน (propylene), นอร์มัลบิวทิลีน (n-butylene) และ ไอโซบิวทิลีน (iso-butylene) ดังรูปที่ 2.2



Propylene



N-butylene



Iso-butylene

รูปที่ 2.2 พันธะเคมีของกลุ่มไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon)

### 2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ [จริญญา, 2550]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของแก๊สปิโตรเลียมเหลวและเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ [ปวีณสุดา, 2555]

คุณสมบัติ	LPG	Propane	Methanol	DME	Diesel oil
ความถ่วงจำเพาะ (20°C)	0.5	0.49	0.79	0.67	0.8 (10°C)
จุดเดือด (°C)	-50-0	-42	65	-25	180-370
ความดันไอ (atm, 25°C)	6.28	9.3	-	6.1	-
อุณหภูมิของจุดติดไฟ (°C)	410-580	460-580	440	350	250-340
ค่าพลังงานความร้อน (kcal/kg)	12,000	11,100	4,800	6,900	10,000
สูตรโครงสร้าง	C3-C4	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	C10-C20

#### 2.2.2.1 แก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่ออยู่ในสถานะเป็นของเหลว

##### (1) จุดเดือดและสภาวะวิกฤติ

เนื่องจากแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีจุดเดือดต่ำมาก คือ โพรเพน มีจุดเดือด เท่ากับ -42 องศาเซลเซียส นอร์มัลบิวเทนเท่ากับ -0.5 องศาเซลเซียส และไอโซบิวเทน เท่ากับ -11.7 องศาเซลเซียส ดังนั้น แก๊สปิโตรเลียมเหลวจึงมีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิปกติและความดันบรรยากาศ เว้นแต่จะถูกอัดให้เป็นของเหลวอยู่ในถังภายใต้ความดันหรือนำถังไปแช่เย็นเอาไว้ ค่าความดันที่ทำให้แอลพีจีเป็นของเหลว คือ ค่าความดันไอ (vapor pressure) เช่น ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความดันไอของโพรเพนเท่ากับ 7.3 บรรยากาศ และที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความดันไอก็จะสูงขึ้นด้วย โพรเพนที่อุณหภูมิ 96.67 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้อัดเท่ากับ 41.94 บรรยากาศ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้โพรเพนจะไม่เป็นของเหลว แม้จะอัดด้วยความดันมากกว่า 41.94 บรรยากาศก็ตาม อุณหภูมิ 96.67 องศาเซลเซียส และความดัน 41.94 บรรยากาศ คือ สภาวะวิกฤติสำหรับโพรเพน

## (2) ความหนาแน่น ปริมาตรจำเพาะและความถ่วงจำเพาะ

ความหนาแน่น คือ อัตราส่วนของน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเช่น ที่อุณหภูมิ 15.5 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของโพรเพนมีค่าเท่ากับ 507 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับส่วนกลับของความหนาแน่นคือ ปริมาตรจำเพาะ โพรเพนมีค่าปริมาตรจำเพาะเท่ากับ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะจะแสดงถึงอัตราส่วนของความหนาแน่นระหว่างแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งกับน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะของโพรเพนเหลวที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.5077 ส่วนนอร์มัลบิวเทน เท่ากับ 0.5844 และไอโซบิวเทน เท่ากับ 0.5631 ดังนั้นจากคุณสมบัติของแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะที่เป็นของเหลวซึ่งมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ความหนาแน่นของน้ำโดยประมาณ) แก๊สปิโตรเลียมเหลวจึงเบากว่าน้ำ

นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่อค่าความหนาแน่น คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของสารเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวจะลดลง

## (3) ความหนืด [น.ม.ล., 2557]

ความหนืด หรือความข้นใส คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล (ของเหลวหรือแก๊ส) ที่มีต่อภาชนะหรือท่อ ซึ่งของไหลต่างชนิดกันก็มีความหนืดแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าความหนืดของแก๊สปิโตรเลียมเหลว

โพรเพน	0.10 เซ็นติพอยท์ ที่ 20 องศาเซลเซียส
บิวเทน	0.16 เซ็นติพอยท์ที่ 20 องศาเซลเซียส
น้ำ	1.00 เซ็นติพอยท์ ที่ 20 องศาเซลเซียส

## (4) ความดันไอ

แก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่อบรรจุอยู่ในภาชนะปิดภายใต้ความดันจะมีสถานะเป็นของเหลว จะระเหยเป็นไอเต็มช่องว่างที่อยู่เหนือระดับส่วนที่เป็นของเหลวจนถึงจุดอิ่มตัว (saturation point) จึงจะหยุดระเหย ค่าความดันที่จุดอิ่มตัวนี้เรียกว่า “ค่าความดันไออิ่มตัว” ค่าความดันไออิ่มตัวเป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติการระเหย (volatility) ของสารนั้น ๆ ถ้าสารใดมีความดันไอสูงแสดงว่าสารนั้นสามารถระเหยได้เร็วและเป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิโดยตรง กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิสูง ค่าความดันไออิ่มตัวก็สูงขึ้นด้วย ที่อุณหภูมิของโพรเพน 0 องศาเซลเซียส จะมีค่าความดันเท่ากับ 4.5 บาร์ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 38 องศาเซลเซียส จะมีค่าความดันสูงขึ้นเป็น 14.5 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### (5) ความร้อนแฝงในการระเหย

ความร้อนแฝงในการระเหย คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยต่อหน่วยน้ำหนักของสาร เพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สที่จุดเดือดปกติ (ณ ความดันบรรยากาศ) หรือปริมาณความร้อนที่ต้องถูกดึงออกต่อหน่วยน้ำหนักของสาร เพื่อให้ได้กลิ่นตัวเป็นของเหลวที่ความดันบรรยากาศ และค่าความร้อนแฝงจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีค่าความร้อนแฝงน้อยกว่าน้ำมาก ดังนั้น เมื่อแก๊สถูกปล่อยออกจากภาชนะเก็บ แก๊สเหลวจะระเหย การที่แก๊สเหลวระเหยได้ต้องได้รับความร้อนหรือดึงความร้อนจากบริเวณใกล้เคียง ทำให้บริเวณที่ถูกดึงความร้อนไปจะมีความเย็นจัด เพราะฉะนั้นถ้าแก๊สเหลวรั่วมาถูกผิวหนังหรือส่วนหนึ่งส่วนใดของร่างกายจะทำให้ผิวหนังหรือส่วนของร่างกายนั้นได้รับความเย็นจัดจนถึงกับไหม้

### (6) ความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะ คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัตถุหนึ่งหน่วยน้ำหนักมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศา มีหน่วยเป็นกิโลแคลอรี/กิโลกรัม/องศาเซลเซียส หรือ บีทียู/ปอนด์/องศาฟาเรนไฮต์ เมื่ออยู่ในสถานะของเหลว ความดันคงที่ 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสค่าความร้อนจำเพาะของโพรเพนเท่ากับ 0.6023 นอร์มัลบิวเทนเท่ากับ 0.5748 ไอโซบิวเทนเท่ากับ 0.5824

### (7) สัมประสิทธิ์การขยายตัว

แก๊สปิโตรเลียมเหลวมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 15 องศาเซลเซียส สำหรับบิวเทน อุณหภูมิยิ่งสูงการขยายตัวก็ยิ่งมาก สามารถแยกแต่ละองค์ประกอบได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนั้น การบรรจุแก๊สปิโตรเลียมเหลวลงในถังจะต้องเหลือที่ว่างเหลือแก๊สเหลวไว้ โดยในส่วนของช่องว่างนี้จะมีไอแก๊สอยู่เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความดันที่เกิดการขยายตัวของของเหลวในกรณีที่แก๊สได้รับความร้อนผิดปกติ

ตารางที่ 2.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก๊สปิโตรเลียมเหลว

โพรเพน	0.00300 ต่อ 1 องศาเซลเซียส
บิวเทน	0.00200 ต่อ 1 องศาเซลเซียส
น้ำ	0.00015 ต่อ 1 องศาเซลเซียส

### 2.2.2.2 แก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่ออยู่ในสถานะเป็นแก๊ส

#### (1) ความหนาแน่น ปริมาตรจำเพาะและความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะของแก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่อเป็นแก๊สจะแสดงถึงอัตราส่วนของค่าความหนาแน่นระหว่างแก๊สกับอากาศที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน เป็นตัวเลขที่ชี้ให้เห็นว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่อเป็นแก๊สจะหนักเป็นกี่เท่าของอากาศ (เมื่อความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1) ที่อุณหภูมิ 15.5 องศาเซลเซียส (60 องศาฟาเรนไฮต์) ณ ความดันบรรยากาศ โพรเพนมีค่าความถ่วงจำเพาะเมื่อเป็นแก๊ส เท่ากับ 1.5 บิวเทนมีค่าความถ่วงจำเพาะเมื่อเป็นแก๊สเท่ากับ 2.0 ดังนั้น

แก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะที่เป็นแก๊สจะหนักกว่าอากาศ เมื่อเกิดการรั่วไหลขึ้นแก๊สจะไปรวมตัวอยู่ในที่ต่ำ นอกจากนี้ค่าความหนืดของแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะของแก๊สจะมีความหนืดสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

#### (2) ช่วงการลุกไหม้

แก๊สที่สันดาปได้จะมีช่วงส่วนผสมกับอากาศเพียงช่วงเดียวที่จุดไฟแล้วลุกไหม้ได้เนื่องจากมีอากาศผสมอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะ ช่วงการลุกไหม้ได้จะแสดงค่าเป็นอัตราส่วนร้อยละปริมาตรแก๊สต่ออากาศ ค่าทางด้านความเข้มข้นสูงของช่วงการลุกไหม้ เรียกว่าค่าขอบบน Higher Explosion Limit (U.E.L) ส่วนทางด้านต่ำเรียกว่าค่าขอบล่าง Lower Explosion Limit (L.E.L) แก๊สปิโตรเลียมเหลวจะสามารถลุกไหม้หรือติดไฟได้ก็ต่อเมื่อมีแก๊สผสมอยู่ในอากาศ 2-9% คือ ถ้ามีแก๊สปิโตรเลียมเหลวต่ำกว่า 2 ส่วนหรือมากกว่า 9 ส่วนในส่วนผสมของแก๊สกับอากาศ 100 ส่วน ส่วนผสมนั้นก็จะมีติดไฟ

#### (3) อุณหภูมิของจุดติดไฟ

เมื่อค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิให้กับเชื้อเพลิงจนเลยอุณหภูมิค่าหนึ่งแล้ว เชื้อเพลิงก็จะเริ่มลุกไหม้เอง แม้จะไม่มีประกายไฟหรือสาเหตุของการติดไฟ อุณหภูมิต่ำสุดที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ตามธรรมชาตินี้เรียกว่า อุณหภูมิของจุดติดไฟ (ignition temperature) เนื่องจากอุณหภูมิจุดติดไฟของโพรเพนคือ 460-580 องศาเซลเซียส และของบิวเทนคือ 410-550 องศาเซลเซียส ดังนั้น แก๊สปิโตรเลียมเหลวจึงติดไฟได้ยากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซินซึ่งมีจุดติดไฟ 280-430 องศาเซลเซียส และน้ำมันดีเซล 250-340 องศาเซลเซียส ดังนั้นแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีความปลอดภัยสูงในประเด็นการจุดติดไฟได้เอง

#### (4) อุณหภูมิของเปลวไฟ

อุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวสูงมากพอที่จะหลอมโลหะต่าง ๆ ได้ เช่น หลอมเหล็ก ทองเหลือง อะลูมิเนียม และแก้ว เป็นต้น โดยโพรเพน มีอุณหภูมิของเปลวไฟในอากาศ 1,930 องศาเซลเซียส และบิวเทน 1,900 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับงานอุตสาหกรรมหลอมโลหะ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการอบเครื่องเคลือบดินเผา อบสี ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### (5) ค่าออกเทน

แก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะแก๊สมีค่าออกเทนสูงประมาณ 95-110 ซึ่งสูงกว่าค่าออกเทนของน้ำมันเบนซินจึงเหมาะกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงของรถยนต์

#### (6) อัตราส่วนปริมาตรของเหลวต่อแก๊ส

แก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่อระเหยและเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สปริมาตรจะเปลี่ยนไปอย่างมาก ที่อุณหภูมิ 15.5 องศาเซลเซียส (60 องศาฟาเรนไฮต์) โพรเพนเหลว 1 หน่วยปริมาตร เมื่อกลายเป็นแก๊สจะมีปริมาตรเป็น 274 หน่วย ส่วนบิวเทนเหลว 1 หน่วยปริมาตร เมื่อกลายเป็นแก๊สจะมีปริมาตร 233 หน่วย ดังนั้น แก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะที่เป็นของเหลว ถ้ารั่วออกมาจะอันตรายมากกว่าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยผู้จัดทำขึ้นและจะเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแก๊ส เพราะปริมาณที่ออกมาเป็นของเหลวเมื่อกลายเป็นแก๊สจะเพิ่มปริมาตรมากขึ้น การขยายตัวนี้ทำให้มีโอกาสพบประกายไฟได้มาก ความอันตรายและความรุนแรงย่อมมีมาก

#### (7) ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สที่มีส่วนผสมอยู่ในอากาศร้อยละ 21 โดยปริมาตรและเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ ดังนั้นปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้จะต้องมีปริมาณที่แน่นอน ในกรณีที่แก๊สปิโตรเลียมเหลวเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมดก็จะกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เขียนสมการเคมีได้ดังต่อไปนี้



จากสมการ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะเป็น 5 เท่า ในกรณีของโพรเพน และ 6.5 เท่า ในกรณีของบิวเทน เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในอากาศมีประมาณร้อยละ 21 ดังนั้นในการเผาไหม้โพรเพนอย่างสมบูรณ์ 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้อากาศ 24 ลูกบาศก์เมตร ส่วนบิวเทน 1 ลูกบาศก์เมตร จะใช้อากาศ 31 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซินแล้วแก๊สปิโตรเลียมเหลวต้องการปริมาณอากาศมากกว่าเล็กน้อย

#### (8) ค่าความร้อนของการเผาไหม้

ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของแก๊สปิโตรเลียมเหลว หมายถึง ค่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการนำเอาแก๊สปิโตรเลียมเหลวหนึ่งหน่วยน้ำหนัก หรือหนึ่งหน่วยปริมาตรมาเผาไหม้ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ค่าความร้อนของการเผาไหม้แก๊สปิโตรเลียมเหลวประมาณ 10,000-12,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

#### (9) สี กลิ่น และการละลาย

แก๊สปิโตรเลียมเหลวบริสุทธิ์ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตแก๊สปิโตรเลียมเหลวจึงต้องเติมสารประกอบที่มีกลิ่นฉุนลงไปด้วย เพื่อให้ผู้ใช้รู้ตัวเมื่อแก๊สเกิดการรั่วไหล หรือผู้ใช้ลิ้มปิตวาล์วแก๊ส สารประกอบที่เติมลงไปเพื่อทำให้แก๊สปิโตรเลียมเหลวมีกลิ่นเป็นสารประเภทเอทิลเมอร์แคปแทน อีกทั้งแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลาย (solvent) เช่นเดียวกับพวกน้ำมันระเหย จึงสามารถละลายหรือทำให้อุปกรณ์ที่ทำมาจากยางธรรมชาติเสียคุณสมบัติได้ เช่น ปะเก็น หรือซีลต่าง ๆ ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้กับถังที่บรรจุแก๊สปิโตรเลียมเหลวควรใช้วัสดุอื่นที่ไม่ได้ทำมาจากยางธรรมชาติ เช่น ยางสังเคราะห์ เป็นต้น

### 2.2.3 แหล่งที่มาของแก๊สปิโตรเลียมเหลว [กรมธุรกิจพลังงาน, 2551]

#### 2.2.3.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่นน้ำมัน

กระบวนการนี้จะได้แก๊สโพรเพนและบิวเทนประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ของกระบวนการกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
น้ำมันดิบ ก่อนที่จะนำน้ำมันดิบเข้ากลั่นต้องแยกน้ำและเกลือแร่ที่ปนอยู่ออกเสียก่อน จากนั้นน้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันดิบมาให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 340-400 องศาเซลเซียส จากนั้นจะถูกส่งเข้าสู่หอกลั่น ซึ่งภายในประกอบด้วยถาด (tray) เป็นชั้น ๆ ไอร้อนที่ลอยขึ้นไป เมื่อเย็นตัวลงจะกลั่นตัวเป็นของเหลวบนถาดตามชั้นต่าง ๆ และจะอยู่ชั้นใดขึ้นอยู่กับช่วงจุดเดือด ถ้าจุดเดือดต่ำจะลอยขึ้นสู่ด้านบนของหอกลั่น ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นแก๊ส (มีแก๊สปิโตรเลียมเหลวรวมอยู่ด้วย) ส่วนไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดปานกลางและสูงก็จะแยกตัวออกมาทางตอนกลางและตอนล่างของหอกลั่น ซึ่งได้แก่ แนพทา (naphtha) น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา ตามลำดับ

ไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นแก๊สที่ออกจากด้านบนของหอกลั่นสามารถเรียกรวมว่า “แก๊สปิโตรเลียม” ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 1 อะตอม ถึง 4 อะตอม และมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ไนโตรเจน ( $N_2$ ) ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และแก๊สอื่น ๆ ปนอยู่ จำเป็นต้องกำจัดหรือแยกออกโดยนำแก๊สปิโตรเลียมผ่านเข้าหน่วยแยกแก๊สปิโตรเลียมเหลว (gas recovery unit) เพื่อแยกเอาโพรเพนและบิวเทนออกมา จากนั้นแก๊สปิโตรเลียมเหลวจะถูกส่งเข้าหน่วยฟอกซึ่งใช้โซดาไฟ (caustic soda) เพื่อแยกเอากรด (acid gas) ต่าง ๆ ออก เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เป็นต้น หลังจากนั้นแก๊สปิโตรเลียมเหลวจะถูกส่งไปเก็บในถังเก็บและมีสภาพเป็นของเหลวภายใต้ความดัน

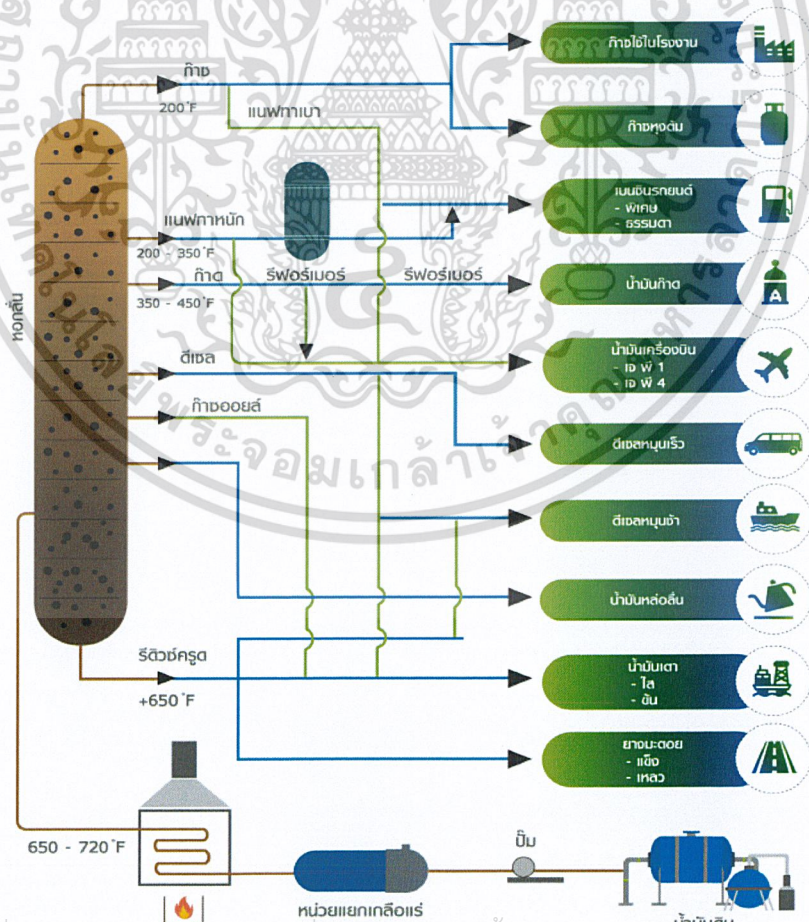
### 2.2.3.2 กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ

แก๊สธรรมชาติที่นำขึ้นมาจากแหล่งขุดเจาะจากแหล่งธรรมชาติแล้วขนส่งทางท่อเข้าสู่โรงแยกแก๊ส (gas separation plant) เพื่อทำการแยกไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในแก๊สธรรมชาติออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ คือ มีเทน (methane) อีเทน (ethane) โพรเพน (propane) บิวเทน (butane) แก๊สปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas) และแก๊สโซลีนธรรมชาติ (Natural gasoline, NGL) กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติเริ่มต้นด้วยการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และน้ำที่เจือปนอยู่ในแก๊สธรรมชาติออกก่อนโดยกระบวนการ benfield ซึ่งใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) เป็นตัวจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และกระบวนการดูดซับ (absorption process) โดยใช้วัสดุจำพวก molecular sieve ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุน ทำหน้าที่ดูดซับน้ำ แก๊สธรรมชาติที่แห้งจากหน่วยนี้จะผ่านเข้าไปใน turbo-expander เพื่อลดอุณหภูมิจาก 250 เคลวิน เป็น 170 เคลวิน และลดความดันลง จาก 43 บาร์ เป็น 16 บาร์ ก่อนแล้วจึงเข้าสู่หอแยกมีเทน (de-methanizer) มีเทนจะถูกกลั่นแยกออกไป และส่วนที่เหลือคือส่วนผสมของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป (ethane plus stream) ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวและจะออกทางส่วนล่างของหอ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหอตั้งกล่าวจะถูกนำเข้าสู่หอแยกอีเทน (de-methanizer) และหอแยกโพรเพน (de-propanizer) เพื่อแยกอีเทนและโพรเพนออกตามลำดับต่อไป ในหอแยกโพรเพนนี้ โพรเพนจะถูกแยกออกทางด้านบนของหอ ส่วนแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่เป็นส่วนผสมของโพรเพนและบิวเทนจะถูกแยกออกมาจากส่วนกลางของหอ และส่วนผลิตภัณฑ์ที่ออกจากหอทางด้านล่างคือ แก๊สโซลีนธรรมชาติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(natural gasoline) สำหรับผลผลิตแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่ได้จากกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาตินี้จะมีแก๊สโพรเพนและบิวเทนในก๊าซธรรมชาติประมาณ 6-10%

#### 2.2.4 การสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว [วิทวัส, 2557]

การผลิตแก๊สปิโตรเลียมเหลวในประเทศจะมาจากสองแหล่งคือ ผลิตจากการกลั่นน้ำมันดิบ ดังรูปที่ 2.3 และจากกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีต้นทุนในกระบวนการแยกสูง ดังนั้นในปัจจุบันนักวิจัยจึงพยายามคิดค้นวิธีการให้ได้มาซึ่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยอาศัยการเปลี่ยนแก๊สธรรมชาติโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการทดลองโดย Ma และคณะ สังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งโดยให้เกิดปฏิกิริยาผ่านไดเมทิลอีเทอร์ที่มี Cu-Zn-Al/ZSM-5 และซีโอไลต์ Y เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้มีการศึกษาอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แก๊สแอลพีจีแก๊สปิโตรเลียมเหลว และวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าที่อุณหภูมิ 335 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นโพรเพนและบิวเทนในปริมาณมากที่สุดสำหรับช่วงความดันที่เหมาะสมคือ 1-2 MPa ซึ่งปริมาณของโพรเพนและบิวเทนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

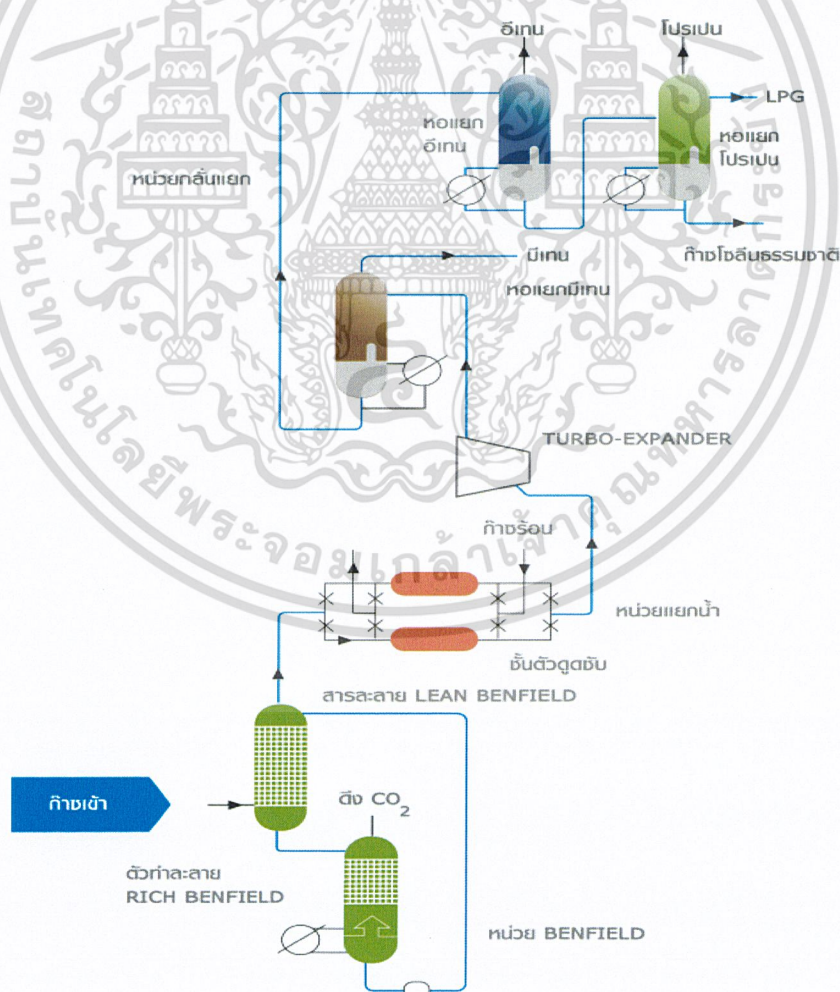


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่นน้ำมัน

Ge และคณะ ทดลองสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์โดยมี CuZnO/Pd- $\beta$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลคือ ชนิดของซีโอไลต์ สัดส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาใน Pd- $\beta$  ขนาดอนุภาคของ Pd- $\beta$  ปริมาณ Pd ใน Pd- $\beta$  และภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลว พบว่าการสังเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 325-350 องศาเซลเซียส ความดัน 2.1-3.6 เมกกะปาสคาล และอัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์เข้า 4.5-9 กรัมชั่วโมงต่อโมล ให้ค่าการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 72.2 ค่าร้อยละผลได้ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 45.3 และมีค่าการเลือกเกิดแก๊สปีโตรเลียมเหลวสูงถึงร้อยละ 78.0

Khadecar และคณะ สังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวจากเมทานอลผ่านไดเมทิลอีเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ซึ่งมีความจำเพาะต่อการเกิดแก๊สปีโตรเลียมเหลวได้ดี ทั้งนี้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาก็มีผลต่อความจำเพาะของ ZSM-5 อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่ทำให้มีค่าร้อยละการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของเมทานอลและไดเมทิลอีเทอร์สูงสุดคือ 50 และ 90 ตามลำดับ ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการป้อนสารและการทำปฏิกิริยามีอัตราการป้อนแก๊ส 20,000-30,000 ต่อชั่วโมง อุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส และความดันที่ไข่มากกว่า 450 กิโลปาสคาล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.4 กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ (syngas) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการแปลงแก๊สธรรมชาติให้มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น สามารถทำได้ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไฮบริดซึ่งประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์เมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่เป็นซีโอไลต์ ปฏิกิริยาของการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวประกอบด้วยการสังเคราะห์เมทานอล การขจัดน้ำของเมทานอลเพื่อให้ได้ไดเมทิลอีเทอร์ (DME) และการขจัดน้ำของไดเมทิลอีเทอร์ได้เป็นไฮโดรคาร์บอน การสังเคราะห์เมทานอลในปฏิกิริยาเป็นขั้นกำหนดอัตรา ในขณะที่ไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปฏิกิริยาอาจเป็นพาราฟิน โอลีฟิน อะโรมาติก ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ที่เป็นองค์ประกอบของแก๊สปิโตรเลียมเหลวปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนของคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นเมทานอล และปฏิกิริยา water-gas shift โดยแสดงได้ดังปฏิกิริยาที่ 2.1 2.2 2.3 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

### ปฏิกิริยาหลัก

Methanol synthesis:



Methanol dehydration:



DME dehydrogenation:



### ปฏิกิริยาข้างเคียง

Carbon dioxide hydrogenation:



Water-gas Shift reaction (WGSR):



## 2.2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว [นฤมล, 2557]

### 2.2.5.1 คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์ (CuOZnO)

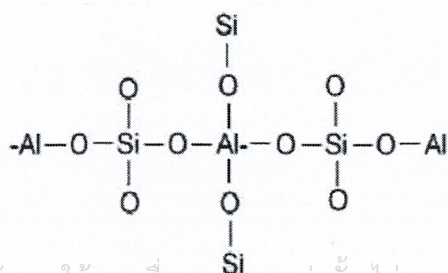
การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ในอุตสาหกรรมมีความแพร่หลาย เนื่องจากคอปเปอร์มีขนาดเล็กส่งผลให้มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนสูง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์มีความว่องไวและเสถียรภาพสำหรับการสังเคราะห์เมทานอลจากแก๊สสังเคราะห์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์มีสมบัติเร่งปฏิกิริยาการเกิดเมทานอลได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เพอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของโลหะคอปเปอร์ (Cu) ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการเกิดเมทานอล องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ประกอบด้วยรูปภาพของโลหะคอปเปอร์ (Cu) และรูปภาพของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยตำแหน่งกัมไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ ได้แก่ คอปเปอร์ไอออน ( $\text{Cu}^+$ ) ที่มีเสถียรภาพบนตำแหน่งเตตระฮีดรอลของวัฏภาคซิงค์ออกไซด์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของคอปเปอร์ต่อซิงค์สูงจะมีความว่องไวสูงในการสังเคราะห์เมทานอล เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่แข็งแรง และมีการกระจายตัวของอะตอมทั้งสองที่ดี ซึ่งภาวะในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น อัตราส่วนโดยโมลระหว่างคอปเปอร์และซิงค์ (Cu/Zn molar ratio) อุณหภูมิการเผา (calcination temperature) นอกจากนี้ประเภทของ precipitant จะมีผลต่อการกระจายตัวและขนาดอนุภาคของคอปเปอร์

### 2.2.5.2 ซีโอไลต์ (zeolite) [สุตารัตน์, 2557]

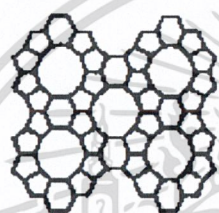
ซีโอไลต์ (zeolite) ซีโอไลต์ มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก คือ zeo ซึ่งแปลว่าเดือด และ lithos แปลว่าหิน เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนซีโอไลต์จะปลดปล่อยไอน้ำออกมา และซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำกลับคืนได้ง่าย กล่าวคือเป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) เป็นโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบที่ประกอบด้วยหน่วยที่เล็กที่สุดคือ  $\text{SiO}_4$  และ  $\text{AlO}_4$  ซึ่งใช้อะตอมออกซิเจนร่วมกัน เมื่อมีการแทนที่  $\text{Si}^{4+}$  ด้วย  $\text{Al}^{3+}$  จะทำให้เกิดประจุลบขึ้นตามจำนวนอะตอมที่ถูกแทนที่ ดังนั้นจึงต้องมีไอออนบวกมาดุลประจุลบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นไอออนบวกของโลหะ โดยซีโอไลต์มีการจัดเรียงโครงสร้างแบบสามมิติ ประกอบด้วยอะตอมของ Si (หรือ Al) 1 อะตอม และออกซิเจน 4 อะตอม ( $\text{SiO}_4^{-4}$  หรือ  $\text{AlO}_4^{-3}$ ) โดยมีการเชื่อมต่อของอะตอมออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือเป็น โคพอลิเมอร์ (copolymer) โครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบเตตระฮีดรอล ( $\text{TO}_4$ ) โดย T แทน Si หรือ Al โดยอะตอม Si (หรือ Al) อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างที่เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระเบียบ มีขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งตำแหน่งของอะลูมินาจะทำให้เกิดประจุลบซึ่งสามารถทำให้ประจุสมดุลด้วยประจุบวกของธาตุหมู่ 1 และหมู่ 2 หรือทำการแลกเปลี่ยนประจุเพื่อเกิดเป็นซีโอไลต์ชนิดที่มีโปรตอน ซีโอไลต์มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{M}_n\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$  เมื่อ n = คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) โดยมาก เท่ากับ 1 และ 2 ของโลหะอัลคาไลน์ หรือ โลหะอัลคาไลน์เอิร์ท ตามลำดับ x = คือ จำนวนโมลของ  $\text{SiO}_2$  โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 และ y = คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์



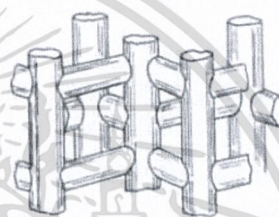
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของซีโอไลต์ [สุตารัตน์, 2557]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6 ซีโอไลต์เป็นสารที่มีความเป็นผลึกและมีรูพรุนทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีจำนวนมาก มีความจำเพาะต่อการคัดเลือกสารในการเกิดปฏิกิริยา ซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนประจุเพื่อทำให้เกิดตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา สามารถดูดซับแก๊สและไอน้ำ มีความทนทานต่อความร้อนและสารเคมี นอกจากนี้ยังมีอะตอมของอะลูมิเนียมเจืออยู่ภายในโครงสร้างโดยจะแทนที่ตำแหน่งของอะตอมซิลิกอนบางตำแหน่งซึ่งอะลูมิเนียมที่ตำแหน่งดังกล่าวจะทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นกรดและเป็นตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพสูง ความแตกต่างกันในองค์ประกอบโครงสร้างหลัก ขนาดและรูปร่างของรูพรุน ทำให้ซีโอไลต์แต่ละชนิดมีสมบัติและการประยุกต์ใช้รวมถึงความจำเพาะต่อปฏิกิริยาเคมีมีความแตกต่างกัน จากสมบัติที่เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมีในปัจจุบัน



(ก.)



(ข.)

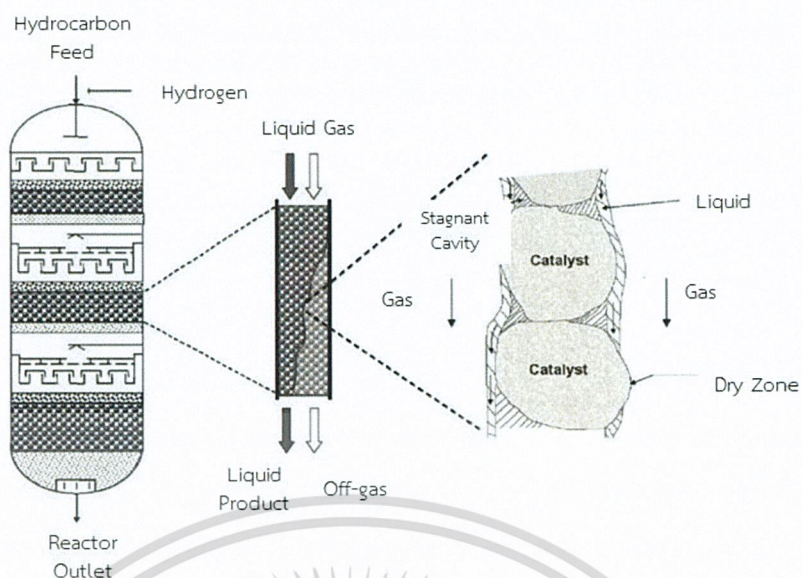
รูปที่ 2.6 (ก) โครงสร้างของ ZSM-5 และ (ข) ลักษณะโพรง ZSM-5

## 2.3 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว

### 2.3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานง่ายและราคาถูก จึงเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยในระบบดังกล่าวมีข้อจำกัดการแพร่ระหว่างเฟส โดย Gas-Solid Contractor การใช้เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งเป็นทางเลือกที่ทำให้อุณหภูมิตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ตั้งแต่ทางเข้าจนถึงทางออกมีความเหมาะสม เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ถูกออกแบบอย่างง่าย โดยให้มีการบรรจุสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องแบบคงที่ ดังนั้นสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ขณะที่มีการให้ความร้อน จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ผลิตภัณฑ์จึงไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง เมื่อเกิดปฏิกิริยาเสร็จสิ้นแล้วจึงทำการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งออกจากเครื่องปฏิกรณ์ แล้วจึงใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่เพื่อทำปฏิกิริยาอื่น ๆ ต่อไป เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

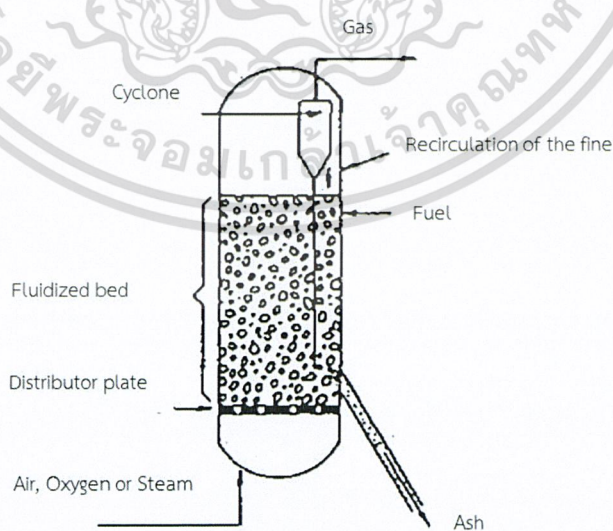
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (fixed-bed reactor) [Azizi et al., 2014]

### 2.3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์

เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์ (fluidized-bed reactor) ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์นี้สามารถกำจัดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดี สามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการชนกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ทำให้เกิดการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์ (fluidized-bed reactor) [Azizi et al., 2014]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นแบบฉบับจะแจ้งคืนตามการคำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การใช้ประโยชน์แก๊สปิโตรเลียมเหลวในด้านต่าง ๆ [สำนักงานปลัดกระทรวงพลังงาน, 2561]

### 2.4.1 การใช้งานแก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

#### 2.4.1.1 ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

เนื่องด้วยแก๊สปิโตรเลียมเหลวสามารถให้ความร้อนได้มากกว่า 1900 องศาเซลเซียส จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับในครัวเรือน รวมถึงข้อดีในด้านอื่น เช่น ราคาถูก สะดวกปลอดภัยและสามารถหาซื้อได้ง่าย

#### 2.4.1.2 ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการขนส่ง

ปัจจุบันมีการนำแก๊สปิโตรเลียมเหลวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงอื่นที่มีราคาสูง เช่น น้ำมันดีเซล และน้ำมันเบนซิน ทั้งในเครื่องยนต์รถยนต์ เรือ เนื่องจากราคาถูกกว่าและมีค่าออกเทนสูงกว่า แต่มีข้อเสียคือความร้อนที่สูงจะส่งผลเสียต่อห้องเครื่องและอุปกรณ์อื่น ๆ ของเครื่องยนต์ได้ง่าย

### 2.4.2 การใช้งานแก๊สปิโตรเลียมเหลวในภาคอุตสาหกรรม

การนำแก๊สปิโตรเลียมเหลวมาแปรรูปเป็นปิโตรเคมี มีสัดส่วนประมาณ ร้อยละ 27 ของการใช้ทั้งหมด โดยเริ่มต้นเมื่อนำแก๊สปิโตรเลียมเหลวมาแปรสภาพเป็นปิโตรเคมีแล้วจะได้อัตถุดิบตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งตามโครงสร้างทางเคมีแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก คือ โอลิฟินและอะโรมาติก ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญที่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์มากมาย ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีในกลุ่มของโอลิฟินนิยมนำไปผลิตเป็นถุง พลาสติก และแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์ รวมถึงสิ่งของที่ต้องการความคงทน ส่วนผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีในกลุ่มของอะโรมาติกนำไปผลิตสิ่งของหลายอย่าง เช่น เส้นใยสังเคราะห์ ขวดพลาสติกใสใสน้ำดื่ม ถูมือ ชิ้นส่วนรถยนต์ แผ่นซีดี และที่สำคัญเป็นชิ้นส่วนของคอมพิวเตอร์ เม็ดพลาสติกเป็นวัตถุดิบปิโตรเคมีพื้นฐานนานาชนิดที่นำไปผลิตตัวต่อเลโก้ รถบังคับ หรือแม้กระทั่งเครื่องเล่นชิ้นใหญ่ๆ บางชิ้นตามสวนสนุก อีกทั้งแก๊สปิโตรเลียมเหลวมักถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตที่ต้องใช้ความร้อน เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมผลิตแก้ว อุตสาหกรรมฟอกย้อม อุตสาหกรรมตัดเชื่อมโลหะ เป็นต้น แก๊สปิโตรเลียมเหลวจึงมีส่วนสำคัญที่ได้สร้างเทคโนโลยีและความทันสมัยให้กับมนุษย์ในปัจจุบัน

### 2.4.3 การใช้งานแก๊สปิโตรเลียมเหลวในภาคเกษตรกรรม

การใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวในการเกษตร ได้แก่ การให้ความร้อนสำหรับการอนุบาลสัตว์หรือให้ความอบอุ่นแก่สัตว์ในฟาร์ม การอบเมล็ดพันธุ์ และใบยาสูบ และการอบแห้งผลิตภัณฑ์การเกษตร เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีสำหรับการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลว

ในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารูปแบบของแข็ง (solid catalyst) ในรูปของโลหะออกไซด์ ซึ่งองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งได้ ดังนี้

### 2.5.1 โลหะว่องไว (active site) [สิริรัตน์ อยู่เวียงไชย, 2553]

ส่วนโลหะว่องไวบนตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ในการช่วยดูดซับสารตั้งต้นเพื่อนำมาทำปฏิกิริยา ถือเป็นตัวสำคัญในการเร่งการเกิดปฏิกิริยา โดยความว่องไวในการดูดซับของโลหะว่องไวดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของโลหะนั้น ๆ นอกจากนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงสำหรับโลหะว่องไว คือ ความเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ความคงตัวเมื่อต้องใช้ตามภาวะต่าง ๆ รวมถึงราคา โดยโลหะว่องไวในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นที่นิยมสำหรับการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลว คือ โลหะคอปเปอร์ (Cu) และสำหรับการเร่งปฏิกิริยาต้องให้โลหะดังกล่าวอยู่ในรูปที่พร้อมในการทำปฏิกิริยา ซึ่งนิยมใช้ในรูปแบบ  $\text{Cu}^0$  และ  $\text{Cu}^+$

### 2.5.2 ตัวรองรับ (supporter) [สิริรัตน์ อยู่เวียงไชย, 2553]

การมีตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเพื่อช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของโลหะว่องไว ยิ่งตัวรองรับมีพื้นที่ผิวมากการกระจายตัวของโลหะว่องไวนั้นก็ยิ่งมีโอกาสมากขึ้น และยังการกระจายตัวของโลหะเพิ่มขึ้นก็ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัสของโลหะว่องไวนั้นด้วยทำให้มีการเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แนวทางการเลือกตัวรองรับที่ดี เช่น พื้นที่ผิว (นิยมให้มีพื้นที่ผิวมากแต่ไม่ใช่ทุกกรณี) สมบัติเชิงกล (ต้องมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ทนต่อการกระแทก) สมบัติทางกายภาพ (นิยมพื้นที่ผิวสัมผัสสูง มีรูพรุนและขนาดอนุภาคขนาดเล็กแต่ไม่ควรเล็กกว่า 2 นาโนเมตรเพราะจะเกิดการอุดตันได้ง่าย) มีราคาถูก และที่สำคัญต้องไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ เป็นต้น ตัวรองรับที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวมีอยู่หลายชนิด ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต หรือซีโอไลต์ และใช้ชนิด HZSM-5

### 2.5.3 ตัวสนับสนุน (Promoter) [สุดารัตน์, 2557]

ตัวสนับสนุน คือสารที่เติมในตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยเสริมสมบัติการเร่งปฏิกิริยา การเลือกจำเพาะและเพิ่มเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวสนับสนุนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ตัวสนับสนุนเชิงกายภาพ (textural promoter) เป็นสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ใส่เข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเป็นตัวป้องกันการรวมตัวของผลึกขนาดเล็กของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ให้อัดตัวกันเนื่องจากความร้อน ดังนั้นจึงเป็นการช่วยป้องกันหรือลดการสูญเสียพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างการใช้งานเพื่อประสิทธิภาพที่ดี ตัวสนับสนุนเชิงกายภาพควรมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา มีการกระจายตัวที่ดี และตัวสนับสนุนเชิงโครงสร้าง (structural promoter) จะมีผลทางเคมีกับตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา

## 2.5.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา [สิริรัตน์ อยู่เวียงไชย, 2553]

### 2.5.4.1 การตกตะกอนร่วม (co-precipitation)

การตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่นิยมอย่างมาก ทำโดยการนำสารละลายเกลือของโลหะที่ต้องการมาละลายรวมกันในตัวทำละลายที่เหมาะสมแล้วนำไปตกตะกอนร่วมกับสารที่ใช้ตกตะกอนร่วมหรือสารละลายต่างที่ต้องการในช่วงอุณหภูมิและค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี โดยสารละลายเกลือที่นำมาใช้นั้น ได้แก่ สารละลายไนเตรท อะซีเตต ซัลเฟตคลอไรด์ เป็นต้น ส่วนสารละลายต่างนิยมใช้ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ หรือแอมโมเนียมคาร์บอเนต เป็นต้น

### 2.5.4.2 การทำให้เอิบชุ่ม (impregnation)

การเตรียมโดยวิธีนี้มักมีการเตรียมตัวรองรับก่อนแล้วจึงนำโลหะว่องไวเติมลงไปโดยการเติมสารละลายเกลือของโลหะให้ชุ่ม โดยตัวรองรับที่นิยมนำมาใช้กับวิธีการเตรียมแบบนี้ เช่น ซิลิกา อะลูมินา เป็นต้น

### 2.5.4.3 การทำให้เป็นเจล (sol-gel)

การเตรียมโดยวิธีโซลเจลถือเป็นวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยาก จะเตรียมโดยการนำสารละลายของโลหะที่ต้องการมาละลายรวมกันในตัวทำละลายที่เหมาะสม จากนั้นให้นำสารไปตกตะกอนร่วมกับตัวสารละลายต่างที่ต้องการ คล้ายกับวิธีตกตะกอนร่วมแต่จะทำที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้สารละลายผสมกันเป็นเจล จากนั้นเติมตัวตกตะกอน เช่น เฮกซานอล ลงไปเพื่อทำให้สารละลายเกิดเป็นตะกอน

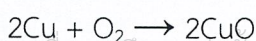
### 2.5.4.4 การผสมทางกายภาพ (physical mixing)

การผสมกันอย่างง่ายระหว่างตัวโลหะว่องไวกับตัวรองรับมีทั้งการผสมระหว่างแบบผงกับผงหรือแบบเม็ดกับเม็ด

## 2.6 คอปเปอร์ออกไซด์

### 2.6.1 ความรู้เกี่ยวกับคอปเปอร์ออกไซด์ [งามนิตย์ วงษ์เจริญ,]

จากรูปที่ 2.9 สารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ สูตรโครงสร้างคือ CuO มีสีดำ พบได้ในธรรมชาติ โครงสร้าง ผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก (monoclinic) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) สามารถสังเคราะห์ให้เป็นวัสดุนาโนได้และใช้เป็นสารตั้งต้นให้สารประกอบคอปเปอร์หรือสารประกอบเคมีต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้คอปเปอร์ออกไซด์ยังมีราคาค่อนข้างถูกและสามารถผสมกับสารที่มีขั้วและพอลิเมอร์ได้ง่าย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่ค่อนข้างเสถียรทั้งในทางกายภาพและทางเคมี สามารถผลิตได้โดยให้ความร้อนคอปเปอร์ในอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 300-800 °C ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการใช้สารประกอบคอปเปอร์ (II) ออกไซด์บริสุทธิ์ในห้องปฏิบัติการ สามารถเตรียมได้จากการให้ความร้อนคอปเปอร์ (II) ไนเตรท, คอปเปอร์ (II) ไฮดรอกไซด์, คอปเปอร์ (II) คาร์บอเนต ตัวใดตัวหนึ่งก็ได้ ดังสมการเคมี  $2\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow 2\text{CuO} + 4\text{NO}_2 + \text{O}_2$  (ที่ 180 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 2.9 ลักษณะคอปเปอร์ออกไซด์ [บริษัท สยามเทคนิคเคล เซรามิค จำกัด, 2557]

### 2.6.2 สมบัติทางกายภาพของคอปเปอร์ออกไซด์ [CuO MSDS, 2014]

ชื่อทั่วไป	copper oxide, cupric oxide
สูตรโมเลกุล	CuO
มวลโมเลกุล	79.55 กรัมต่อโมล
สถานะ	ของแข็ง สีดำ
จุดหลอมเหลว	1,336 องศาเซลเซียส (2,437 องศาฟาเรนไฮต์)
จุดเดือด	2,000 องศาเซลเซียส (3,632 องศาฟาเรนไฮต์)
ความหนาแน่น	6.320 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความอันตราย	เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตใต้น้ำและสิ่งแวดล้อม
NFPA/HMIS	2 Health

## 2.7 ซิงค์ออกไซด์

### 2.7.1 ความรู้เกี่ยวกับซิงค์ออกไซด์ [เคมีกรุงเทพ, 2561. ดร.ศุภมาส ด้านวิทยาศาสตร์, 2556.]

จากรูปที่ 2.10 ซิงค์ออกไซด์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นผลึกไม่มีสีและไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในกรด ใช้ผสมอยู่ในผลิตภัณฑ์หลายชนิดเช่น ยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว น้ำมันเครื่อง สีทา สารยัดเกาะ อาหาร แบตเตอรี่ และอื่น ๆ เป็นต้น ซึ่งในธรรมชาติจะพบในรูปแร่ซิงค์ (zincite) แต่ส่วนใหญ่ซิงค์ออกไซด์จะได้รับการสังเคราะห์ และถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์บำรุงผิวเนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติในเรื่องของการปกป้องและรักษาผิวหนัง แต่ไม่ซึมลงสู่ผิวทำให้ไม่เกิดการระคายเคือง อีกทั้งยังสามารถลดผด ผื่น มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรคอ่อนๆอีกด้วย เช่น ผสมในแป้งเด็ก ผลิตภัณฑ์กันแดด คาลาไมล์ ผลิตภัณฑ์บำรุงผมเพื่อกำจัดรังแค และยาฆ่าเชื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างในระดับนาโนที่หลากหลาย ได้แก่ แผงเส้นลวดนาโนที่มีความเป็นระเบียบ (highly ordered arrays) โครงสร้างเหมือนกับหอคอย (tower-like structure) แท่งนาโน (nano rods) สปริงนาโน (nano springs) หวีนาโน (nano combs) และ วงแหวนนาโน (nano rings) โครงสร้างเหล่านี้สามารถเลือกและควบคุมได้ด้วยการสังเคราะห์ 3 วิธี ได้แก่ (1) กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) หรือการใช้ระบบน้ำ (aqueous solution) (2) การตกเคลือบด้วยไอเคมี (chemical vapor deposition) และ (3) การเคลือบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition)

การฟอร์มตัวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เกิดจาก ปฏิกิริยาเคมีดังต่อไปนี้



โดยเกลือซิงค์ไนเตรตจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายซิงค์ไอออน ( $\text{Zn}^{2+}$ ) เฮกซะเมทิลซีนเตตระมีน ( $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ ) เป็นสารที่จะค่อย ๆ แตกตัวให้ไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ที่อุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการฟอร์มตัวของซิงค์ไฮดรอกไซด์ก่อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นซิงค์ออกไซด์ในที่สุด

รูปที่ 2.10 ลักษณะซิงค์ออกไซด์ [TKB Trading, 2020]

### 2.7.2 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ [ZuO MSDS, 2015]

ชื่อทั่วไป	zinc oxide
สูตรโมเลกุล	ZuO
มวลโมเลกุล	81.39 กรัมต่อโมล
สถานะ	ผงของแข็งละเอียด ไม่มีสี หรือสีขาว
จุดหลอมเหลว	1,975 องศาเซลเซียส (3,587 องศาฟาเรนไฮต์)
จุดเดือด	2,360 องศาเซลเซียส (4,280 องศาฟาเรนไฮต์)
ความหนาแน่น	5.61 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความอันตราย	เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตใต้น้ำและสิ่งแวดล้อม

NFPA/HMIS 1 Health

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 อะลูมิเนียมออกไซด์

### 2.8.1 ความรู้เกี่ยวกับอะลูมิเนียมออกไซด์

จากรูปที่ 2.11 อะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นสารประกอบเคมีของอะลูมิเนียมและออกซิเจน ไม่มีพิษ ซึ่งในทางเซรามิก วัสดุศาสตร์และเหมืองเรียกว่าอะลูมินา (alumina) มีสมบัติการนำความร้อนได้ดี โดยอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลักของแร่บอกไซต์ (bauxite) หรือแร่อะลูมิเนียม ในอุตสาหกรรมแร่บอกไซต์จะถูกทำให้บริสุทธิ์เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยผ่านกระบวนการไบเออร์ (bayer process) และกลายเป็นอะลูมิเนียมโดยกระบวนการฮอลล์-ฮีรูลต์ (Hall-Heroult process)

แร่บอกไซต์ที่ไม่บริสุทธิ์จะประกอบด้วยสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$  โดยกระบวนการไบเออร์สามารถเขียนได้ดังสมการเคมีดังต่อไปนี้



$\text{Fe}_2\text{O}_3$  ไม่ละลายในด่าง ส่วน  $\text{SiO}_2$  ละลายเป็นซิลิเกต (silicate) โดยการกรอง  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จะถูกกำจัดออก เมื่อเติมกรดลงไป  $\text{Al}(\text{OH})_3$  จะตกตะกอนซิลิเกตให้เหลืออยู่ในสารละลาย ดังสมการเคมีต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 ลักษณะอะลูมิเนียมออกไซด์ [White aluminium oxide, 2019]

### 2.8.2 สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมออกไซด์ [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MSDS, 2014]

ชื่อทั่วไป	aluminum oxide, alumina
สูตรโมเลกุล	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
มวลโมเลกุล	101.961 กรัมต่อโมล
สถานะ	ของแข็งสีขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งจุดหลอมเหลวการใช้งานเพื่อ 2,000 องศาเซลเซียส (3,632 องศาฟาเรนไฮต์) ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อัจฉริยะให้ตัดแปลงเนื้อ 2,980 องศาเซลเซียส (5,396 องศาฟาเรนไฮต์) นำไปใช้

ความหนาแน่น	4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความอันตราย	-
NFPA/HMIS	1 Health

## 2.9 ซีโอไลต์

### 2.9.1 ความรู้เกี่ยวกับซีโอไลต์ [ศิรินุช ลอยหา, 2556. สิริรัตน์ อยู่เวียงไชย, 2553.]

จากรูปที่ 2.12 ซีโอไลต์เป็นโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของหน่วยทรงสี่หน้าของซิลิเกตและอะลูมิเนต จากการก่อตัวที่เป็นระเบียบดังกล่าวทำให้ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์เกิดรูพรุนและโพรงที่มีขนาดใหญ่เพียงพอกับการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ เพราะประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์นั้นเกาะอยู่อย่างหลวม ๆ มันจึงพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ ด้วยหลักการนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำ แทนฟอสเฟตในผงซักฟอก เนื่องจากฟอสเฟตนั้นถือว่าเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยโลหะอัลคาไล เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นตัวการทำให้น้ำกระด้าง

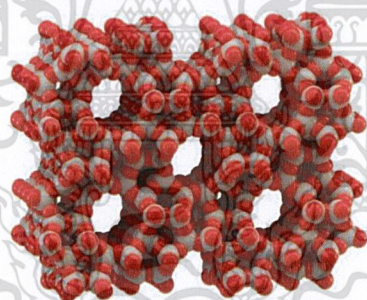
ด้วยหลักการแลกเปลี่ยนประจุนี้ทำให้สามารถใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียกับโลหะโซเดียมที่อยู่ในโพรงของซีโอไลต์ รวมทั้งสามารถใช้ขจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) จากไอเสียเครื่องยนต์ให้กลายเป็นแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนที่ปลอดภัย สามารถขจัดไอโซโทปกัมมันตรังสีของซีเซียมและสตรอนเชียมจากกากนิวเคลียร์ได้อีกด้วย

นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังสามารถเกิดกระบวนการดูดซับและคายซับโมเลกุลสารอินทรีย์จากขนาดเล็กจนถึงขนาด 1 นาโนเมตรได้ การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับสามารถใช้ได้ทั้งในกระบวนการทำให้แห้ง (dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (purification) และการแยกสาร (separation) ซึ่งซีโอไลต์นั้นมีสมบัติการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่าง เป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล โดยสามารถเลือกให้มีการเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล ส่วนการทำให้แห้งนั้น เนื่องจากซีโอไลต์จะมีประจุบวกที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีเป็นพิเศษและสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ กล่าวคือ เมื่อมีการให้ความร้อนน้ำก็จะระเหยออกไปหมด แต่เมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้ง ก็สามารถดูดซับน้ำได้อีกหรืออาจนำไปใช้ดูดซับสารอื่นแทน เช่น แก๊สไอโอดีน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย แบบย้อนกลับได้เช่นกัน แต่ในทางกลับกันซีโอไลต์บางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ แต่จะดูดซับเฉพาะโมเลกุลอินทรีย์เท่านั้น นอกจากนี้ยังใช้ในการแยกแก๊ส ซึ่งโมเลกุลของแก๊สต่างชนิดจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตกับไอออนโลหะ

โครงสร้างผลึกมีผลต่อการควบคุมสมบัติของซีโอไลต์ คือความเป็นกรด ความจำเพาะต่อ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ  
 รูปร่าง และเสถียรภาพ สิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของซีโอไลต์โดยตรง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เพื่อประโยชน์ในเรื่องของต้นทุนการผลิตและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากคุณสมบัติที่เพิ่มความจำเพาะต่อการเร่งปฏิกิริยา โดยลดการเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง พบว่ามากกว่าร้อยละ 90 จะประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน และเนื่องจากปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานและการบริโภคของมนุษย์สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับทศวรรษที่ผ่านมาทำให้เกิดแรงผลักดันที่จะต้องมีการพัฒนาควบคุมการปลดปล่อยมลพิษที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ควบคุมปริมาณการปลดปล่อย ของเสีย หรือแก๊สเสีย เป็นต้น

การใช้ซีโอไลต์ในอุตสาหกรรมเพื่อเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการกลั่นน้ำมันและกระบวนการปิโตรเคมี โดยการนำซีโอไลต์มาใช้แทนตัวเร่งปฏิกิริยาโครงสร้างออสถุฐาน ส่วนสมบัติของซีโอไลต์ที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาทางปิโตรเคมีได้แก่ (1) การมีตำแหน่งกัมมันต์สูง ซึ่งจำนวนและความแรงของตำแหน่งกัมมันต์สามารถปรับเปลี่ยนได้หลายช่วงขึ้นกับการใช้ประโยชน์ (2) การมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ซึ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการซึ่งปฏิกิริยาเคมีเกิดที่อุณหภูมิสูงและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ที่อุณหภูมิสูงด้วย (3) มีความจำเพาะต่อขนาดโมเลกุลของสารเคมีนั้นคือในกระบวนการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความจำเพาะสูง (high selectivity) ต่อโครงสร้างผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เป็นการลดขั้นตอนในการคัดแยกผลิตภัณฑ์อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 [Zibo Jiulong เคมี, 2016]

### 2.9.2 สมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์

- (1) มีโครงสร้างผลึกและสามารถกำหนดขนาดผลึกได้
- (2) สามารถกำหนดขนาดของรูพรุนและรูปร่างทางเรขาคณิตได้
- (3) มีสมบัติจำเพาะต่อรูปร่างโมเลกุล
- (4) มีสมบัติความแข็งแรงและสามารถปรับค่าความแรงของกรดได้
- (5) มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง
- (6) โครงสร้างของซีโอไลต์สามารถปรับปรุงได้หลังจากการสังเคราะห์

(7) มีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวก

(8) มีสมบัติการดูดซับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้ออกไปและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 เทคนิคในการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาและเครื่องมือที่ใช้

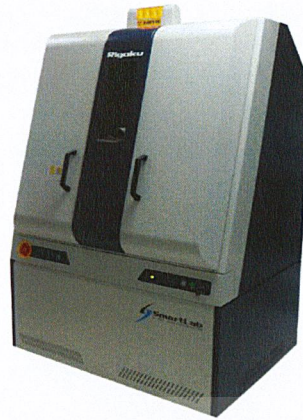
ลักษณะโครงสร้างทั้งภายในและภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถวิเคราะห์ได้จากเทคนิค พิสูจน์เอกลักษณ์ (catalyst characterization technique) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาโครงสร้างระดับจุลภาค พื้นผิวภายนอก องค์ประกอบภายในสารประกอบ หรือแม้กระทั่งพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรของรูพรุน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ทั้งหมด 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction : XRD) เทคนิคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคการกระจายพลังงาน (Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, SEM-EDS) และเทคนิคการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม (Gas Chromatography, GC)

2.10.1 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2563. สรินทร ลิมปนาท, 2543]

เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction : XRD) เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์ มาใช้ในการวิเคราะห์และระบุชนิดของสารประกอบและโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ได้ผลทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ สารประกอบและแร่ แสดงในรูปที่ 2.13 ทำให้นักวิทยาศาสตร์กลุ่มนี้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติได้ โดยอาศัยหลักการการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาเป็นมุมที่ต่างกัน โดยมีหัววัดสัญญาณ (detector) เป็นตัวรับข้อมูลขององค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมองศาในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในมุมที่แตกต่างกันไปขึ้นกับรูปร่างหรือองค์ประกอบ และลักษณะผลึก ซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง และเมื่อวิเคราะห์กับอุปกรณ์เสริม เช่น อุปกรณ์ให้ความเย็น-ร้อนก็จะสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะที่สภาวะทดสอบเปลี่ยนไป

ซึ่งผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

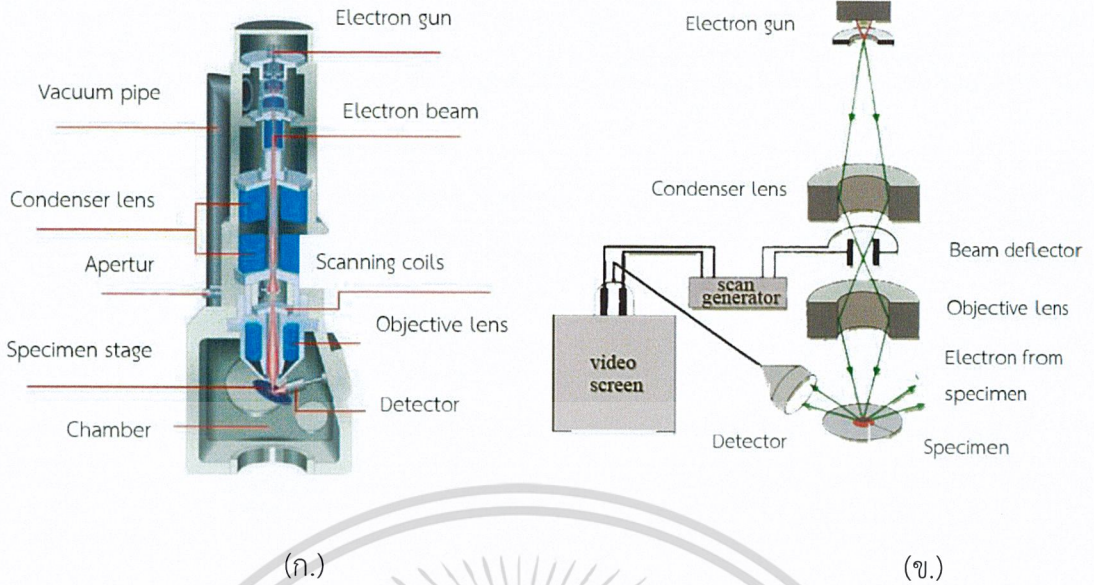


รูปที่ 2.13 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [แสงซินโครตรอน, 2562]

### 2.10.2 เทคนิคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope SEM) [ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2559]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค แสดงในรูปที่ 2.14 เนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำใช้ดูวัตถุเล็กที่สุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น ๆ เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เป็นข้อมูลทางเคมีจึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

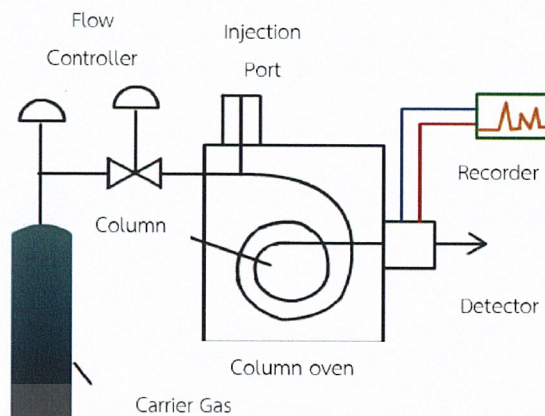
(ก.) ส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2559]

(ข.) หลักการทำงานของเครื่อง SEM [นาโนเทคโนโลยี, 2557]

### 2.10.3 เทคนิคการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม (Gas Chromatography, GC)

เทคนิคการแยกองค์ประกอบของสารผสม (Gas Chromatography, GC) โดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ของแต่ละองค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบของสารผสมบนเฟสคงที่ (stationary Phase) ภายใต้การพาของเฟสเคลื่อนที่ (mobile Phase) สำหรับเครื่อง GC เฟสคงที่คือ สารที่อยู่ภายในคอลัมน์ ส่วนเฟสเคลื่อนที่คือ แก๊สฮีเลียม เมื่อสารที่ต้องการวิเคราะห์ผ่านเข้าสู่เครื่อง GC สารดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนสถานะจากของเหลว (liquid) โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้กลายเป็นแก๊ส (gas) ส่วนแก๊สของสารผสมจะเข้าสู่คอลัมน์ที่บรรจุเฟสคงที่โดยแก๊สฮีเลียม ซึ่งภายในคอลัมน์จะเกิดการแยกสารต่าง ๆ (separation) โดยอาศัยการทำปฏิกิริยา (interaction) ระหว่างเฟสคงที่ที่อยู่ภายในคอลัมน์ (stationary phase) และสารผสม ทั้งนี้ในการแยกสารผสมให้เป็นสารเดี่ยวนั้นอาศัยความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุล จุดเดือด โครงสร้างของสาร และสมบัติทางเคมีในการทำปฏิกิริยากับสารที่อยู่ภายในคอลัมน์ ซึ่งหลังจากที่สารแต่ละชนิดถูกแยกเป็นส่วนๆจะเคลื่อนที่อยู่ภายในคอลัมน์ในเวลาที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นสารเดี่ยว แต่ละชนิดเคลื่อนเข้าสู่อุปกรณ์วัดสัญญาณ (detector) และแปรผลออกมาเป็นโครมาโทแกรม (chromatogram) ซึ่งสารเดี่ยวแต่ละสารจะมีระยะเวลาที่อยู่ในคอลัมน์ (Retention Time, RT) เฉพาะตัว ในการวิเคราะห์ผลนำพื้นที่ใต้พีค (peak) ของแต่ละสารมาคำนวณผลเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (calibration curve) สามารถทราบปริมาณของสารตัวอย่างได้ แสดงส่วนประกอบในรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของเครื่อง gas chromatography [Environmental Engineering Chula Engineering, 2017]

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.11.1 Synthesis of LPG from synthesis gas.

Zhang และคณะ สังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม (hybrid catalyst) ประกอบด้วยคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์และซีโอไลต์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (fixed bed reactor) โดยเมทานอลเกิดจากแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่งคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ จากนั้นเปลี่ยนไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ และกลายเป็นไฮโดรคาร์บอนบนตัวเร่งซีโอไลต์ การกระจายของไฮโดรคาร์บอนขึ้นกับลักษณะของซีโอไลต์ ในขณะที่ค่าความเป็นกรด (acidity) ขึ้นกับลักษณะของคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมด้วยซีโอไลต์ประเภท USY และคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรคาร์บอนตัวเบา ๆ และค่าการเลือกเกิดแก๊สปิโตรเลียมเหลวมากกว่าร้อยละ 75

### 2.11.2 High performance Cu-ZnO/Pd $\beta$ catalysts for syngas to LPG

Ge และคณะ เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ผสมแพลเลเดียมเบต้าสำหรับผลิตแก๊สปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์ โดยศึกษาอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมินาในแพลเลเดียมเบต้า ขนาดอนุภาคของแพลเลเดียมเบต้า ปริมาณแพลเลเดียมในแพลเลเดียมเบต้าและภาวะในการทำปฏิกิริยา พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์คือ อุณหภูมิ 325-350 องศาเซลเซียส ความดัน 2.1-3.6 เมกะปาสคาล ความเร็วของแก๊ส (W/F) 4.5-9 กรัมชั่วโมงต่อโมล และอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา 37:75 ซึ่งได้ร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 72.2 ร้อยละผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 45.3 และร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวเท่ากับ 78.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.11.3 Synthesis of LPG via DME from syngas in two-stage reaction system

Ma และคณะ สังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์ผ่านระบบปฏิกิริยา 2 ชั้น โดยขั้นที่ 1 เป็นการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$  และ ZSM-5 อัตราส่วน 3:1 และขั้นที่ 2 เป็นการเปลี่ยนไดเมทิลอีเทอร์ที่ได้จากขั้นที่ 1 ไปเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd-Y ที่เตรียมได้จากวิธีแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งอัตราส่วน Cu-Zn-Al ต่อ Pd-Y เท่ากับ 7:9 พบว่าขั้นที่ 1 ร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นซึ่งสูงสุดที่ร้อยละ 80 และการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์ทั้งหมดมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งมากกว่าร้อยละ 98 เมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาดำกว่า 250 องศาเซลเซียส เนื่องจากไดเมทิลอีเทอร์เปลี่ยนไปเป็นไฮโดรคาร์บอนเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยา 250 ถึง 280 องศาเซลเซียส ขั้นที่ 2 ไดเมทิลอีเทอร์เกือบทั้งหมดเปลี่ยนเป็นไฮโดรคาร์บอนเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงกว่า 335 องศาเซลเซียส

### 2.11.4 Stability of $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$ and $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{HZSM-5}$ catalysts in dimethyl ether steam reforming operating in reaction-regeneration cycles

Arteta และคณะ ศึกษาการเกิดใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสม (bifunctional) ที่เตรียมด้วยความแตกต่างของตัวโลหะว่องไวระหว่าง  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  บนตัวรองรับอย่างซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของไดเมทิลอีเทอร์ในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดเบด (fluidized-bed reactor) ในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเกิดใหม่ของตัวเร่ง (reaction-regeneration cycles) โดยผ่านการเผาไหม้ในอากาศที่อุณหภูมิ 315 หรือ 500 องศาเซลเซียส ของถ่านโค้กที่ทับถมกัน เพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยา 1) การเผาไหม้ถ่านโค้กตามอุณหภูมิที่ต้องการเพื่อฟื้นฟูการทำงานของตัวโลหะว่องไว และ 2) พฤติกรรมทางจลนศาสตร์ของตัวเร่งหลังจากมีการกำจัดถ่านโค้กที่ทับถมบนโลหะว่องไว พบว่าที่อุณหภูมิ 315 องศาเซลเซียส ถ่านโค้กที่ทับถมบนตัวโลหะว่องไวถูกเผา แต่ในทางตรงข้ามกันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดถ่านโค้กบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 แทนในส่วนของตัวเร่งที่มีตัวโลหะว่องไวเป็นชนิด  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  มีความเสถียรสูงและสามารถดำเนินปฏิกิริยาการเกิดใหม่ได้โดยไม่มีการถูกรบกวนใด ๆ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวโลหะว่องไวเป็นชนิด  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$  จะมีความว่องไวมากกว่า Cu-Fe สำหรับปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของไดเมทิลอีเทอร์และตัวเร่งจะเสียสภาพที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสอีกด้วย

### 2.11.5 Direct syngas conversion to liquefied petroleum gas: Importance of a multifunctional metal-zeolite interface

Lu และคณะ รายงานเรื่องโลหะซีโอไลต์ ที่มาจากตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnAl@H-Beta core@shell สำหรับ 1 ขั้นตอนของการเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ไปเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว จากพื้นผิวที่สัมผัสกันแบบมัลติฟังก์ชันนอล ระหว่างแก่นของ CuZnAl และเปลือกที่เป็นซีโอไลต์ชนิด H-beta ซึ่งประกอบด้วย Cu และ กรดซีโอไลต์ จะสังเคราะห์เมทานอลผ่านแก๊สสังเคราะห์ที่อยู่บนแก่นและผ่านอินเตอเฟสออกไปเพื่อที่จะสามารถเร่งปฏิกิริยา tandem dehydration ของเมทานอลเปลี่ยนเป็นโอเลฟิน ปฏิกิริยานี้เกิดที่ซีโอไลต์ จากนั้นเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนในสารอินทรีย์ (hydrogenation) เป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub> หรือ แก๊สปิโตรเลียมเหลวบนโลหะคอปเปอร์แทนโลหะเฉื่อย พบว่าได้ค่าความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวสูงสุดที่ร้อยละ 77

### 2.11.6 Direct synthesis of LPG from syngas derived from air-POM

Ma และคณะ ศึกษาการสังเคราะห์โดยตรงของแก๊สปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์ราคาต่ำที่ได้มาจากกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) ของมีเทนด้วยอากาศ (air-POM) และถูกศึกษาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไฮบริด ซึ่งประกอบด้วยตัวเร่งสำหรับการสังเคราะห์เมทานอล และ Pd-modified Y-zeolite โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไฮบริดจะมีความสามารถในการทำงานสูงและค่าความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวสูงกว่าร้อยละ 73 ในส่วนของการศึกษาสมบัติของ Pd-Y ด้วย BET NH<sub>3</sub>-TPD และ TPO-MS จะศึกษาทั้งก่อนและหลังทำปฏิกิริยา โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นการสะสมของถ่านโค้กบน Pd-Y ซึ่งเป็นผลลัพธ์นี้สำคัญต่อการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไฮบริด

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้สนใจศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas) โดยตรง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา จะผ่านการเตรียมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการเร่งปฏิกิริยา โดยการทำการทดลองสามารถสังเคราะห์ได้สะดวก รวดเร็ว พร้อมทั้งไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และไม่ก่อให้เกิดมลพิษด้วย สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่สนใจศึกษา ได้แก่ คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ ที่มีอัตราส่วนเป็น 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก รวมทั้งหมด 4 ตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว สามารถเตรียมได้ จากการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) และการผสมทางกายภาพ (physical mixing)

### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ชุดเครื่องแก้ว Pyrex
2. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง Mettler Toledo, ME-204
3. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน (sieve) Misumi Vona, 5-3294-33
4. เครื่องอัดเม็ด Chavachote
5. ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor)
6. ฉนวนใยแก้ว (glass wool)
7. มอเตอร์และใบกวน
8. เครื่องวัด pH DENVER INSTRUMENT รุ่น UB-10 UltraBasic
9. ชุดอุปกรณ์การกรองแบบลดความดัน
10. กระดาษกรองเบอร์ 4 Whatman
11. เตาอบ (oven1) MEMERT, UNB 300
12. เตาเผา (furnace), L9/12P
13. ถุงเก็บแก๊ส (gas sampling bag)
14. ตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC), Varian CP-3800
15. นำตัวเร่งปฏิกิริยามาตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะผลึกและสัณฐานวิทยา (X-ray Diffractometer, XRD), Bruker AXS D8 Advance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และอาจมีข้อผิดพลาดในบางจุดขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. นำตัวเร่งปฏิกิริยามาตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารระดับจุลภาค (Scanning Electron Microscope, SEM), LEO 1455 VP

17. นำตัวเร่งปฏิกิริยามาตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและองค์ประกอบ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)

### 3.2 แก๊สและสารเคมี

1. คอปเปอร์ไนเตรทไตรไฮเดรต ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ความบริสุทธิ์ 99.50 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba chemie Pvt, Ltd. ประเทศอินเดีย

2. ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ความบริสุทธิ์ 98.00 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba chemie Pvt, Ltd. ประเทศอินเดีย

3. อะลูมิเนียมไนเตรทโนนะไฮเดรต ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) ความบริสุทธิ์ 98.00 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba chemie Pvt, Ltd. ประเทศอินเดีย

4. โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 99.50 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma Aldrich Pte, Ltd. ประเทศสิงคโปร์

5. ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (HSZ-890HOA) TOSOH CORPORATION

6. Quartz sand บริษัท Wako Pure Chemical Industries, Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

7. น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

8. แก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Praxair (Thailand), Ltd. ประเทศไทย

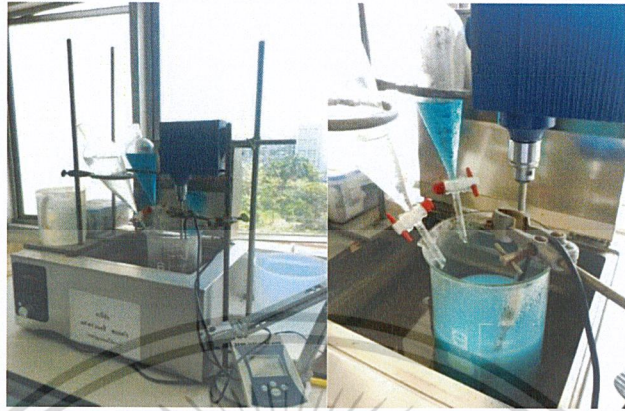
9. แก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ความบริสุทธิ์ 5.00 เปอร์เซ็นต์ในแก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) บริษัท Praxair (Thailand), Ltd. ประเทศไทย

10. แก๊สสังเคราะห์ ( $\text{H}_2 : \text{CO} = 2:1$ ) บริษัท United industrial gases Co., Ltd.

### 3.3 วิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

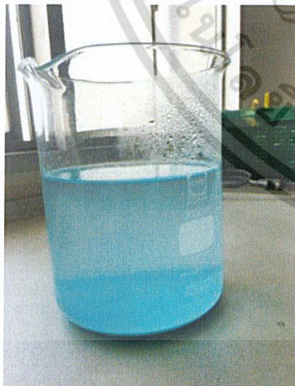
สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการตกตะกอนร่วมกับสารละลายโซเดียมไนเตรต ซึ่งเป็นตัวปรับ pH ให้เป็นกลาง โดยเริ่มจากการละลายคอปเปอร์ไนเตรต ซิงค์ไนเตรตและอะลูมิเนียมไนเตรตด้วยน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง  $\text{CuO}:\text{ZnO}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 4.5:4.5:1 ได้สารละลายโลหะ  $\text{CuO}:\text{ZnO}:\text{Al}_2\text{O}_3$  ลงในกรวยแยกและเตรียมกรวยแยกอีกอันเพื่อบรรจุโซเดียมไนเตรตละลายกับน้ำปราศจากไอออนให้ได้ปริมาณที่เหมาะสม จากนั้นทำการติดตั้งเครื่องมือ ดังรูปที่ 3.1 และหยดสารละลายทั้งสองลงในปิกเกอร์ที่บรรจุน้ำปราศจากไอออนโดยควบคุมอัตราการหยดให้ pH เท่ากับ 7 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พร้อมปั่นกวนภายใต้ความเร็วการหมุน 600 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส หลังจากทำการตตะกอนเสร็จสิ้นให้ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิเดิมต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องมือในขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

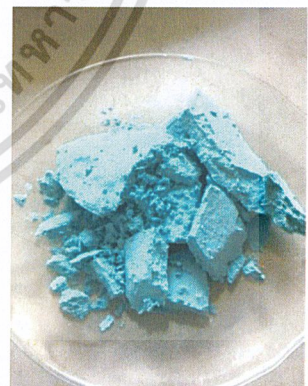
จากนั้นจะได้สารแขวนลอยดังรูปที่ 3.2 (ก) ตั้งทิ้งไว้ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง และทำการกรองตะกอนแบบลดความดันพร้อมกับล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนร้อนที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 3.2 (ข) และนำตะกอนไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงดังรูปที่ 3.2 (ค) เมื่ออบแห้งเพื่อไล่น้ำออกจากตะกอนเรียบร้อยแล้ว ก็นำตะกอนไปเผาภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีได้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ดังรูปที่ 3.3 (ข)



(ก)



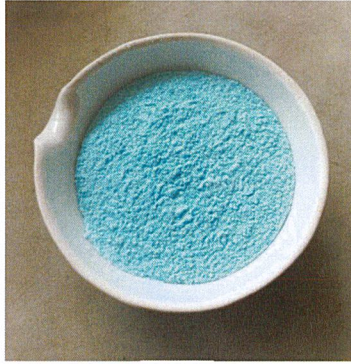
(ข)



(ค)

รูปที่ 3.2 การเตรียมตัวโลหะวงโคปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (ก) สารแขวนลอยตั้งทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง (ข) การกรองตะกอนแบบลดความดันและล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนร้อน (ค) นำตะกอนไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 ผงตะกอน (ก) ตะกอนของคอปเปอร์คาร์บอนेटซิงค์คาร์บอนอะลูมิเนียมคาร์บอนेटจากการอบแห้ง (ข) ผงคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่มาจากการเผาไหม้เขี้ยวปนดำ

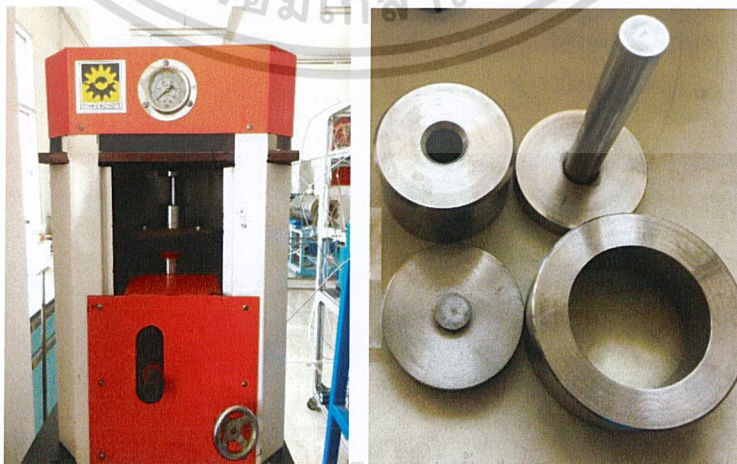
### 3.4 วิธีการเตรียมซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

นำซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที

### 3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

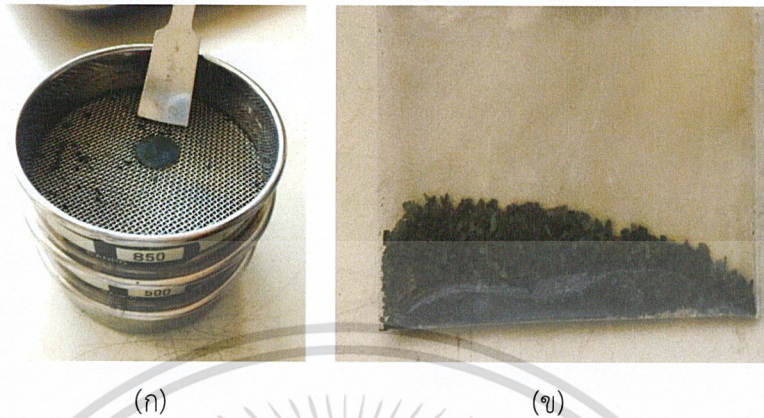
#### 3.5.1 การอัดเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา

3.5.1.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ( $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ) เริ่มโดยการนำคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์อัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ด โดยมีความดัน 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัดทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที ดังรูปที่ 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดรูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์เครื่องอัดเม็ดของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1.2 คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการอัดเม็ด มาคัดแยกขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานที่มีขนาด 500 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การอัดเม็ดและคัดขนาด (ก) นำตัวเร่งที่ผ่านการอัดเม็ดแล้วมาคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 500 ไมโครเมตร (ข) คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์รูปแบบเม็ด

3.5.1.3 นำซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ผ่านการเผามาแล้วมาทำตามข้อ (1)-(2)

3.5.1.4 นำคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 รูปแบบเม็ด มาผสมกันด้วยวิธีการผสมทางกายภาพ (physical mixing) แบบเม็ดต่อเม็ดในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก

3.5.2 การสังเคราะห์แก๊สไฮโดรคาร์บอนโดยตรง



มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.5.2.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 อัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) ประมาณ 0.5000 กรัม ผสมกับ quartz sand ประมาณ 0.5000 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ดังรูปที่ 3.6 โดยใช้ฉนวนแก้วปิดเครื่องปฏิกรณ์และนำเข้าเตาเผา

3.5.2.2 ก่อนเริ่มทำปฏิกิริยาเก็บตัวอย่างแก๊สสังเคราะห์ ( $\text{H}_2 : \text{CO} = 2:1$ ) เพื่อนำไปตรวจวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) เพื่อวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบที่เป็นสารผสมก่อนเริ่มทำปฏิกิริยา

3.5.2.3 ป้อนแก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อเป็นการไล่แก๊สออกซิเจนและสารตกค้างอื่น ๆ ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (fixed-bed reactor)

3.5.2.4 เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลาทั้งหมด 24 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 150 องศาเซลเซียสและคงอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.5.2.5 เปลี่ยนแก๊สที่ป้อนจากแก๊สไนโตรเจนเป็น 5 เปอร์เซ็นต์แก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สไนโตรเจน เพื่อให้เกิดการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

3.5.2.6 ลดอัตราการให้ความร้อนลงเหลือ 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีเป็นเวลา 34 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 250 องศาเซลเซียสและเริ่มการรีดิวซ์ด้วยอุณหภูมิกึ่งที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.5.2.7 เปลี่ยนแก๊สที่ป้อนจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง  $H_2:CO$  เป็น 2:1 ที่มีอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อเริ่มทำการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas: LPG)

3.5.2.8 เพิ่มอัตราการให้ความร้อนเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 350 องศาเซลเซียส และเริ่มการสังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิกึ่งที่ประมาณ 4 ชั่วโมง พร้อมทั้งควบคุมความดันด้วย back pressure valve ที่มีความดัน 40 บาร์

3.5.2.9 เริ่มเก็บตัวอย่างแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีทุก ๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 4 ชั่วโมง

3.5.2.10 ทำตามข้อ (1)-(9) ข้าง โดยเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาตามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เอกสารระหว่างคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์กับตัวรองรับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เป็น 2:1 ค้ำไม่ว่า (0.3346:0.1723 กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250 กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300 กรัม) โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

### 3.6 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

#### 3.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสันฐาน

เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสันฐาน (X-ray diffraction: XRD) เป็นเทคนิคที่นำรังสี X มาใช้วิเคราะห์สารประกอบในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสาร โดยอาศัยหลักการยิงรังสี X ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีในมุมที่แตกต่างกัน โดยข้อมูลที่ได้อาจบอกถึงชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ และผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยใช้ Cu K $\alpha$  (ความยาวคลื่น 1.54 อังสตรอม) เป็นแหล่งกำเนิดรังสี X เพื่อศึกษา intensity ที่  $2\theta$  ในช่วง 5-90° (Step เป็น 0.020° และ counting time เป็น 1 วินาทีต่อ step)

การหาขนาดผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์สามารถคำนวณได้จากค่าความสูงกึ่งกลาง (Full Width of Half Maximum, FWHM) โดยใช้สมการของ Scherrer ดังสมการ 3.1

$$\text{Crystalline size} = \frac{K \lambda}{\beta_{1/2} \cos \theta_B} \quad (3.1)$$

เมื่อ ; K คือ Unit cell geometry dependent constant  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสี X  
 $\beta_{1/2}$  คือ ค่าความสูงกึ่งกลาง (Full Width of Half Maximum, FWHM)  
 $\theta_B$  คือ Bragg angle

#### 3.6.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของสารตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จะได้เป็นภาพ 3 มิติที่มีสีขาวดำ

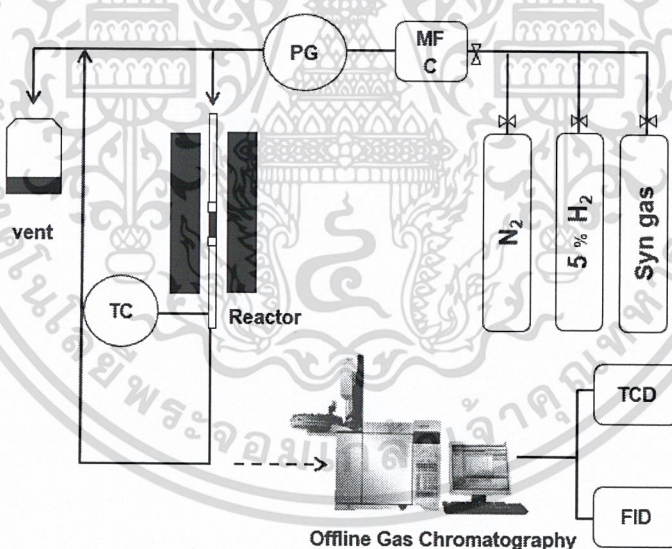
การเตรียมตัวอย่างที่จะวิเคราะห์นั้นจะต้องทำการเคลือบผิวด้วยทองคำ (Au) โดยเครื่องมือที่เรียกว่า sputter coater ก่อน ซึ่งใช้เวลาในการเคลือบประมาณ 30 วินาที เพื่อให้พื้นที่ผิวของตัวอย่างมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า จากนั้นจึงนำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยายเท่ากับ 2500, 5000, 10000 และ 20000 เท่า

การตรวจสอบปริมาณธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิคการกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) เป็นการทำงานร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยหลักการของ EDS คือ เมื่อตัวอย่างที่ต้องการศึกษาถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอนทำให้สามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ด้วยการผลึกให้อิเล็กตรอนของตัวอย่างให้หลุดออกจากอะตอม ดังนั้นเพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพ อิเล็กตรอนที่พุ่งโคจรชั้นถัดไปจะลงเข้ามาแทนที่ และ

ปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปร่างรังสีเอกซ์ (X-ray) ซึ่งเรียกว่ารังสีเอกซ์แบบแคแรกเทอริสติก (Characteristic X-ray) โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ จากนั้นเมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่หัววัดชนิด silicon drift detectors (SSD) หัววัดจะสร้างสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ และจะนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์หาความสูงของสัญญาณส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินและรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัมรังสีเอกซ์ต่อไป

### 3.6.3 การวิเคราะห์การแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม

เทคนิคสำหรับการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม โดยสารตัวอย่างจะถูกป้อนเข้าที่ sample injection port จึงทำให้ถูกความร้อนจนกลายเป็นไอเข้าไปในคอลัมน์และถูกตรวจวัดสัญญาณด้วยเครื่องตรวจวัด (detector) หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกบันทึกและแสดงผลออกมาในรูปของโครมาโตแกรม ซึ่งตรวจวัดโดยเครื่องตรวจวัดการเกิดและปริมาณไอออนที่เกิดจากการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ในสนามไฟฟ้า หรือ FID (Flame Ionization Detector) และเครื่องตรวจวัดที่มีกลไกการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำความร้อน หรือ TCD (Thermal Conductivity Detector) แสดงองค์ประกอบที่อยู่ภายในสารตัวอย่างได้อย่างชัดเจนในรูปแบบกราฟ มีขั้นตอนดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการสังเคราะห์และตรวจวัดแก๊สปิโตรเลียมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษฉบับนี้ได้ศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$ ) บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 สำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ โดยมุ่งเน้นไปที่วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่ผสมระหว่างตัวตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกันด้วยวิธีการผสมทางกายภาพ (physical mixing) โดยมีอัตราส่วนเป็น 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก เพื่อหาตัวเร่งที่ผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมในปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวโดยตรง

ในบทนี้จะนำเสนอผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาและผลการทดลองที่ได้จากการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ มีผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ ได้แก่ ผลจากการใช้เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอณูฐาน (X-ray diffraction: XRD) ผลภาพที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) นอกจากนี้ยังมีผลของการวิเคราะห์แยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่เป็นสารผสมด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography; GC) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอณูฐาน (X-ray diffraction: XRD)

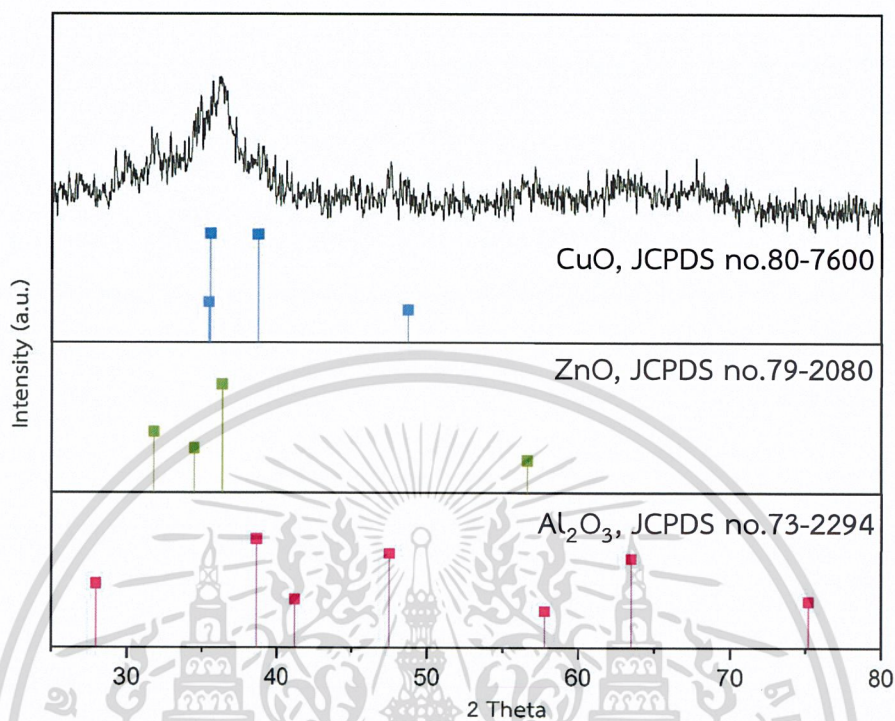
เป็นเทคนิคที่นำรังสี X มาใช้วิเคราะห์สารประกอบในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสาร โดยอาศัยหลักการยิงรังสี X ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีในมุมที่แตกต่างกัน โดยข้อมูลที่ได้อาจบอกถึงชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ และผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่างนั้น ๆ

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการตกตะกอนร่วมมาวิเคราะห์โครงสร้าง พบพีคขึ้นที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $35.64^\circ$   $36.16^\circ$   $38.68^\circ$  และ  $48.68^\circ$  ซึ่งใกล้เคียงกับพีคโครงสร้างผลึกมาตรฐานของคอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ;  $35.42^\circ$   $35.54^\circ$   $38.71^\circ$  และ  $48.72^\circ$ ) พบพีคขึ้นที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $31.60^\circ$

$34.52^\circ$   $36.24^\circ$  และ  $48.20^\circ$  ซึ่งใกล้เคียงกับพีคโครงสร้างผลึกมาตรฐานของซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ;  $31.78^\circ$   $34.45^\circ$   $36.27^\circ$  และ  $56.61^\circ$ ) และมีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $27.76^\circ$   $39.04^\circ$   $47.56^\circ$  และ  $63.44^\circ$

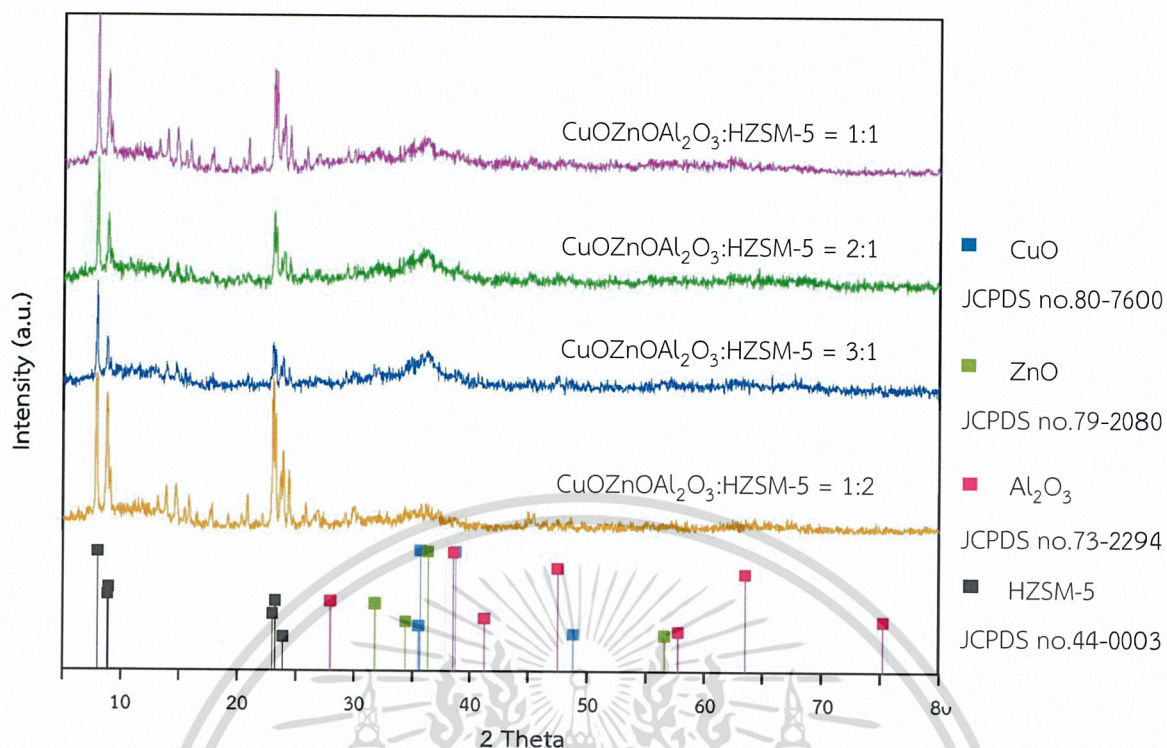
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

ซึ่งใกล้เคียงกับพีคโครงสร้างผลึกมาตรฐานของอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $27.95^\circ$   $38.59^\circ$   $41.25^\circ$   $47.50^\circ$  และ  $63.48^\circ$ ) แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (HZSM-5, JCPDS no. 44-0003)

จากรูปที่ 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 พบว่า พีคของซีโอไลต์ชั้นที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $7.92^\circ$   $8.80^\circ$   $23.04^\circ$  และ  $23.92^\circ$  ซึ่งใกล้เคียงกับพีคโครงสร้างผลึกมาตรฐานของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่บริเวณตำแหน่ง  $2\theta$  ประมาณ  $7.97^\circ$   $8.82^\circ$   $23.32^\circ$  และ  $23.95^\circ$  จาก XRD Pattern สามารถยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เกิดการค้ำ มีสมบัติคล้ายซีโอไลต์มาตรฐาน



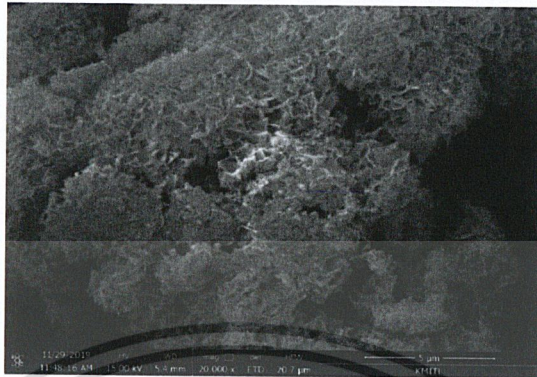
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์เชิงซ้อนออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ถูกเตรียม 4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของออกไซด์ (CuO, JCPDS no.80-7600) ึ่งค์ออกไซด์ (ZnO, JCPDS no.79-2080) อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , JCPDS no.73-2294) และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (HZSM-5, JCPDS no.44-0003)

จากรูปที่ 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์เชิงซ้อนออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีผสมทางกายภาพ (physical mixing) ให้ได้ 4 อัตราส่วนเป็น 1:1 (0.5:0.5กรัม) 2:1 (0.67:0.33กรัม) 3:1 (0.75:0.25กรัม) และ 1:2 (0.33:0.67กรัม) โดยน้ำหนัก โดยมีพีคหลักที่ขึ้นใกล้เคียงกับตำแหน่ง  $2\theta$  ของฟิสิกออกไซด์ (CuO;  $35.42^\circ$   $35.54^\circ$   $38.71^\circ$  และ  $48.72^\circ$ ) ึ่งค์ออกไซด์ (ZnO;  $31.78^\circ$   $34.45^\circ$   $36.27^\circ$  และ  $56.61^\circ$ ) อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $27.95^\circ$   $38.59^\circ$   $41.25^\circ$   $47.50^\circ$  และ  $63.48^\circ$ ) และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (HZSM-5;  $7.97^\circ$   $8.82^\circ$   $23.32^\circ$  และ  $23.95^\circ$ )

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค (SEM)

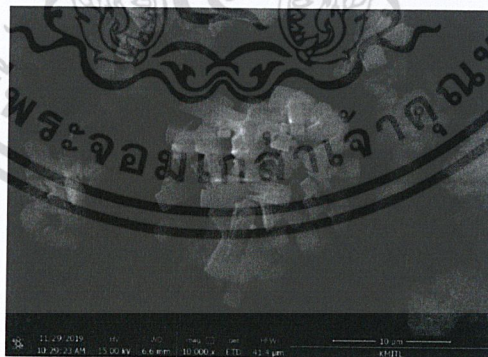
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของสารตัวอย่าง เพื่อให้เห็นลักษณะผิว ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จะได้เป็นภาพ 3 มิติที่มีสีขาวดำ



รูปที่ 4.4 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาของคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่กำลังขยาย 20000 เท่า

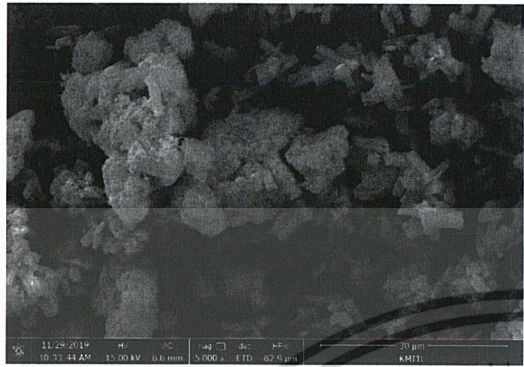
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นลักษณะสัณฐานวิทยาของคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ ถูกเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) ที่อัตราส่วน  $\text{CuO}:\text{ZnO}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 4.5:4.5:1 ซึ่งแสดงลักษณะเป็นผลึก มีความเป็นกลุ่มก้อนซ้อนกันและพบรูพรุนจำนวนหนึ่ง ส่วนลักษณะสัณฐานวิทยาของซีโอไซด์ชนิด HZSM-5 เกรดการค้า ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากรด จะแสดงลักษณะเป็นผลึกค่อนข้างสูง มีขนาดใกล้เคียงกัน และเป็นแท่งพื้นผิวเรียบ แสดงในรูปที่ 4.5



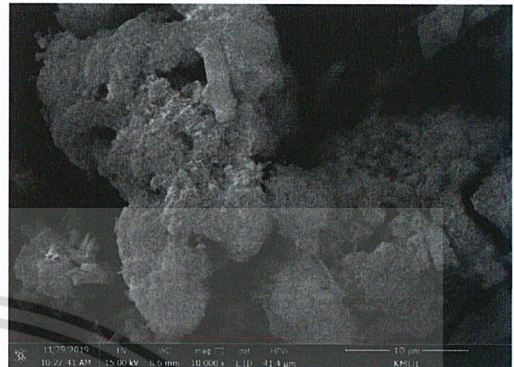
รูปที่ 4.5 รูปร่างสัณฐานวิทยาของซีโอไซด์ชนิด HZSM-5 ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

จากนั้นเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาของคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3$ ) ผสมกับซีโอไซด์ชนิด HZSM-5 ( $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ) ด้วยวิธีทางกายภาพ (physical mixing) เอกสารในอัตราส่วน 1:1 (0.2517:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250 กรัม) และ 1:2 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก พบว่ามีการรวมกลุ่มกันอย่างเห็นได้ชัดและมีการกระจายตัวตามปริมาณสารที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 (ก)-(ข)



(ก)



(ข)



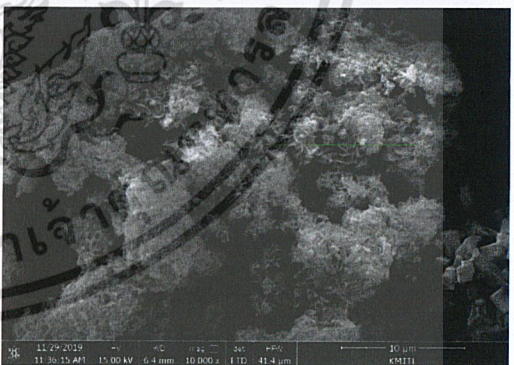
(ค)



(ง)



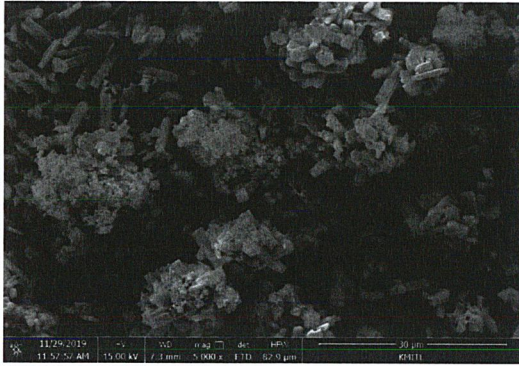
(จ)



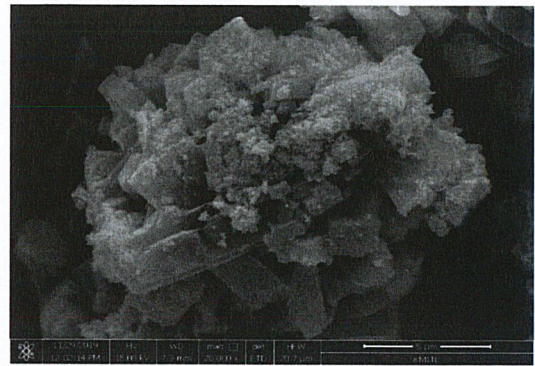
(ฉ)

รูปที่ 4.6 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาออกเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.6 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (ต่อ)

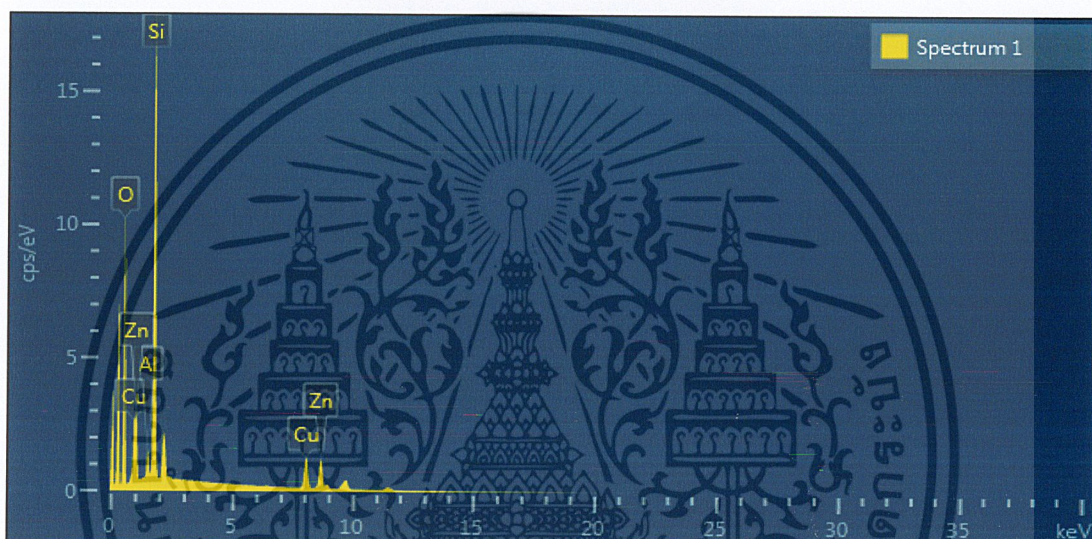
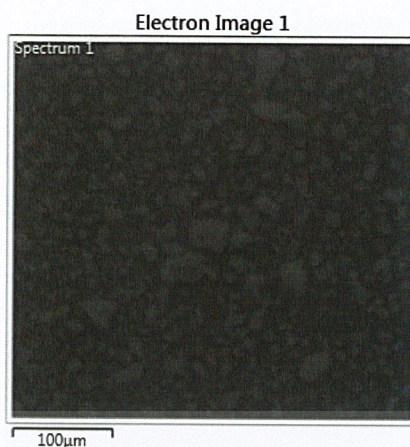
- (ก) CuOZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 5000 เท่า
- (ข) CuOZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10000 เท่า
- (ค) CuOZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 5000 เท่า
- (ง) CuOZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10000 เท่า
- (จ) CuOZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 5000 เท่า
- (ฉ) CuOZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10000 เท่า
- (ช) CuOZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 5000 เท่า
- (ซ) CuOZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

จากรูปที่ 4.6 (ก)-(ฉ) แสดงลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์มากกว่าซีโอไลต์ สังเกตเห็นว่าการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนและการกระจายที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก ค่อนข้างมีกลุ่มก้อนของคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์มาก มีการกระจายตัวที่ไม่ค่อยดี เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ และปริมาณของซีโอไลต์ก็น้อยลง ส่วนในรูปที่ 4.6 (ช)-(ซ) แสดงลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของซีโอไลต์มากกว่าคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ สังเกตเห็นถึงการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ HZSM-5 ได้อย่างชัดเจน

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (EDS)

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งมีบทบาทสำคัญในปัจจุบันในการศึกษาองค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ แสดงผลดังต่อไปนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

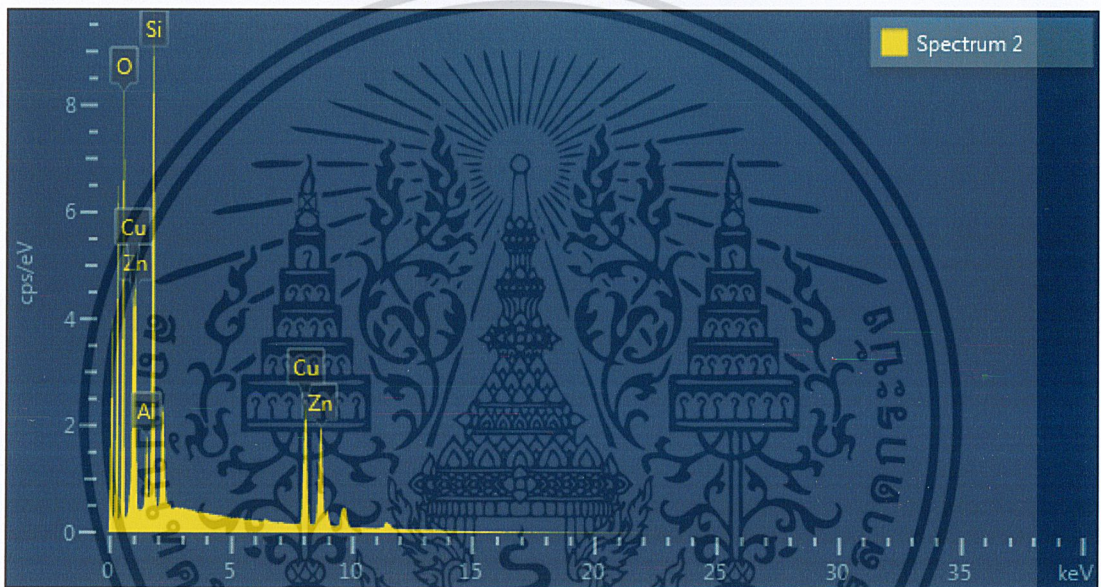
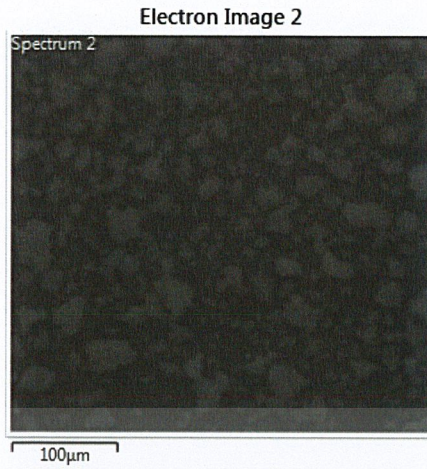


รูปที่ 4.7 Map Spectrum  $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  ในอัตราส่วน 1:1 (0.2517:0.2510กรัม) โดย  
น้ำหนักร

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  ในอัตราส่วน 1:1  
(0.2517:0.2510กรัม) โดยน้ำหนักร

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
O	K series	30.47	0.10253	49.07	0.19	68.21	$\text{SiO}_2$	Yes	
Al	K series	0.79	0.00567	2.05	0.06	1.69	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Yes	
Si	K series	13.36	0.10583	29.62	0.14	23.46	$\text{SiO}_2$	Yes	
Cu	K series	5.21	0.05213	9.26	0.12	3.24	Cu	Yes	
Zn	K series	5.63	0.05628	10.00	0.14	3.40	Zn	Yes	
Total:				100.00		100.00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

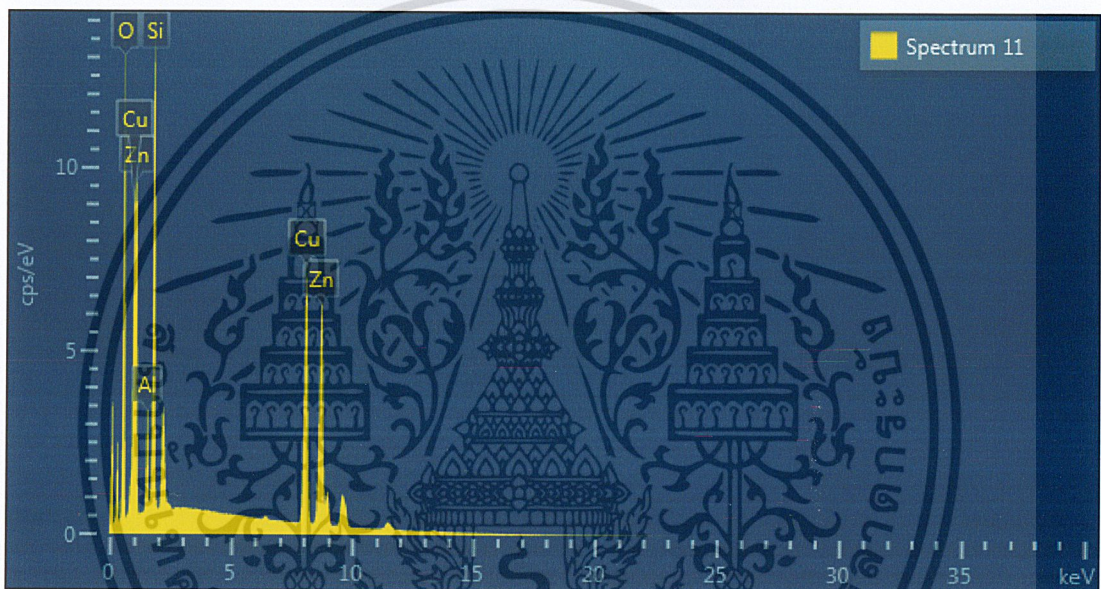
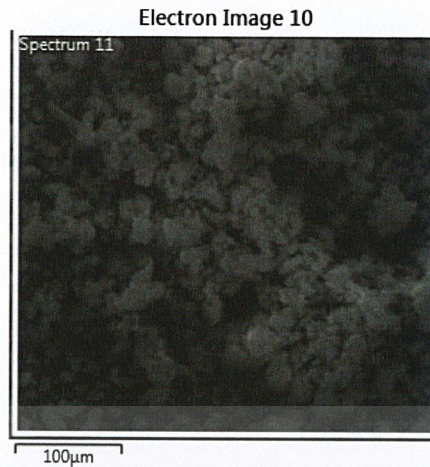


รูปที่ 4.8 Map Spectrum  $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
O	K series	24.40	0.08210	39.99	0.20	63.91	$\text{SiO}_2$	Yes	
Al	K series	1.06	0.00758	3.59	0.08	3.40	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Yes	
Si	K series	7.10	0.05629	20.06	0.12	18.26	$\text{SiO}_2$	Yes	
Cu	K series	10.30	0.10304	18.37	0.15	7.39	Cu	Yes	
Zn	K series	10.10	0.10098	17.99	0.17	7.03	Zn	Yes	
Total:				100.00		100.00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

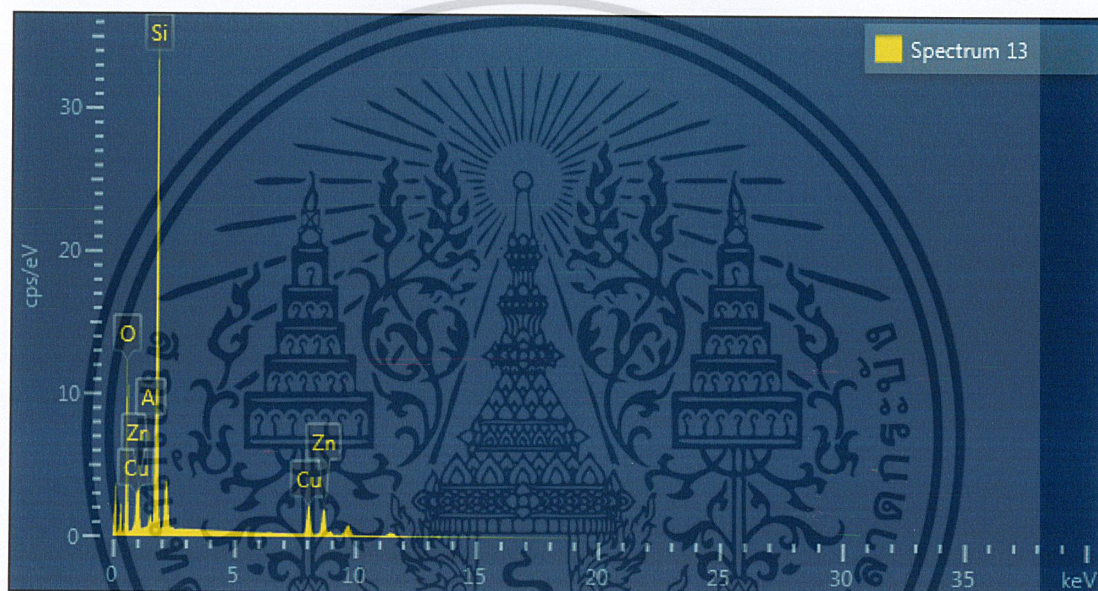
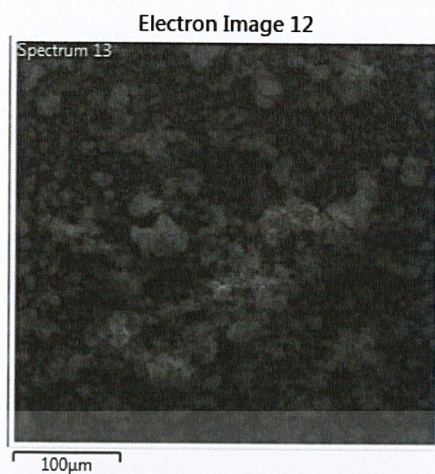


รูปที่ 4.9 Map Spectrum  $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดย น้ำหนัก

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
O	K series	37.50	0.12618	29.27	0.13	55.06	$\text{SiO}_2$	Yes	
Al	K series	2.27	0.01631	4.12	0.06	4.60	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Yes	
Si	K series	10.35	0.08201	15.26	0.08	16.35	$\text{SiO}_2$	Yes	
Cu	K series	31.91	0.31914	25.22	0.11	11.95	Cu	Yes	
Zn	K series	33.14	0.33141	26.13	0.12	12.03	Zn	Yes	
Total:				100.00		100.00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 Map Spectrum  $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  ในอัตราส่วน 1:2 (0:1710:0.3300กรัม) โดย น้ำหนัก

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  ในอัตราส่วน 1:2 (0:1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
O	K series	37.50	0.12618	29.27	0.13	55.06	$\text{SiO}_2$	Yes	
Al	K series	2.27	0.01631	4.12	0.06	4.60	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Yes	
Si	K series	10.35	0.08201	15.26	0.08	16.35	$\text{SiO}_2$	Yes	
Cu	K series	31.91	0.31914	25.22	0.11	11.95	Cu	Yes	
Zn	K series	33.14	0.33141	26.13	0.12	12.03	Zn	Yes	
Total:				100.00	100.00	100.00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ร้อยละธาตุแต่ละชนิดที่ปรากฏบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

ตัวเร่งปฏิกิริยา	%O	%Al	%Si	%Cu	%Zn
CuOZnOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /HZSM-5 (1:1 = 0.2517:0.2510)	36.99	1.80	28.33	16.51	16.37
CuOZnOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /HZSM-5 (2:1 = 0.3346:0.1723)	39.99	3.59	20.06	18.37	17.99
CuOZnOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /HZSM-5 (3:1 = 0.3750:0.1250)	29.27	4.12	15.26	25.22	26.13
CuOZnOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /HZSM-5 (1:2 = 0.1710:0.3310)	41.15	1.06	37.10	10.24	10.45

จากตารางที่ 4.5 พบปริมาณองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นไปตามอัตราส่วนที่สังเคราะห์จากวิธีการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) โดยใช้อัตราส่วน CuO:ZnO:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 4.5:4.5:1 และเมื่อนำไปผสมกับซีโอไลต์ในปริมาณที่ต่างกันซึ่งผสมด้วยวิธีทางกายภาพ (physical mixing) จะพบว่าปริมาณองค์ประกอบเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นไปตามอัตราส่วนที่ผสมกัน

#### 4.2 การศึกษาผลการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจนเหลวโดยใช้แก๊สสังเคราะห์ จะสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.00 มิลลิเมตร สามารถบรรจุสารได้ทั้งหมด 1 กรัม โดยจะใช้บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม และ quartz sand อีก 0.5000 กรัม การปรับสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกำจัดแก๊สที่ไม่จำเป็นออกด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เป็นโลหะคอปเปอร์ (Cu<sup>0</sup>) ด้วยแก๊สไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ในแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ต่อจากนั้นใช้แก๊สสังเคราะห์ในอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 2:1 โดยโมล ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 40 บาร์ มีอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์กับ 10.20 กรัมชั่วโมงต่อโมล ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาทั้งหมด 4 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์จะถูกเก็บทุก ๆ 1 ชั่วโมงเพื่อนำมาวิเคราะห์แยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา โดยจะวิเคราะห์หาละเอียดการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด และร้อยละผลิตภัณฑ์ของการสังเคราะห์

แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่อัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกันเป็น 1:1 (0.2517:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วย offline gas chromatography รุ่น CP-3800 ยี่ห้อ VARIAN โดยใช้คอลัมน์ CP-7538 ต่อกับ Thermal Conductivity Detector (TCD) เพื่อวิเคราะห์หาแก๊สเฉื่อย หรือ แก๊สอาร์กอน (Ar) และคอลัมน์ HP-PLOT/Q จะต่อกับ Flame Ionization Detector (FID) เพื่อวิเคราะห์หาสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ในไฮโดรเจนและอากาศ ได้แก่ เมทานอล ไดเมทิลอีเทอร์ ไฮโดรคาร์บอน (มีเทน โพรเพน บิวเทน) หรือที่เป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่ต้องการ เป็นต้น

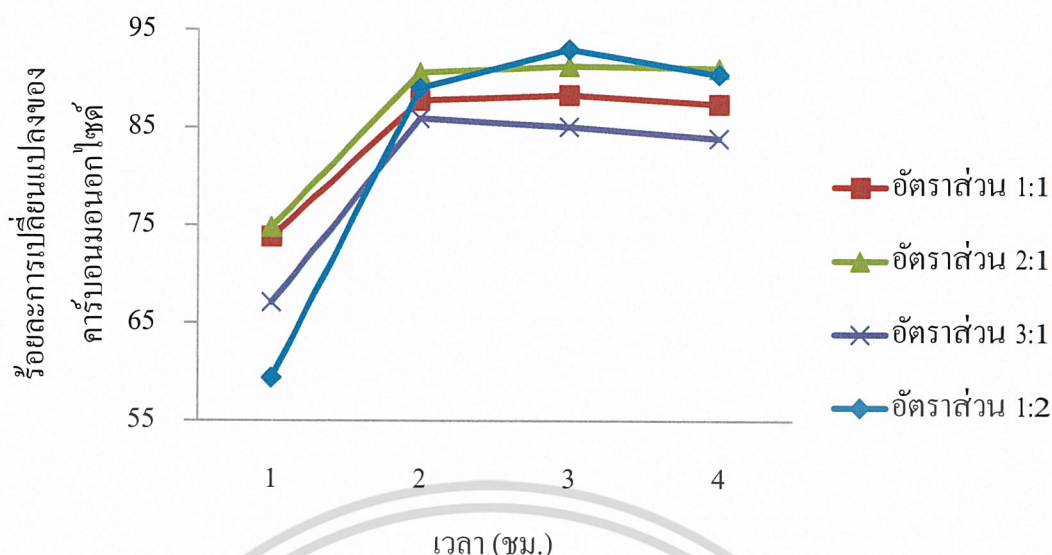
การสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์เป็นปฏิกิริยาที่เกิดผ่านเมทานอลและไดเมทิลอีเทอร์ ซึ่งมี 2 ขั้นตอนดังนี้



โดยในขั้นตอนที่ 1 เป็นส่วนของการสังเคราะห์เมทานอลโดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (สมการที่ 4.1) และขั้นตอนที่ 2 คือ ส่วนของเมทานอลจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ แล้วเกิดการตั้งน้ำออกไปเป็นไฮโดรคาร์บอน (สมการที่ 4.2-4.3) จากสมการต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าสมการที่ 4.3 เกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำออกของไดเมทิลอีเทอร์เพื่อเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ซึ่งในขั้นตอนแรกที่เกิดการสังเคราะห์เมทานอลมีหลายขั้นตอนจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นช้ากว่าการขจัดน้ำออกของเมทานอลไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ซึ่งจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าเพราะเป็นปฏิกิริยาในขั้นตอนเดียว ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาในส่วนของ การสังเคราะห์เมทานอลนั้นเป็นขั้นควบคุมปฏิกิริยาโดยรวม

#### 4.2.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion)

ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงแก๊สสังเคราะห์ ( $\text{H}_2:\text{CO}$ ) ที่เป็นสารตั้งต้น ไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ พบว่ามีการเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยาในชั่วโมงที่ 1 และมีแนวโน้มที่จะลดลงประมาณชั่วโมงที่ 3 แสดงได้ดังกราฟที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

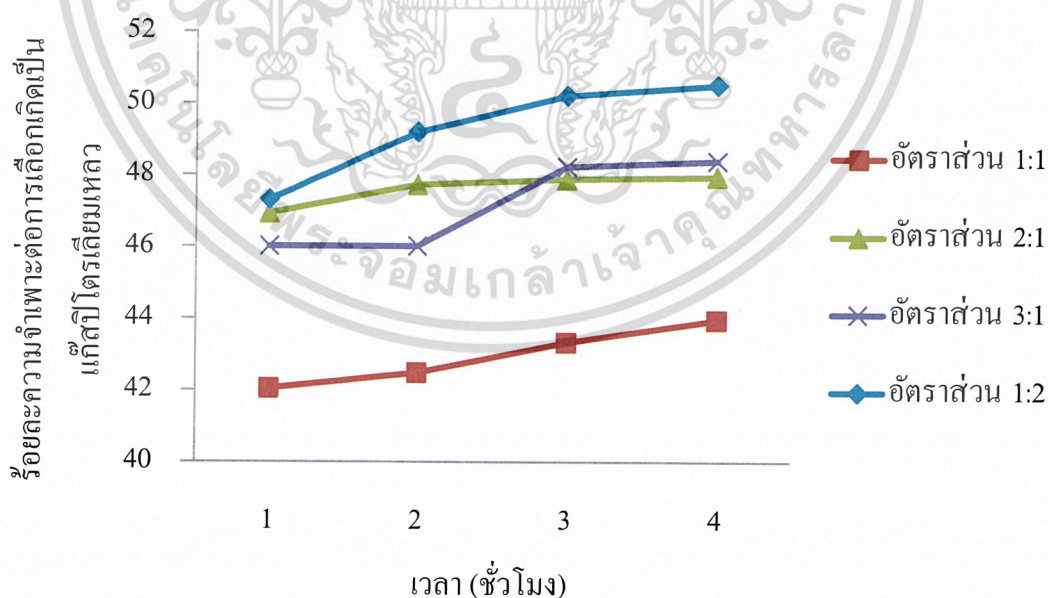
อัตราส่วน	ชั่วโมง				เฉลี่ย
	1	2	3	4	
1:1 (0.2517:0.2510)	73.86	87.78	88.35	87.42	84.35
2:1 (0.3346:0.1723)	74.83	90.65	91.30	91.09	86.97
3:1 (0.3750:0.1250)	67.11	85.94	85.09	83.90	80.51
1:2 (0.1710:0.3300)	59.42	89.04	93.02	90.44	82.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง 4.6 แสดงการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาในทุก ๆ อัตราส่วน พบว่าอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และเกิดความเสถียรของค่ามากที่สุด ที่ร้อยละเฉลี่ยเป็น 86.97 เนื่องจากมีปริมาณอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนข้างมาก ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้เร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนการสังเคราะห์เมทานอล ทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นสูงที่สุด ส่วนอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก มีร้อยละเฉลี่ยเป็น 80.51 ซึ่งมีปริมาณคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นตำแหน่งเร่งมากเกินไป ทำให้ปริมาณตำแหน่งเร่งที่เป็นกรดหรือซีโอไลต์ไม่เพียงพอ ส่งผลให้มีการเร่งปฏิกิริยาการขจัดน้ำออกจากเมทานอลและไดเมทิลอีเทอร์ได้น้อยลงจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์หรือสารตั้งต้นน้อยที่สุด

#### 4.2.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity)

ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด เป็นการแสดงให้เห็นถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์ข้างเคียง โดยในปฏิกิริยาการสังเคราะห์นี้ผลิตภัณฑ์หลักคือ แก๊สปีโตรเลียมเหลว และผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ได้แก่ ไดเมทิลอีเทอร์ เมทานอล ไฮโดรคาร์บอน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีค่าน้อยมาก โดยอัตราการเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลว จากการใช้แก๊สสังเคราะห์โดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดยน้ำหนักนั้น พบว่า มีอัตราการเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.12



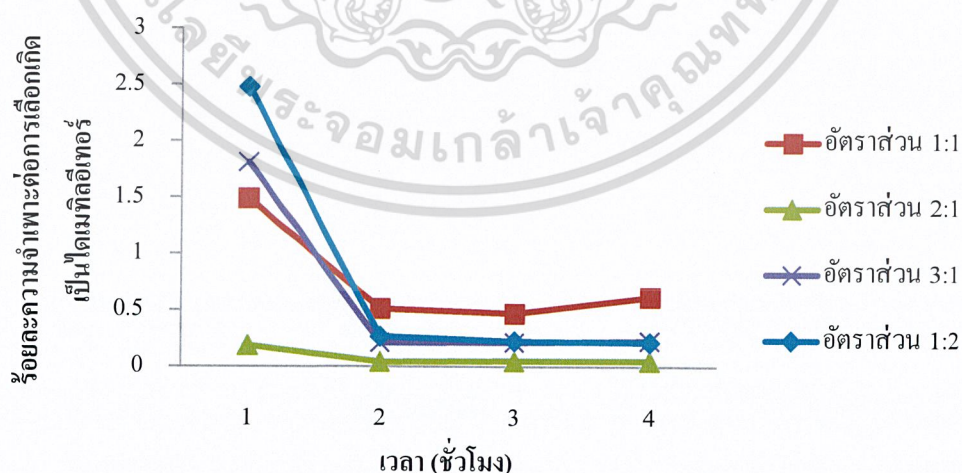
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวกับเวลาใน

การทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของแก๊สปีโตรเลียมเหลวกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

ชั่วโมง \ อัตราส่วน	1	2	3	4	เฉลี่ย
1:1 (0.2516:0.2510)	42.05	42.49	43.34	43.96	42.96
2:1 (0.3346:0.1710)	46.94	47.73	47.89	47.96	47.63
3:1 (0.3750:0.1250)	46.01	46.02	48.23	48.39	47.16
1:2 (0.1710:0.3300)	47.32	49.20	50.22	50.51	49.31

จากตารางที่ 4.7 อัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300 กรัม) โดยน้ำหนัก มีค่าความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวมากที่สุดที่ร้อยละเฉลี่ย 49.31 เนื่องจากมีอัตราส่วนของซีโอไลต์หรือตำแหน่งเร่งที่เป็นกรดมาก จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำออกจากเมทานอลและไดเมทิลอีเทอร์ได้ดี และรองลงมาคืออัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723 กรัม) โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกันเฉลี่ยร้อยละ 47.63

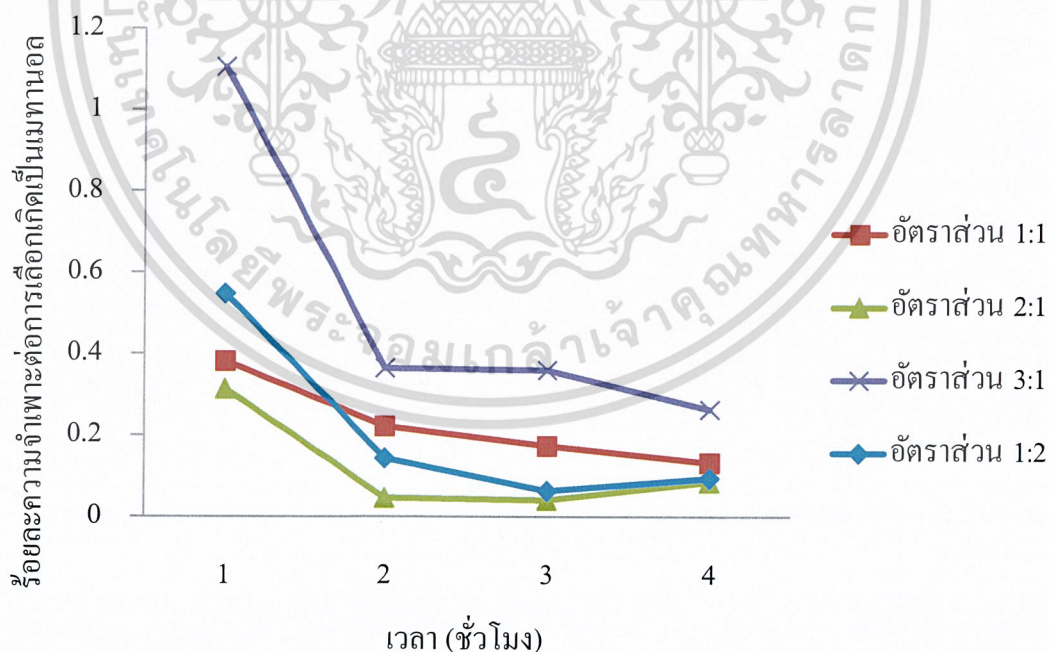


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของโตเมทิลอีเทอร์กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

อัตราส่วน \ ชั่วโมง	1	2	3	4	เฉลี่ย
1:1 (0.2516:0.2510)	1.49	0.52	0.47	0.62	0.78
2:1 (0.3346:0.1710)	0.19	0.05	0.05	0.05	0.09
3:1 (0.3750:0.1250)	1.81	0.21	0.22	0.23	0.62
1:2 (0.1710:0.3300)	2.48	0.27	0.23	0.22	0.80



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นเมทานอลกับเวลาในการทำ

ปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ใน

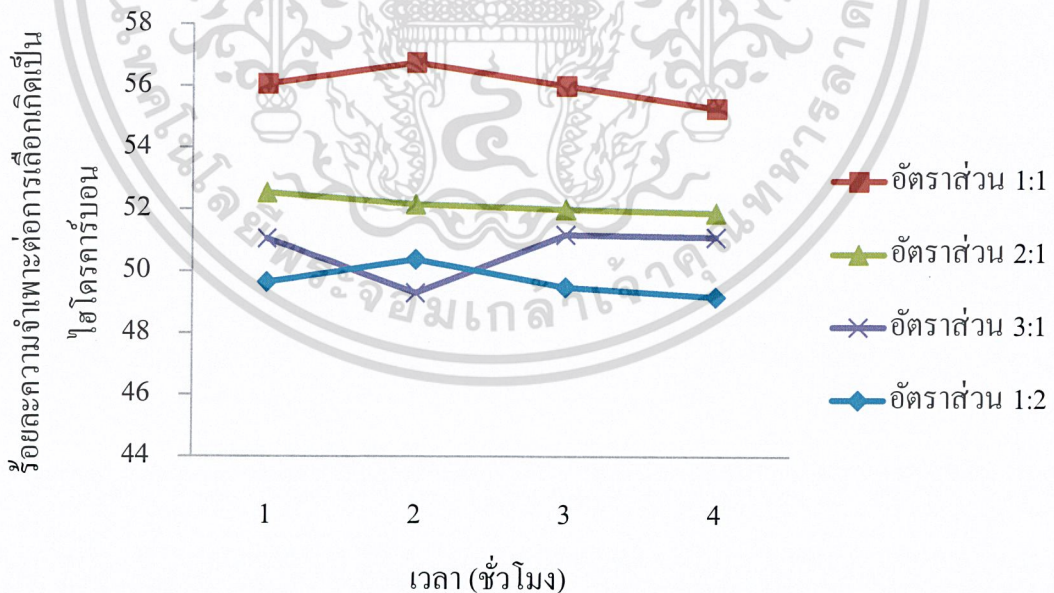
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

อัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของเมทานอลกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

อัตราส่วน \ ชั่วโมง	ชั่วโมง				เฉลี่ย
	1	2	3	4	
1:1 (0.2516:0.2510)	0.38	0.22	0.17	0.13	0.23
2:1 (0.3346:0.1710)	0.31	0.05	0.04	0.09	0.12
3:1 (0.3750:0.1250)	1.11	0.37	0.36	0.26	0.53
1:2 (0.1710:0.3300)	0.55	0.55	0.06	0.10	0.32



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

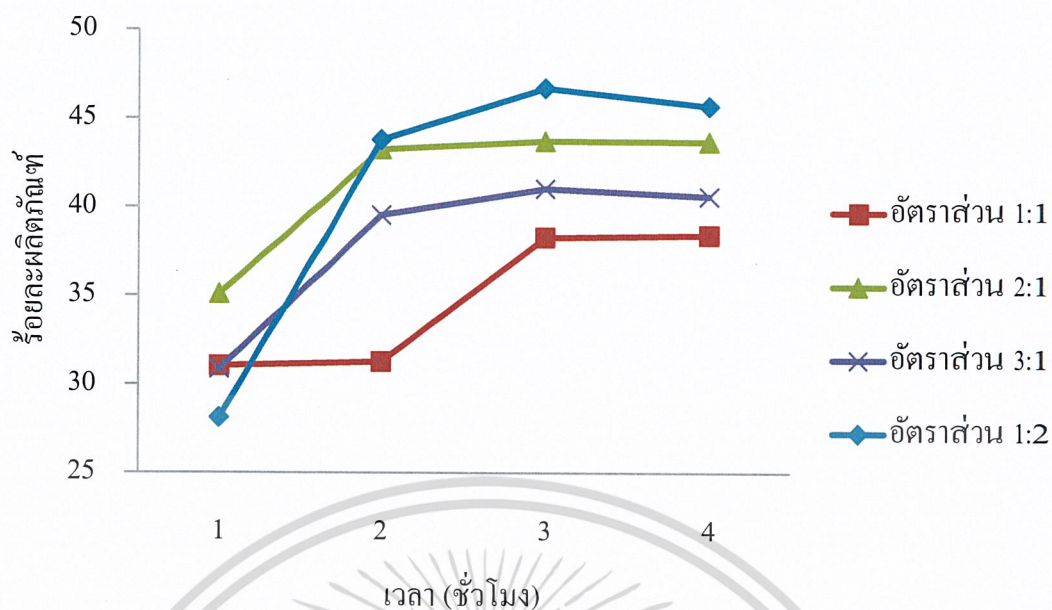
ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไฮโดรคาร์บอนกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก

ชั่วโมง อัตราส่วน	1	2	3	4	เฉลี่ย
1:1 (0.2516:0.2510)	56.07	56.77	56.01	55.29	56.04
2:1 (0.3346:0.1710)	52.55	52.17	52.01	51.90	52.16
3:1 (0.3750:0.1250)	51.06	49.30	51.19	51.11	50.67
1:2 (0.1710:0.3300)	49.65	50.39	49.49	49.18	49.68

จากรูปที่ 4.13-4.15 และตารางที่ 4.8-4.10 แสดงให้เห็นถึงผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์โดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกันพบว่า ปริมาณผลิตภัณฑ์ข้างเคียงในชั่วโมงที่ 1-3 จะเกิดน้อยเนื่องจากการผลิตแก๊สปีโตรเลียมเหลวมาก และในชั่วโมงที่ 4 ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจะเริ่มเพิ่มขึ้นและคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมจะลดลงตามการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.2.3 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield)

ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปีโตรเลียมเหลว แสดงถึงประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลว พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาสร้างแก๊สปีโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปีโตรเลียมเหลวกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่ต่างกันโดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณร้อยละผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่ต่างกันโดยน้ำหนัก

อัตราส่วน ชั่วโมง	ชั่วโมง				เฉลี่ย
	1	2	3	4	
1:1 (0.2516:0.2510)	31.06	31.30	38.29	38.43	34.77
2:1 (0.3346:0.1710)	35.13	43.27	43.72	43.69	41.45
3:1 (0.3750:0.1250)	30.88	39.55	41.04	40.60	38.02
1:2 (0.1710:0.3300)	28.12	43.81	46.72	45.68	41.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.11 พบว่าอัตราส่วน 2:1 (0.33:0.17 กรัม) โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ เป็นแก๊สปิโตรเลียมมากที่สุดเฉลี่ยเป็น 41.45 แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนนี้สามารถสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวได้ดีและมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวอื่น ๆ ทำให้อัตราส่วน 2:1 เหมาะสมที่สุด

**ตารางที่ 4.12** ผลการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันโดย น้ำหนัก

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (0.5กรัม)	ร้อยละการ เปลี่ยนแปลงของ คาร์บอนมอนอกไซด์	ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด					ร้อยละ ผลิตภัณฑ์ ของLPG
		แก๊ส ปิโตรเลียม เหลว	ไฮโดร คาร์บอน	โตเมทิล อีเทอร์	เมทา นอล	คาร์บอนได ออกไซด์	
1:1 (0.25:0.25)	84.35	42.96	56.04	0.77	0.23	0.0016	34.77
2:1 (0.33:0.17)	86.97	47.63	52.16	0.09	0.12	0.0034	41.45
3:1 (0.37:0.13)	80.51	47.16	50.67	0.62	0.52	1.0300	38.02
1:2 (0.17:0.33)	82.98	49.31	49.67	0.80	0.21	0.0012	41.08

ผลการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$ ) บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่เตรียมได้จากวิธีการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) และการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก สำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวที่สภาวะคงที่สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.12 ซึ่งค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ ขึ้นกับ 2 ปัจจัยที่สำคัญ ปัจจัยแรกคือพื้นที่ผิวของโลหะคอปเปอร์สำหรับปฏิกิริยาสังเคราะห์เมทานอล (CO hydrogenation or methanol formation) โดยโลหะคอปเปอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นโลหะว่องไว ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวสนับสนุน (supporter) ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของผลึกคอปเปอร์และช่วยลดโอกาสการเกิดการรวมตัวกันของผลึกคอปเปอร์ ส่วนอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นตัวส่งเสริม (promoter) เพื่อช่วยเพิ่มความทนทานต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (thermal stability)

อีกปัจจัยหนึ่งคืออัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกันของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลว และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองเมื่อนำไปตรวจวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510 กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก เท่ากับ 84.35 86.97 80.51 และ 82.98 ตามลำดับ ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก เท่ากับ 42.96 47.63 47.16 และ 49.31 ตามลำดับ และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปีโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก เท่ากับ 34.77 41.45 38.02 และ 41.08 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก มีผลการเกิดแก๊สปีโตรเลียมเหลวที่ใกล้เคียงกัน ในโครงการพิเศษนี้จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนักเหมาะสมในปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวโดยตรงมากที่สุด เนื่องจากอัตราส่วน 2:1 ใช้ปริมาณซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 น้อยกว่า อัตราส่วน 1:2 แต่ให้ผลการผลิตแก๊สปีโตรเลียมเหลวที่ไม่แตกต่างกันมาก สังเกตจากค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวและค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ ซึ่งอัตราส่วน 2:1 จะคุ้มค่าสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมมากกว่าอัตราส่วน 1:2 ที่มีปริมาณซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 มากแต่ต้นทุนค่อนข้างสูง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 สำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว โดยตรงที่เตรียมได้จากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนระหว่าง คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 นอกจากนี้ยังวิเคราะห์การแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม (Gas Chromatography : GC) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นที่ดีที่สุดของ ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 สามารถสรุป ผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 สำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว โดยตรง ที่อัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) และ 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มาทดสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่ง ปฏิกิริยาโดยเทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน (X-ray Diffraction, XRD) เพื่อเป็นการ ยืนยันโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO), ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และ ซีโอไลต์ ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะทาง สัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการตรวจสอบ ปริมาณธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิคการกระจายพลังงาน (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, SEM-EDS) พบว่าพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแบบผสม (bi-functional catalyst) โดยคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและมีบางส่วนกระจายอยู่บนพื้นผิวของซีโอไลต์ ส่วนปริมาณสารก็เป็นไปตามอัตราส่วนอย่างชัดเจน และจากการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าร้อยละการ เปลี่ยนแปลงคาร์บอนมอนอกไซด์และค่าความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวของ ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 สำหรับการ สังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ พื้นผิวของโลหะคอปเปอร์และอัตราส่วนโดยน้ำหนักในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊ส

ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนมอนอกไซด์ ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สปิโตรเลียมเหลว ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 อัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก จะมีประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเหมาะสมกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ซึ่งมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สปิโตรเลียมเหลวสูงที่สุดถึง 86.97 47.63 และ 41.45 ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 สำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยตรงด้วยอัตราส่วนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ศึกษาผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้เพิ่มเติม เช่น EDS BET TPR XRF Infrared Absorption Spectrum of Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O) เป็นต้น เพื่อยืนยันผลการทดลอง

2. ศึกษาผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้หลังทำปฏิกิริยาที่โลหะคอปเปอร์ (II) ถูกรีดิวซ์แล้ว เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยา

3. ศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ด้วยวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้จากโครงการพิเศษนี้

4. ศึกษาผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ได้หลังจากการทำปฏิกิริยา

5. ศึกษาการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วย online-gas chromatography

6. ศึกษาการเปลี่ยนชนิดซีโอไลต์ เพื่อให้มีความจำเพาะต่อการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวมากขึ้น เช่น เบต้าซีโอไลต์ แพลเลเดียมเบต้า เป็นต้น

7. มีการทำซ้ำของปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยที่มีความแม่นยำของผลการทดลองมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

กรมธุรกิจพลังงาน. ม.ป.ป. คุณสมบัติของก๊าซปิโตรเลียมเหลว. [Online]. Available : [http://www.doeb.go.th/knowledge/knowledge\\_article\\_Natural2.htm](http://www.doeb.go.th/knowledge/knowledge_article_Natural2.htm).

กรมธุรกิจพลังงาน. 2556. บทความเรื่องก๊าซปิโตรเลียมเหลว LPG. [Online]. Available : [http://www.doeb.go.th/knowledge/knowledge\\_article.html](http://www.doeb.go.th/knowledge/knowledge_article.html).

กรุงเทพเคมี. 2560. ซิงค์ออกไซด์. [Online]. Available : <https://กรุงเทพเคมี.com/ซิงค์ออกไซด์สังกะสีออกไซด์-Zinc-Oxide>.

จริญญา มาศอรุณ. 2550. “การตอบสนองทางการตลาดของก๊าซแอลพีจีตามความคิดเห็นของผู้บริโภคสำหรับรถยนต์นั่ง.” วิทยานิพนธ์บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาวิชาบริหารธุรกิจ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

ดลฤดี โตเย็น. 2559. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). [Online]. Available : <http://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/EDS.pdf>.

ไทยเอนไวรอนเมนบลอค. 2559. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว LPG. [Online]. Available : <http://thaienvironmentblog.com/basic-knowledge-lpg-gas/>.

นฤมล ทองขาว. 2557. “การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/ZnO-ZSM-5 โดยอัลตราโซนิคสเปรย์ไฟโรไลซิสและการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มัลสำหรับการผลิตแอลพีจี.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บริษัท ดับบลิวพี เอ็นเนอร์ยี จำกัด (มหาชน). 2562. LPG พลังงานบริสุทธิ์. [Online]. Available : <https://www.wp-energy.co.th/th/what-we-do/product-services/lpg-for-life>.

ปวีณสุตา เนตรวงศ์. 2555. “ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์/ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคสเปรย์สำหรับการสังเคราะห์ดีเมทิลอีเทอร์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2556. LPG คืออะไร. [Online]. Available : [http://eng.sut.ac.th/me/meold/3\\_2552/436306/LPG.pdf](http://eng.sut.ac.th/me/meold/3_2552/436306/LPG.pdf).

วิทวัส รัตนถาวร. 2557. “การสังเคราะห์แอลพีจีโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่งปฏิกิริยาลูกผสมของคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์และเส้นใยซิลิกาเคลือบด้วย ZSM-5.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิรินุช ลอยหา. 2556. “ซีโอไลต์และเทคโนโลยีซีโอไลต์.” *วารสารวิทยาศาสตร์ มช.* 41(1) : 56-66.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ศุภมาศ ต่วนวิทยากุล. 2556. **ซิงค์ออกไซด์...วัสดุอเนกประสงค์**. [Online]. Available : [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/286\\_13-22.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/286_13-22.pdf).
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). 2563. **X-Ray Diffractometer (XRD)**. [Online]. Available : <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>.
- สรินทร์ ลิ้มปนาท. 2543. **มารู้จักกับ XRD กันเถอะ**. [Online]. Available : [http://www.neutron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1212&Itemid=4](http://www.neutron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=1212&Itemid=4).
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลัง. 2551. **ก๊าซ LPG พลังงานสำหรับการหุงต้ม**. [Online]. Available : [http://www.eppo.go.th/images/Infomation\\_service/Publication/Knowledge/LPG%20energy.pdf](http://www.eppo.go.th/images/Infomation_service/Publication/Knowledge/LPG%20energy.pdf).
- สำนักงานปลัดกระทรวงพลังงาน. 2561. **ประโยชน์ของ LPG**. [Online]. Available : <https://gnews.apps.go.th/news?news=24287>.
- สิริรัตน์ อยู่เวียงไชย. 2553. “ผลของชนิดซีโอไลต์ต่อการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ที่อุณหภูมิต่ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุดารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน. 2557. “การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์/ซิงค์ออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสสำหรับการสังเคราะห์แอลพีจี.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอ็นเอสแก๊ส. 2557. **บทความเรื่องก๊าซปิโตรเลียมเหลว LPG**. [Online]. Available : <http://www.nsgaslp.co.th/th/view/blog/53/บทความเรื่องก๊าซปิโตรเลียมเหลว-LPG>.
- Accuratus. 2013. **Aluminum Oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Properties**. [Online]. Available : <https://accuratus.com/alumox.html>.
- Allaker, R.P. 2013. “Nanoparticles and the Control of Oral Biofilms.” *Biomaterials*, 27(2006) : 3995-4002.
- Allaker, R.P. 2013. “Nanoparticles and the Control of Oral Biofilms.” *International Journal of Antimicrobial Agents*, 34 (2009) : 103-110.
- American Elements. 1998. **Copper(II)Oxide**. [Online]. Available : <https://www.americanelements.com/copper-ii-oxide-1317-38-0>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Arteta, L.O. Remiro, A. Vicente, J. Aguayo, A.T. Bilbao, J. Gayubo, A.G. 2014. “Stability of  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  and  $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{HZSM-5}$  catalysts in dimethyl ether steam reforming operating in reaction–regeneration cycles.” *Fuel Processing Technology*, 126(2014) : 145-154.
- Asami, K. Zhang, Q. Li, X. Asaoka, S. Fujimoto, K. 2005. “Semi-indirect synthesis of LPG from syngas: Conversion of DME into LPG.” *Catalysis Today*, 106(2005) : 247–251.
- Asthana, S. Samanta, Ch. Bhaumik, A. Banerjee, B. Voolapalli, R.K. Saha, B. 2016. “Direct synthesis of dimethyl ether from syngas over Cu-based catalysts: Enhanced selectivity in the presence of MgO.” *Journal of Catalysis*, 334(2016) : 89-101.
- Asthana, S. Samanta, Ch. Voolapalli, R.K. Saha, B. 2017. “Direct conversion of syngas to DME: synthesis of new Cu-based hybrid catalysts using Fehling’s solution, elimination of the calcination step.” *Journal of Materials chemistry A*, 6(2017).
- AZO Materials. 2011. **Zinc Oxide – Properties, Applications and the Future for ZnO.** [Online]. Available : <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5818>.
- Ball, S. 2016. **Thermo-chemical Conversion Technologies - Biomass Gasification.** [Online]. Available : <https://slideplayer.com/slide/6355897/>.
- Bara Scientific. 2020. **Gas chromatography detector.** [Online]. Available : <https://www.barascientific.com/article/App/Gas%20chromatography%20detector.php>.
- Erena, J. Vicente, J. Aguayo, A.T. Gayubo, A.G. Olazar, M. Bilbao, J. 2013. “Effect of combining metallic and acid functions in CZA/HZSM-5 desilicated zeolite catalysts on the DME steam reforming in a fluidized bed.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(2013) : 10019-10028.
- Figueiredoa, R.T. Santos, M.S. Andrade, H.M.C. Fierro, J.L.G. 2011. “Effect of alkali cations on the  $\text{CuZnO Al}_2\text{O}_3$  low temperature water gas-shift catalyst.” *Catalysis Today*, 172(2011) : 166-170.
- Gayubo, A.G. Alonso, A. Valle, B. Aguayo, A.T. Bilbao, J. 2010. “Selective production of olefins from bioethanol on HZSM-5 zeolite catalysts treated with NaOH.” *Applied Catalysis B: Environmental*, 97(2010) : 299-306.
- Ge, Q. Lian, Y. Yuan, X. Li, X. Fujimoto, K. 2007. “High performance Cu–ZnO/Pd-b catalysts for syngas to LPG.” *Catalysis Communications*, 9(2008) : 256–261.
- Ge, Q. Li, X. Fujimoto, K. 2007. “Application of modified  $\beta$  zeolite in the direct synthesis of LPG from syngas.” *Chemical Processes and Environments*. 808-0135.

Global Safety Management. 2014. **Safety data sheet of Aluminum Oxide.** [Online]. Available : [https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en\\_US/documents/programs/education/regulatory-documents/sds/chemicals/chemicals-a/S25149.pdf](https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/education/regulatory-documents/sds/chemicals/chemicals-a/S25149.pdf).

Global Safety Management. 2015. **Safety data sheet of Zinc Oxide.** [Online]. Available : [https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en\\_US/documents/programs/education/regulatory-documents/sds/chemicals/chemicals-z/S25641.pdf](https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/education/regulatory-documents/sds/chemicals/chemicals-z/S25641.pdf).

Hahn, E. 2019. **LPG GAS BLOG.** [Online]. Available : <https://www.elgas.com.au/blog/453-the-science-a-properties-of-lpg>.

Integra. 2015. **Safety data sheet of Zinc Oxide.** [Online]. Available : <https://www.integralife.com/file/general/Zinc%20Oxide%20SDS.pdf>.

Lu, P. Shen, D. Cheng, Sh. Hondo, E. Chizema, L.G. Wang, Ch. Gai, X. Lu, Ch. Yang, R. 2018. "The design of a CZ@H- $\beta$ -P catalyst with core shell structure and its application in LPG synthesis from syngas." *Fuel*, 223(2018) : 157-163.

Lu, P. Sun, J. Shen, D. Yang, R. Xing, C. Lu, Ch. Tsubaki, N. Shan, Sh. 2018. "Direct syngas conversion to liquefied petroleum gas: Importance of a multifunctional metal-zeolite interface." *Applied Energy*, 209(2018) : 1-7.

Ma, X. Ge, Q. Ma, J. Xu, H. 2013. "Synthesis of LPG via DME from syngas in two-stage reaction system." *Fuel Processing Technology*, 109(2013) : 1-6.

Neubauer, Y. Liu H. 2013. "Biomass gasification." *Woodhead Publishing Limited*, 2013 : 106-129.

National Center for Biotechnology Information. 2020. **Aluminium Oxide.** [Online]. Available : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Aluminum-oxide>.

National Center for Biotechnology Information. 2020. **Zinc Oxide.** [Online]. Available : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/ZINC-oxide>.

Peláez, R. Bryce, E. Marín, P. Ordóñez, S. 2018. "Catalyst deactivation in the direct synthesis of dimethyl ether from syngas over CuO/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mechanical mixtures." *Fuel Processing Technology*, 179(2018) : 378-386.

PTTGC. 2014. **LPG STORY.** [Online]. Available : <https://www.pttgcgroup.com/storage/download/knowledge/publication/20140909-pttgc-knowledge-lpg-lpgstory.pdf>.

Real, S.I. 2019. **Steam methane reforming.** [Online]. Available : <https://www.studentenergy.org/topics/steam-methane-reforming>.

- Riogen. 2020. HZSM-5. [Online]. Available : <https://shop.riogeninc.com/product.sc?productid=6416>.
- Talebi, M. Abbasizadeh, S. Keshtkar, A.R. 2017. "Evaluation of single and simultaneous thorium and uranium sorption from water systems by an electrospun PVA/SA/PEO/HZSM5 nanofiber." *Process Safety and Environmental Protection*, 109(2017) : 340-356.
- Vicente, J. Gayubo, A.G. Erena, J. Aguayo, A.T. Olazar, M. Bilbao, J. 2012. "Improving the DME steam reforming catalyst by alkaline treatment of the HZSM-5 zeolite." *Applied Catalysis B: Environmental*, 130-131(2013) : 73-83.
- Xiangang, M. Qingjie, G. Chuanyan, F. Junguo, M. Hengyong, X. 2011. "Direct synthesis of LPG from syngas derived from air-POM." *Fuel*, 90(2011) : 2051-2054.
- Zhang, P. Yang, G. Tan, L. Ai, P. Yang, R. Tsubaki, N. 2017. "Direct Synthesis of Liquefied Petroleum Gas from Syngas over H-ZSM-5 Enwrapped Pd-based Zeolite Capsule Catalyst." *Applied Chemistry*, 303(2017) : 77-85.
- Zhang, Q. Li, X. Asami, K. Asaoka, S. Fujimoto, K. 2004. "Synthesis of LPG from synthesis gas." *Fuel Processing Technology*, 85(2014) : 1139-1150.



ภาคผนวก

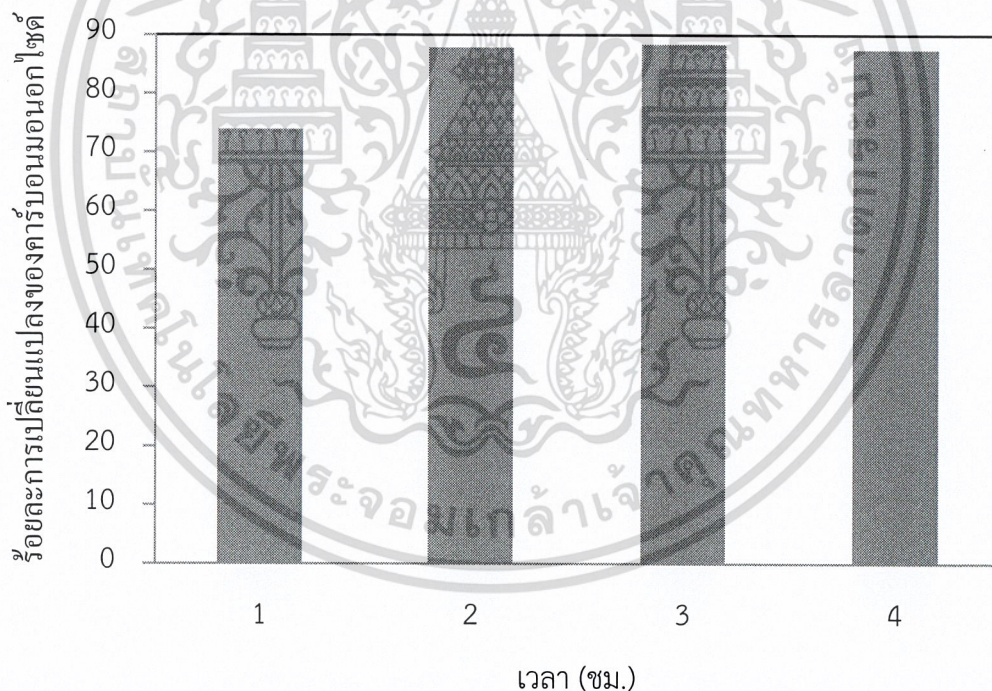
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก

เวลา (ชม.)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์
1	73.86
2	87.78
3	88.35
4	87.42

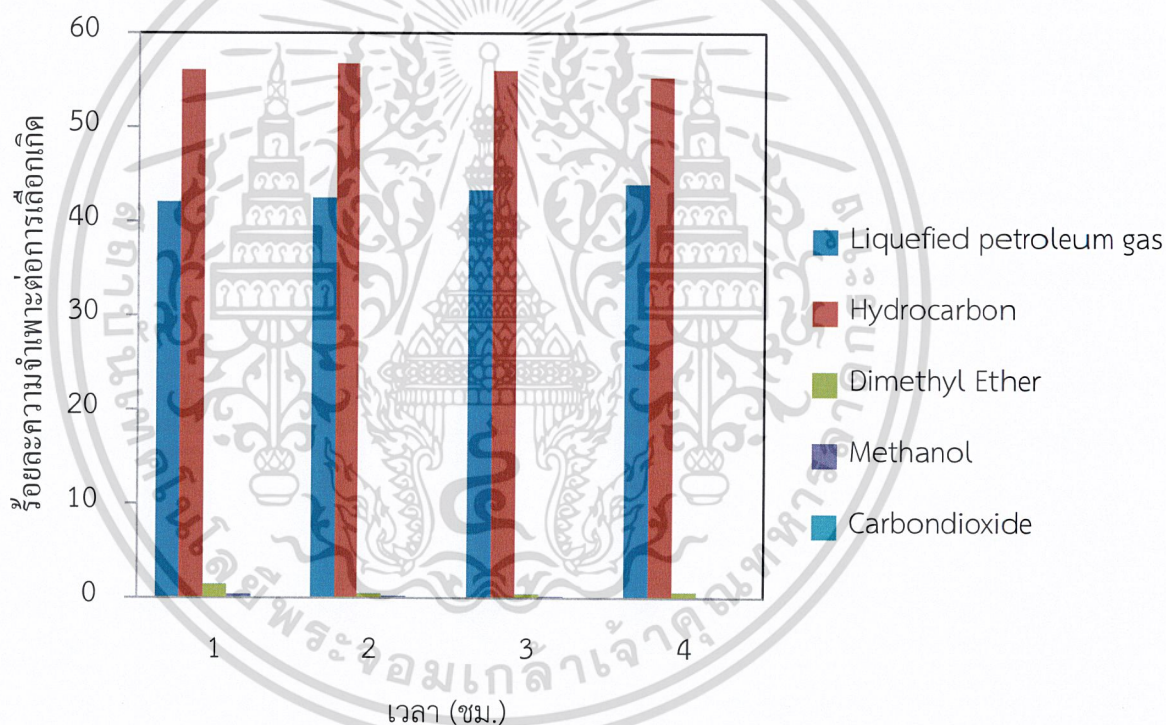


รูปที่ ก.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก

ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด					
เวลา(ชม.)	แก๊สปิโตรเลียมเหลว	ไฮโดรคาร์บอน	ไดเมทิลอีเทอร์	เมทานอล	คาร์บอนไดออกไซด์
1	42.05	56.07	1.49	0.38	0.0009
2	42.49	56.77	0.51	0.22	0.0026
3	43.34	56.01	0.47	0.17	0.0014
4	43.96	55.29	0.62	0.13	0.0012

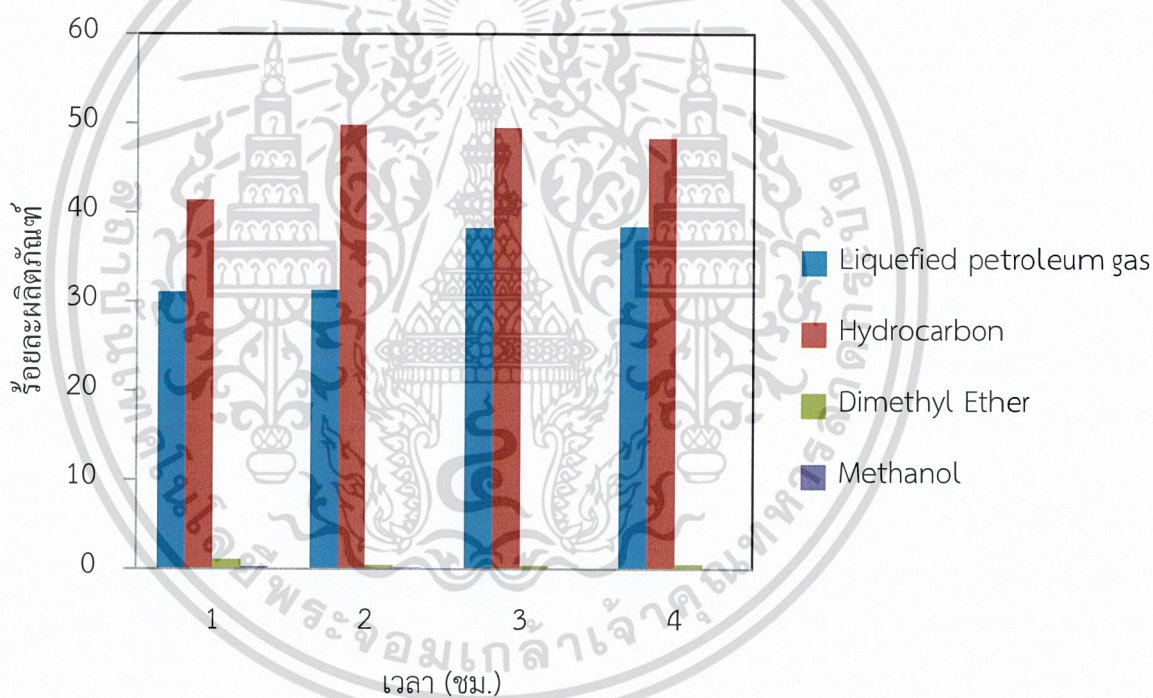


รูปที่ ก.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก

ร้อยละผลิตภัณฑ์				
เวลา(ชม.)	แก๊สปิโตรเลียมเหลว	ไดเมทิลอีเทอร์	เมทานอล	ไฮโดรคาร์บอน
1	31.06	1.10	0.28	41.41
2	31.30	0.45	0.19	49.83
3	38.29	0.42	0.15	49.48
4	38.43	0.54	0.11	48.34

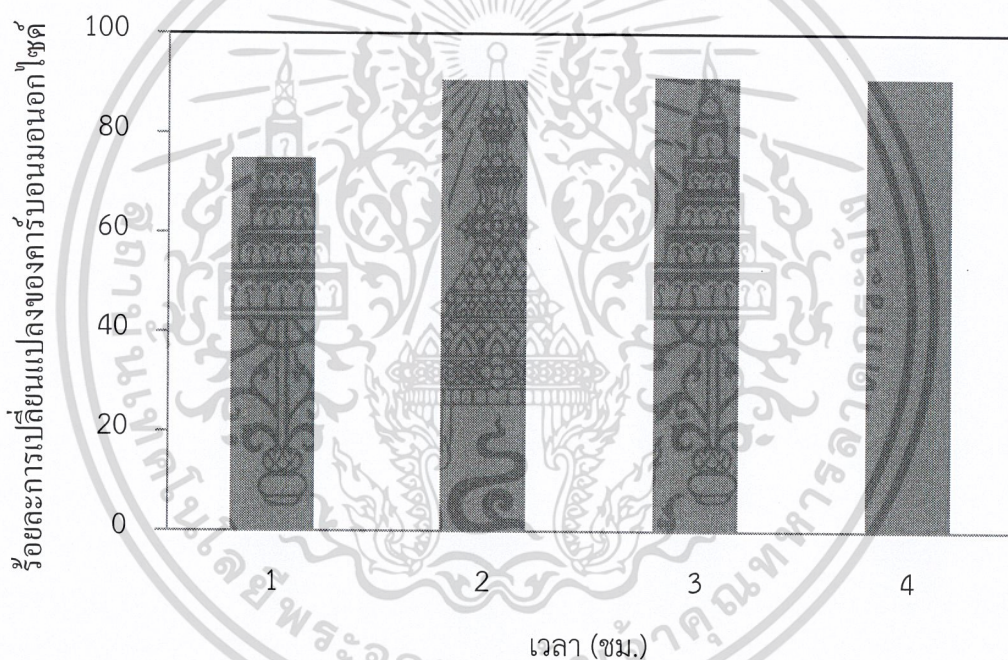


รูปที่ ก.3 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2516:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก

เวลา (ชม.)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์
1	74.83
2	90.65
3	91.30
4	91.09

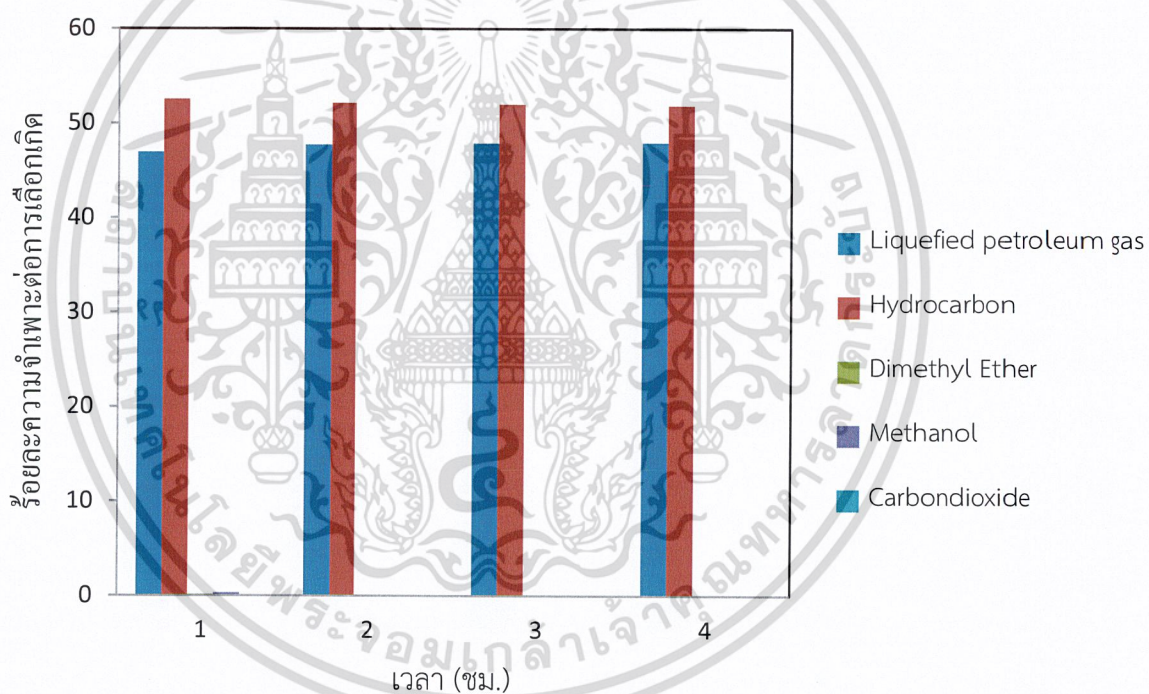


รูปที่ ก.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม)โดยน้ำหนัก

ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด					
เวลา(ชม.)	แก๊สปิโตรเลียมเหลว	ไฮโดรคาร์บอน	ไดเมทิลอีเทอร์	เมทานอล	คาร์บอนไดออกไซด์
1	46.94	52.55	0.19	0.31	0.0080
2	47.73	51.17	0.05	0.05	0.0016
3	47.89	52.01	0.05	0.04	0.0013
4	47.96	51.90	0.05	0.09	0.0025

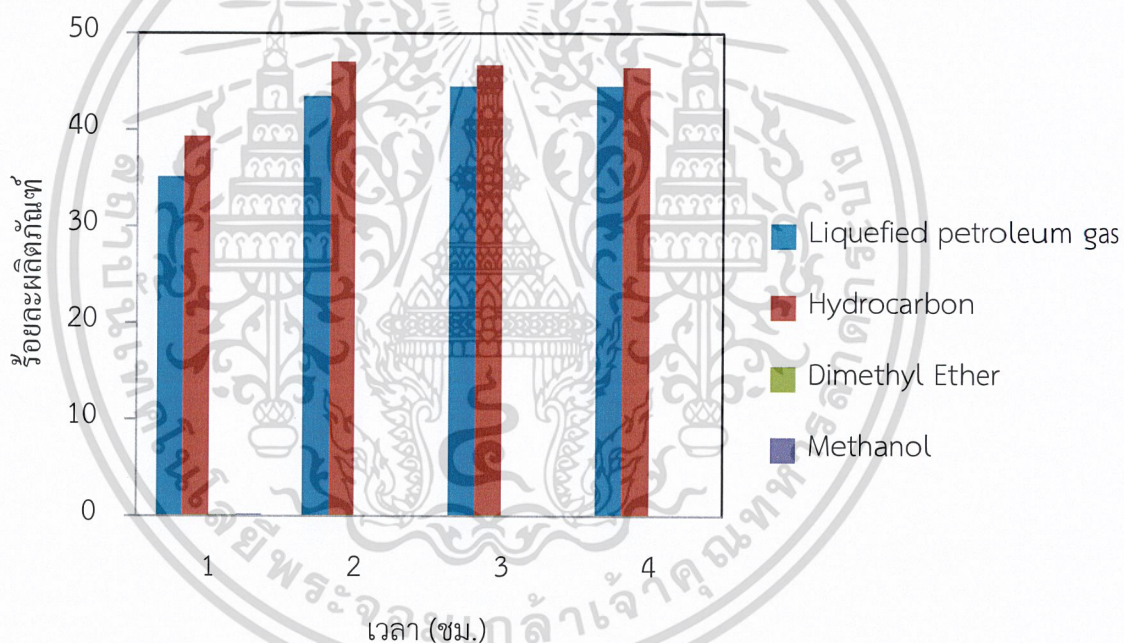


รูปที่ ก.5 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม)โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก

ร้อยละผลิตภัณฑ์				
เวลา(ชม.)	แก๊สปิโตรเลียมเหลว	ไดเมทิลอีเทอร์	เมทานอล	ไฮโดรคาร์บอน
1	35.13	0.14	0.23	39.32
2	43.27	0.05	0.05	47.29
3	43.72	0.05	0.04	47.49
4	43.69	0.05	0.08	47.28

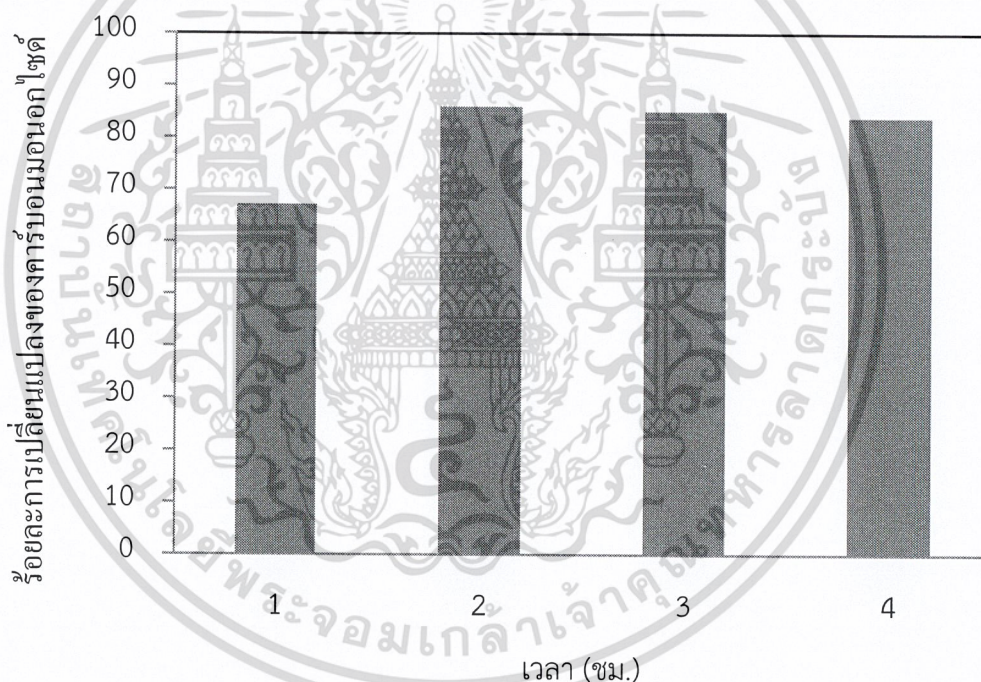


รูปที่ ก.6 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก

เวลา (ชม.)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์
1	67.11
2	85.94
3	85.09
4	83.90

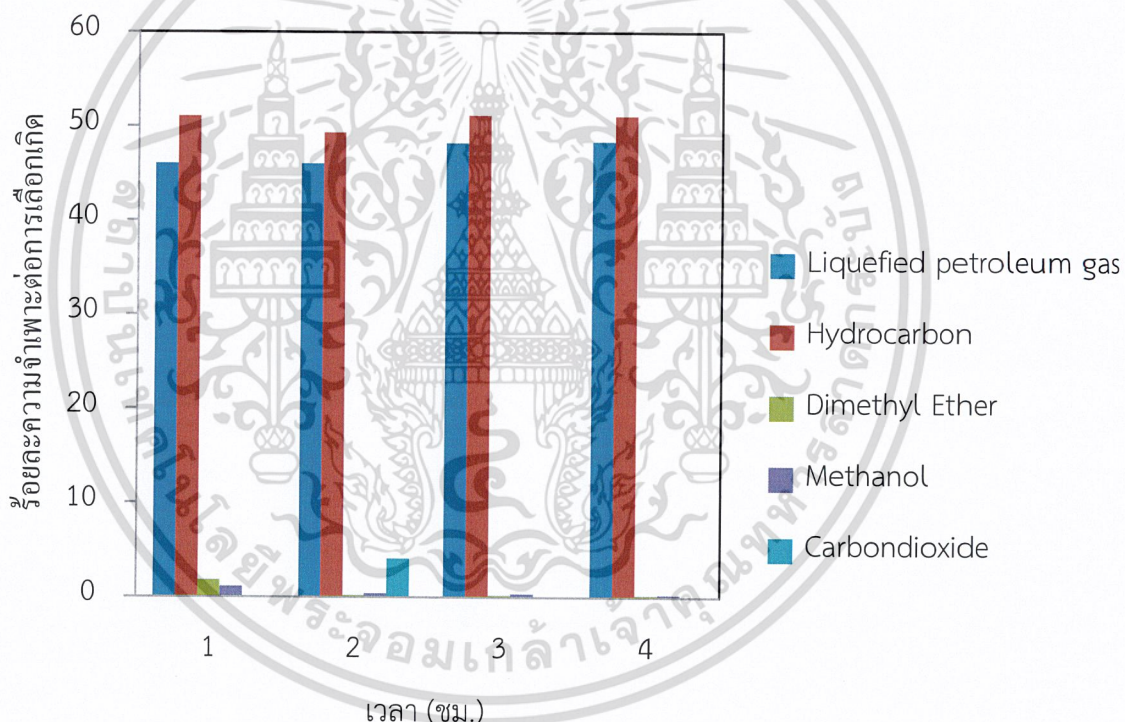


รูปที่ ก.7 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก

ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด					
เวลา(ชม.)	แก๊สปิโตรเลียมเหลว	ไฮโดรคาร์บอน	ไดเมทิลอีเทอร์	เมทานอล	คาร์บอนไดออกไซด์
1	46.01	51.06	1.81	1.11	0.0101
2	46.02	49.30	0.22	0.37	4.1025
3	48.23	51.19	0.22	0.36	0.0036
4	48.39	51.11	0.23	0.26	0.0037

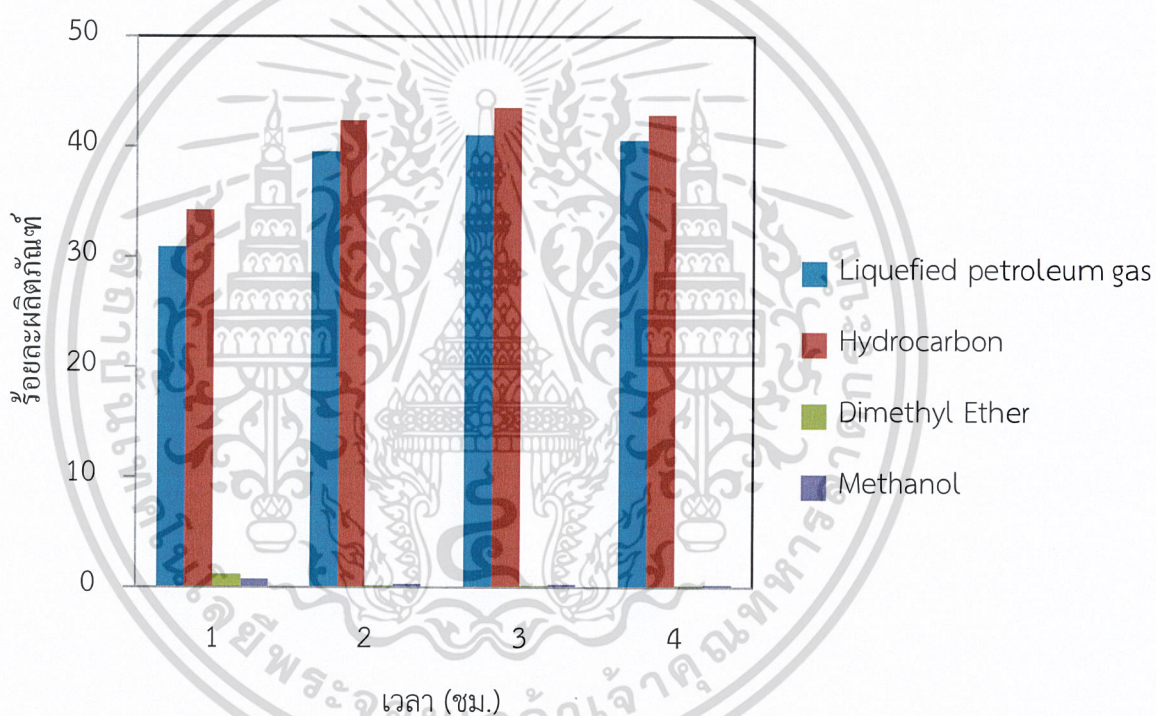


รูปที่ ก.8 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก

ร้อยละผลิตภัณฑ์				
เวลา(ชม.)	แก๊สปิโตรเลียมเหลว	ไดเมทิลอีเทอร์	เมทานอล	ไฮโดรคาร์บอน
1	30.88	1.21	0.75	34.27
2	39.55	0.18	0.32	42.37
3	41.04	0.19	0.31	43.56
4	40.60	0.19	0.22	42.88

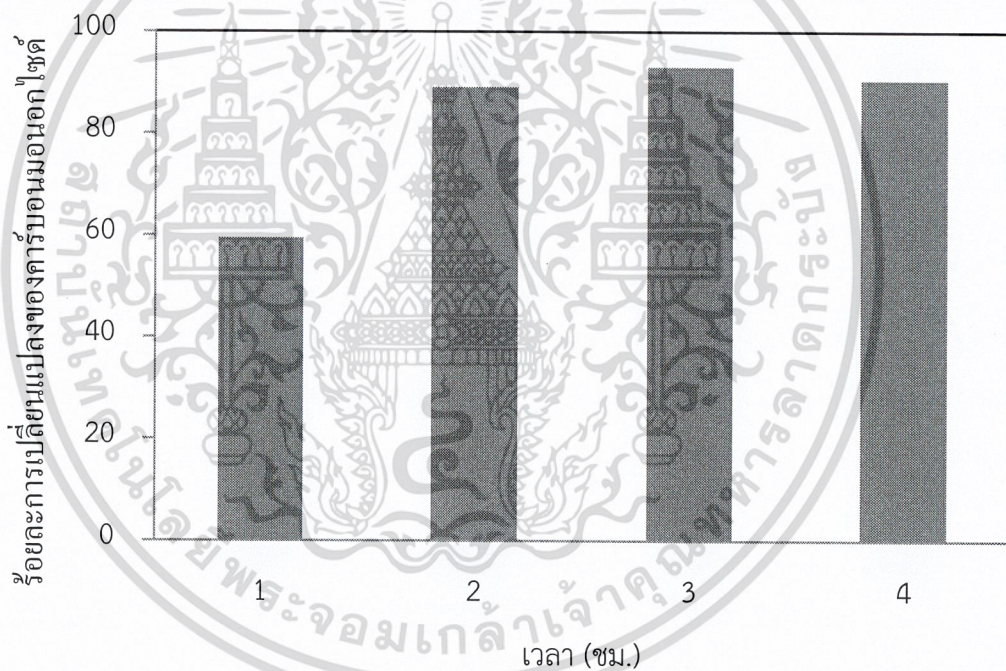


รูปที่ ก.9 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก

เวลา (ชม.)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์
1	59.42
2	89.04
3	93.02
4	90.44

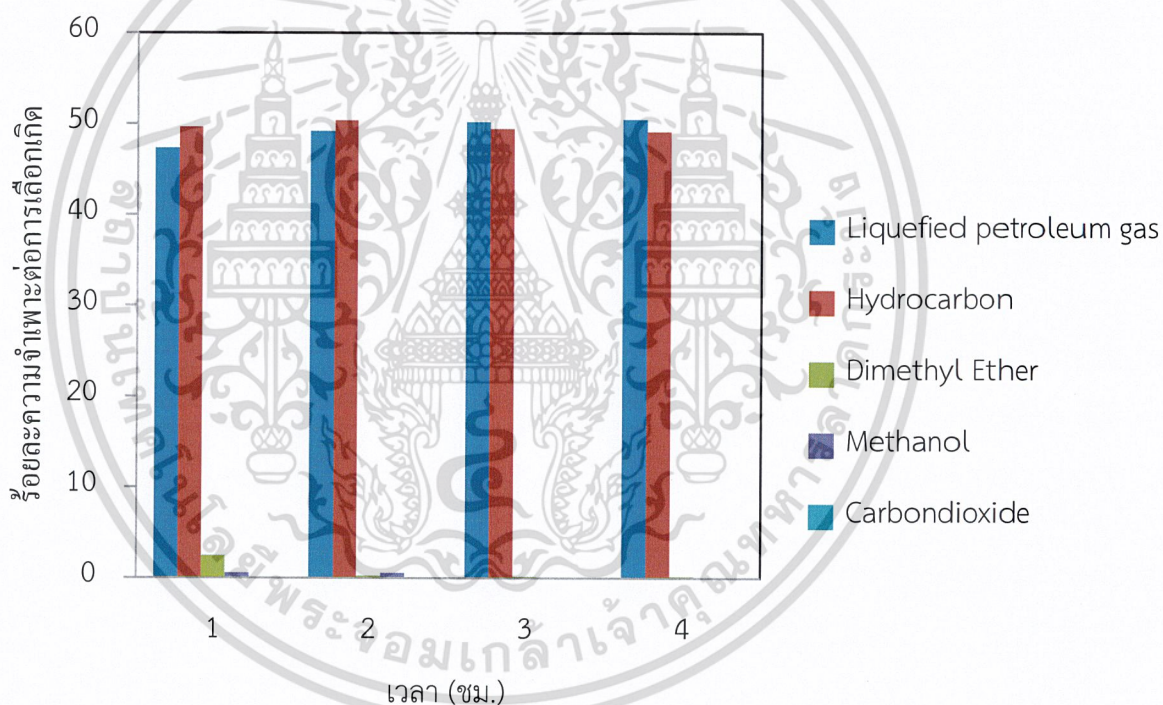


รูปที่ ก.10 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก

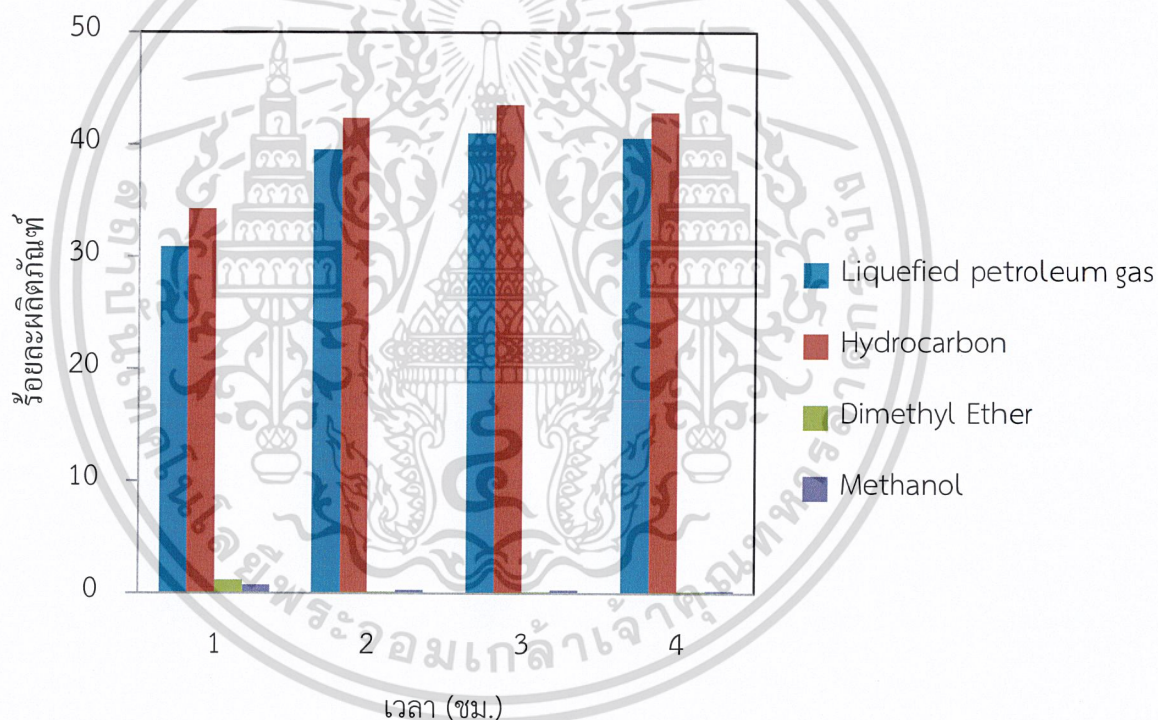
ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด					
เวลา(ชม.)	แก๊สปิโตรเลียมเหลว	ไฮโดรคาร์บอน	ไดเมทิลอีเทอร์	เมทานอล	คาร์บอนไดออกไซด์
1	47.32	49.65	2.48	0.55	0.0012
2	49.20	50.39	0.27	0.14	0.0015
3	50.22	49.49	0.23	0.06	0.0014
4	50.51	49.18	0.22	0.10	0.0007



รูปที่ ก.11 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ก.12 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียม ออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดย น้ำหนัก

ร้อยละผลิตภัณฑ์				
เวลา(ชม.)	แก๊สปิโตรเลียมเหลว	ไดเมทิลอีเทอร์	เมทานอล	ไฮโดรคาร์บอน
1	28.12	1.47	0.33	29.50
2	43.81	0.24	0.49	44.87
3	46.72	0.21	0.06	46.04
4	45.68	0.20	0.09	44.48



รูปที่ ก.12 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียม ออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1710:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.13 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด และร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (0.5กรัม)	ร้อยละการ เปลี่ยนแปลงของ คาร์บอนมอนอกไซด์	ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด					ร้อยละ ผลิตภัณฑ์ ของLPG
		แก๊ส ปิโตรเลียม เหลว	ไฮโดร คาร์บอน	โตเมทิล อีเทอร์	เมทา นอล	คาร์บอนได ออกไซด์	
1:1 (0.25:0.25)	84.35	42.96	56.04	0.77	0.23	0.0016	36.27
2:1 (0.33:0.17)	86.97	47.63	52.16	0.09	0.12	0.0034	41.45
3:1 (0.37:0.13)	80.51	47.16	50.67	0.62	0.52	1.0300	38.02
1:2 (0.17:0.33)	82.98	49.31	49.67	0.80	0.21	0.0012	41.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion)

### 1. ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์

$$\%CO \text{ Conversion} = \frac{\text{CO Mole (Initial amount)} - \text{CO Mole (Final Amount)}}{\text{CO Mole (Initial Amount)}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H-ZSM-5 ด้วยเทคนิคการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (0.2500:0.2500 กรัม ถ้าผสมให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม)

#### ▪ คิดที่ชั่วโมงที่ 1

จากสูตร  $PV = nRT$  ,  $n = \frac{PV}{RT}$

ขาเข้า ;  $P = 0.998766 \text{ atm}$        $V_{in} = 20 \text{ mL/min}$

$R = 82.06 \text{ mLatm/kmol}$        $T = 303.1 \text{ K}$

$$n (\text{syngas}) = \frac{(0.998766 \text{ atm})(20 \frac{\text{mL}}{\text{min}})}{(82.06 \frac{\text{mLatm}}{\text{kmol}})(303.1 \text{ K})} = 0.00080311 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$n (\text{in}) = \text{Syngas's standard peak area} \times n (\text{syngas})$ ; peak area จาก GC-TCD

$$= 7.4992633 \times 0.00080311 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$= 0.00602273 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

ขาออก ;  $P = 0.9988 \text{ atm}$        $V_{in} = 20 \text{ mL/min}$

$R = 82.06 \text{ mLatm/kmol}$        $T = 303 \text{ K}$

$$n (\text{syngas}) = \frac{(0.998766 \text{ atm})(20 \frac{\text{mL}}{\text{min}})}{(82.06 \frac{\text{mLatm}}{\text{kmol}})(303.1 \text{ K})} = 0.00080311 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$n (\text{out}) = \text{Syngas's peak area of each hours} \times n (\text{syngas})$ ; peak area จาก GC-TCD

$$= 1.96039639 \times 0.00080311 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$= 0.00157441 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร

$$\% \text{CO Conversion} = \frac{n(\text{in}) - n(\text{out})}{n(\text{in})} \times 100$$

$$= \frac{0.00602273 \frac{\text{mol}}{\text{min}} - 0.00157441 \frac{\text{mol}}{\text{min}}}{0.00602273 \frac{\text{mol}}{\text{min}}} \times 100$$

$$= 73.86 \%$$

Hour	n (in)	n (out)	% CO Conversion
1	0.00602273	0.00157441	73.86
2	0.00602273	0.00073620	87.78
3	0.00602273	0.00070171	88.35
4	0.00602273	0.00075761	87.42
	Average		84.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

การคำนวณค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (selectivity)

1. ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว

$$\% \text{LPG Selectivity} = \frac{\text{LPG moles produced}}{\text{All products (moles)}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3/\text{H-ZSM-5}$  ด้วยเทคนิคการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (0.2500:0.2500 กรัม ถ้าผสมให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม)

- คิตที่ชั่วโมงที่ 1 ; ภายใต้อุณหภูมิ  $T = 303.1 \text{ K}$  และ  $P = 0.998766 \text{ atm}$

$$\% \text{ Selectivity} = \frac{\text{LPG}}{\sum_{i=0}^n C} \times 100$$

และ

$$\text{All products} = \frac{\text{Total hydrocarbon area peak}}{\text{standard peak (STD)}}$$

โดย

$$\text{LPG} = \left[ \frac{n (\text{syngas}) \times \left[ \frac{\text{Area peak}}{\text{standard peak (STD)}} \right]}{\text{All product}} \right]$$

$C_1$  คำนวณได้จาก

$$C = \left[ \frac{n (\text{syngas}) \times \left[ \frac{\text{Area peak}}{\text{standard peak (STD)}} \right]}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + \text{CO}_2 + \text{MeOH} + 2\text{DME}} \right] \times \text{number of carbons}$$

$$C_1 = \left[ \frac{0.00080311 \times (57593532)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00040666 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_2 = \left[ \frac{0.00080311 \times (22805588)}{113740680} \right] \times 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 = 0.00032206  $\frac{\text{mol}}{\text{min}}$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ หงสน อัก้ามีให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_3 = \left[ \frac{0.00080311 \times (17161116)}{113740680} \right] \times 3$$

$$= 0.00036352 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_4 = \left[ \frac{0.00080311 \times (3339867 + 6645575)}{113740680} \right] \times 4$$

$$= 0.00028203 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_5 = \left[ \frac{0.00080311 \times (2360438 + 1380609)}{113740680} \right] \times 5$$

$$= 0.00013208 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$CO_2 = \left[ \frac{0.00080311 \times (2045)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00000001 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$MeOH = \left[ \frac{0.00080311 \times (830393)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00000586 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$2DME = \left[ \frac{0.00080311 \times 1621517}{113740680} \right] \times 2$$

$$= 0.0000229 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

จากสูตร

$$\% \text{Selectivity} = \frac{LPG}{\sum_{i=0}^n C} \times 100$$

$$= \left[ \frac{(363.52 + 282.03) \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times 100}{(406.66 + 322.06 + 363.52 + 282.03 + 132.08 + 17.98 + 5.86 + 22.90) \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{min}}} \right]$$

$$= 42.05 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง	Area peak (x 10 <sup>-6</sup> )								% Selectivity LPG
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	2DME	MeOH	
1	406.66	322.06	363.52	282.03	132.08	0.01	22.90	5.86	42.05
2	405.76	316.65	364.86	303.15	170.13	0.04	8.10	3.50	42.49
3	398.50	315.79	373.56	318.40	180.07	0.02	7.56	2.78	43.34
4	382.96	308.59	380.82	346.79	223.55	0.02	1.03	2.20	43.96
	ค่าเฉลี่ย 4 ชั่วโมง								42.96

## 2. ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์

$$\% \text{DME Selectivity} = \frac{2 \times \text{DME moles produced}}{\text{All products (moles)}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H-ZSM-5 ด้วยเทคนิคการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (0.2500:0.2500 กรัม ถ้าผสมให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม)

- คิดที่ชั่วโมงที่ 1 ; ภายใต้สภาวะ T = 303.1 K และ P = 0.998766 atm

$$\% \text{ Selectivity} = \frac{2 \times \text{DME}}{\sum_{i=0}^n C} \times 100$$

และ

$$\text{All products} = \frac{\text{Total hydrocarbon area peak}}{\text{standard peak (STD)}}$$

โดย

$$2\text{DME} = \left[ \frac{n (\text{syngas}) \times \left[ \frac{\text{Area peak}}{\text{standard peak (STD)}} \right]}{\text{All product}} \right]$$

$$2\text{DME} = \left[ \frac{0.00080311 \times 1621517}{113740680} \right] \times 2$$

$$= 0.0000229 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C_1$  คำนวณได้จาก

$$C = \left[ \frac{n (\text{syngas}) \times \left[ \frac{\text{Area peak}}{\text{standard peak (STD)}} \right]}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + CO_2 + MeOH + 2DME} \right] \times \text{number of carbons}$$

$$C_1 = \left[ \frac{0.00080311 \times (57593532)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00040666 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_2 = \left[ \frac{0.00080311 \times (22805588)}{113740680} \right] \times 2$$

$$= 0.00032206 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_3 = \left[ \frac{0.00080311 \times (17161116)}{113740680} \right] \times 3$$

$$= 0.00036352 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_4 = \left[ \frac{0.00080311 \times (3339867 + 6645575)}{113740680} \right] \times 4$$

$$= 0.00028203 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_5 = \left[ \frac{0.00080311 \times (2360438 + 1380609)}{113740680} \right] \times 5$$

$$= 0.00013208 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$CO_2 = \left[ \frac{0.00080311 \times (2045)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00000001 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$MeOH = \left[ \frac{0.00080311 \times (830393)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00000586 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร

$$\% \text{ Selectivity} = \frac{2 \times \text{DME}}{\sum_{i=0}^n C} \times 100$$

$$= \left[ \frac{0.0000229 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times 100}{(406.66 + 322.06 + 363.52 + 282.03 + 132.08 + 17.98 + 5.86 + 22.90) \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{min}}} \right]$$

$$= 1.49 \%$$

ชั่วโมง	Area peak (x 10 <sup>-6</sup> )								% Selectivity 2DME
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	2DME	MeOH	
1	406.66	322.06	363.52	282.03	132.08	0.01	22.90	5.86	1.49
2	405.76	316.65	364.86	303.15	170.13	0.04	8.10	3.50	0.51
3	398.50	315.79	373.56	318.40	180.07	0.02	7.56	2.78	0.47
4	382.96	308.59	380.82	346.79	223.55	0.02	1.03	2.20	0.62
	ค่าเฉลี่ย 4 ชั่วโมง								0.77

### 3. ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นเมทานอล

$$\% \text{ MeOH Selectivity} = \frac{\text{MeOH moles produced}}{\text{All products (moles)}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นเมทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H-ZSM-5 ด้วยเทคนิคการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (0.2500:0.2500 กรัม ถ้าผสมให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม)

- คิดที่ชั่วโมงที่ 1 ; ภายใต้สภาวะ T = 303.1 K และ P = 0.998766 atm

$$\% \text{ Selectivity} = \frac{\text{MeOH}}{\sum_{i=0}^n C} \times 100$$

และ

$$\text{All products} = \frac{\text{Total hydrocarbon area peak}}{\text{standard peak (STD)}}$$

$$\text{MeOH} = \left[ \frac{n(\text{syngas}) \times \left[ \frac{\text{Area peak}}{\text{standard peak (STD)}} \right]}{\text{All product}} \right]$$

$$\text{MeOH} = \left[ \frac{0.00080311 \times (830393)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00000586 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

C<sub>1</sub> คำนวณได้จาก

$$C = \left[ \frac{n (\text{syngas}) \times \left[ \frac{\text{Area peak}}{\text{standard peak (STD)}} \right]}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + \text{CO}_2 + \text{MeOH} + 2\text{DME}} \right] \times \text{number of carbons}$$

$$C_1 = \left[ \frac{0.00080311 \times (57593532)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00040666 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_2 = \left[ \frac{0.00080311 \times (22805588)}{113740680} \right] \times 2$$

$$= 0.00032206 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_3 = \left[ \frac{0.00080311 \times (17161116)}{113740680} \right] \times 3$$

$$= 0.00036352 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_4 = \left[ \frac{0.00080311 \times (3339867 + 6645575)}{113740680} \right] \times 4$$

$$= 0.00028203 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_5 = \left[ \frac{0.00080311 \times (2360438 + 1380609)}{113740680} \right] \times 5$$

$$= 0.00013208 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$\text{CO}_2 = \left[ \frac{0.00080311 \times (2045)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00000001 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2DME = \left[ \frac{0.00080311 \times 1621517}{113740680} \right] \times 2$$

$$= 0.0000229 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

จากสูตร

$$\% \text{ Selectivity} = \frac{\text{MeOH}}{\sum_{i=0}^n C} \times 100$$

$$= \left[ \frac{0.00000586 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times 100}{(406.66 + 322.06 + 363.52 + 282.03 + 132.08 + 17.98 + 5.86 + 22.90) \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{min}}} \right]$$

$$= 0.38 \%$$

ชั่วโมง	Area peak (x 10 <sup>-6</sup> )								% Selectivity MeOH
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	2DME	MeOH	
1	406.66	322.06	363.52	282.03	132.08	0.01	22.90	5.86	0.38
2	405.76	316.65	364.86	303.15	170.13	0.04	8.10	3.50	0.22
3	398.50	315.79	373.56	318.40	180.07	0.02	7.56	2.78	0.17
4	382.96	308.59	380.82	346.79	223.55	0.02	1.03	2.20	0.13
	ค่าเฉลี่ย 4 ชั่วโมง								0.23

#### 4. ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอน

$$\% \text{ HC Selectivity} = \frac{\text{HC moles produced}}{\text{All products (moles)}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นเมทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H-ZSM-5 ด้วยเทคนิคการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (0.2500:0.2500 กรัม ถ้าผสมให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม)

- คิดที่ชั่วโมงที่ 1 ; ภายใต้สภาวะ T = 303.1 K และ P = 0.998766 atm

$$\% \text{ Selectivity} = \frac{\text{HC}}{\sum_{i=0}^n C} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\text{All products} = \frac{\text{Total hydrocarbon area peak}}{\text{standard peak (STD)}}$$

โดย

$$\text{HC} = \left[ \frac{n (\text{syngas}) \times \left[ \frac{\text{Area peak}}{\text{standard peak (STD)}} \right]}{\text{All product}} \right]$$

C<sub>1</sub> คำนวณได้จาก

$$C = \left[ \frac{n (\text{syngas}) \times \left[ \frac{\text{Area peak}}{\text{standard peak (STD)}} \right]}{\text{C1+C2+C3+C4+C5+CO}_2\text{+MeOH+2DME}} \right] \times \text{number of carbons}$$

$$C_1 = \left[ \frac{0.00080311 \times (57593532)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00040666 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_2 = \left[ \frac{0.00080311 \times (22805588)}{113740680} \right] \times 2$$

$$= 0.00032206 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_3 = \left[ \frac{0.00080311 \times (17161116)}{113740680} \right] \times 3$$

$$= 0.00036352 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_4 = \left[ \frac{0.00080311 \times (3339867 + 6645575)}{113740680} \right] \times 4$$

$$= 0.00028203 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$C_5 = \left[ \frac{0.00080311 \times (2360438 + 1380609)}{113740680} \right] \times 5$$

$$= 0.00013208 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$\text{CO}_2 = \left[ \frac{0.00080311 \times (2045)}{113740680} \right] \times 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 = 0.00000001  $\frac{\text{mol}}{\text{min}}$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{MeOH} = \left[ \frac{0.00080311 \times (830393)}{113740680} \right] \times 1$$

$$= 0.00000586 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$2\text{DME} = \left[ \frac{0.00080311 \times 1621517}{113740680} \right] \times 2$$

$$= 0.0000229 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

จากสูตร

$$\% \text{ Selectivity} = \frac{\text{HC}}{\sum_{i=0}^n C} \times 100$$

$$= \left[ \frac{(406.66 + 322.06 + 132.08) \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times 100}{(406.66 + 322.06 + 363.52 + 282.03 + 132.08 + 17.98 + 5.86 + 22.90) \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{min}}} \right]$$

$$= 56.07 \%$$

ชั่วโมง	Area peak ( $\times 10^{-6}$ )								% Selectivity HC
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	2DME	MeOH	
1	406.66	322.06	363.52	282.03	132.08	0.01	22.90	5.86	56.07
2	405.76	316.65	364.86	303.15	170.13	0.04	8.10	3.50	56.77
3	398.50	315.79	373.56	318.40	180.07	0.02	7.56	2.78	56.01
4	382.96	308.59	380.82	346.79	223.55	0.02	1.03	2.20	55.29
	ค่าเฉลี่ย 4 ชั่วโมง								56.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### การคำนวณค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ (yield)

#### 1. ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลว

$$\%LPG \text{ yield} = \frac{\%CO \text{ conversion} \times \%LPG \text{ selectivity}}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H-ZSM-5 ด้วยเทคนิคการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (0.2500:0.2500 กรัม ถ้าผสมให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม)

- คัดที่ชั่วโมงที่ 1 ; ภายใต้สภาวะ T = 303.1 K และ P = 0.998766 atm

จากภาคผนวก ข จะพบว่าค่า %CO conversion มีค่าเท่ากับ 73.8588%

จากภาคผนวก ค จะพบว่าค่า %LPG selectivity มีค่าเท่ากับ 42.0518%

จากสูตร

$$\%LPG \text{ yield} = \frac{\%CO \text{ conversion} \times \%LPG \text{ selectivity}}{100}$$

$$= \frac{73.8588 \times 42.0518}{100}$$

$$= 31.06\%$$

ชั่วโมง	%CO conversion	%LPG selectivity	%LPG yield
1	73.86	42.05	31.06
2	87.78	42.49	37.30
3	88.35	43.34	38.29
4	87.42	43.96	38.43
Average			36.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของไดเมทิลอีเทอร์

$$\%DME \text{ yield} = \frac{\%CO \text{ conversion} \times \%DME \text{ selectivity}}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของไดเมทิลอีเทอร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H-ZSM-5 ด้วยเทคนิคการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (0.2500:0.2500กรัม ถ้าผสมให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม)

- คัดที่ชั่วโมงที่ 1 ; ภายใต้สภาวะ T = 303.1 K และ P = 0.998766 atm

จากภาคผนวก ข จะพบว่าค่า %CO conversion มีค่าเท่ากับ 73.8588%

จากภาคผนวก ค จะพบว่าค่า %DME selectivity มีค่าเท่ากับ 1.4917%

จากสูตร

$$\%DME \text{ yield} = \frac{\%CO \text{ conversion} \times \%DME \text{ selectivity}}{100}$$

$$= \frac{73.8588 \times 1.4917}{100}$$

$$= 1.10\%$$

ชั่วโมง	%CO conversion	%DME selectivity	%DME yield
1	73.89	1.49	1.10
2	87.78	0.51	0.45
3	88.35	0.47	0.42
4	87.42	0.62	0.54
Average			0.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของเมทานอล

$$\% \text{MeOH yield} = \frac{\% \text{CO conversion} \times \% \text{MeOH selectivity}}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของเมทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H-ZSM-5 ด้วยเทคนิคการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (0.2500:0.2500 กรัม ถ้าผสมให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม)

- คัดที่ชั่วโมงที่ 1 ; ภายใต้สภาวะ T = 303.1 K และ P = 0.998766 atm

จากภาคผนวก ข จะพบว่าค่า %CO conversion มีค่าเท่ากับ 73.8588%

จากภาคผนวก ค จะพบว่าค่า %MeOH selectivity มีค่าเท่ากับ 0.3819%

จากสูตร

$$\begin{aligned} \% \text{MeOH yield} &= \frac{\% \text{CO conversion} \times \% \text{MeOH selectivity}}{100} \\ &= \frac{73.8588 \times 0.3819}{100} \\ &= 0.28\% \end{aligned}$$

ชั่วโมง	%CO conversion	%MeOH selectivity	%MeOH yield
1	73.86	0.38	0.28
2	87.78	0.22	0.19
3	88.35	0.17	0.15
4	87.42	0.13	0.11
Average			0.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของไฮโดรคาร์บอน

$$\% \text{HC yield} = \frac{\% \text{CO conversion} \times \% \text{HC selectivity}}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของไฮโดรคาร์บอนของตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H-ZSM-5 ด้วยเทคนิคการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (0.2500:0.2500 กรัม ถ้าผสมให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม)

- คิดที่ชั่วโมงที่ 1 ; ภายใต้สภาวะ T = 303.1 K และ P = 0.998766 atm

จากภาคผนวก ข จะพบว่าค่า %CO conversion มีค่าเท่ากับ 73.8588%

จากภาคผนวก ค จะพบว่าค่า %HC selectivity มีค่าเท่ากับ 56.0736%

จากสูตร

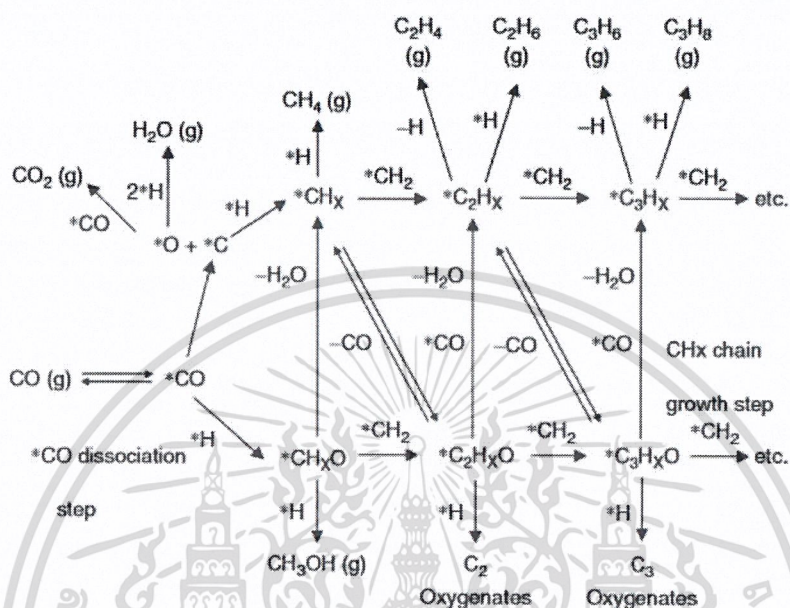
$$\begin{aligned} \% \text{HC yield} &= \frac{\% \text{CO conversion} \times \% \text{HC selectivity}}{100} \\ &= \frac{73.8588 \times 56.0736}{100} \\ &= 41.41\% \end{aligned}$$

ชั่วโมง	%CO conversion	%HC selectivity	%HC yield
1	73.86	56.07	41.41
2	87.78	56.77	49.83
3	88.35	56.01	49.48
4	87.42	55.29	48.34
Average			47.27

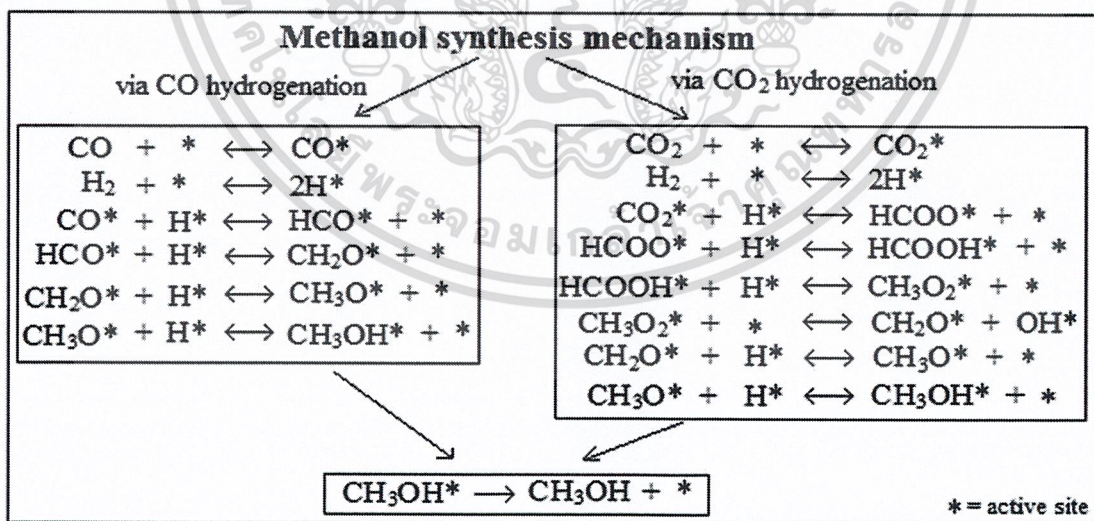
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก จ

#### กลไกการสังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน



รูปที่ จ.1 กลไกของปฏิกิริยาสังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนโดยการเติมไฮโดรเจนในแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO hydrogenation) [วิทวัส, 2557]



รูปที่ จ.1 กลไกของปฏิกิริยาสังเคราะห์เมทานอลโดยการเติมไฮโดรเจนในแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์และในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [Asthana, S., 2017]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้