

ผลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตต่อการสังเคราะห์แก๊สหุงต้ม
โดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่งปฏิกิริยา
CuO-ZnO- Al₂O₃/HZSM-5

EFFECT OF POTASSIUM PERMANGANATE ON
SYNTHESIS OF LPG DIRECTLY FROM SYNTHESIS GAS
OVER CuO-ZnO- Al₂O₃/HZSM-5 CATALYSTS



จันจิรา จันทอน
พรมรินทร์ ทุษล่อน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2565 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF POTASSIUM PERMANGANATE ON
SYNTHESIS OF LPG DIRECTLY FROM SYNTHESIS GAS
OVER CuO-ZnO- Al₂O₃/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, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตต่อการสังเคราะห์แก๊สหุงต้มโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5
Effect of Potassium permanganate on synthesis of LPG directly from synthesis gas over CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 catalysts

ชื่อนักศึกษา นางสาวจันจิรา จันทอน รหัสนักศึกษา 62050262
นายพรมรินทร์ ทูยหล่อน รหัสนักศึกษา 62050311

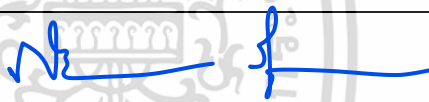

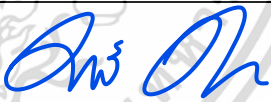
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มนตรี ทองคำ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปี 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภิเษก รุ่งโรจน์ชัยพร ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
รศ.ดร.มนตรี ทองคำ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้สิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง ห้ามนำไปเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	EFFECT OF POTASSIUM PERMANGANATE ON SYNTHESIS OF LPG DIRECTLY FROM SYNTHESIS GAS OVER CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 CATALYSTS
Students	Miss Junjira Junthorn Student ID 62050262 Mr. Phrommarin Thuilon Student ID 62050311
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
School	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2022
Advisor	Assoc. Prof Dr. Montree Thongkam

Abstract

This special project was studied the catalytic activity of KMnO₄ catalyst on HZSM-5 zeolite and CuOZnOAl₂O₃ (CZA) with the ratio of the catalyst is 2:2:1 by physical mixing. In the synthesis of liquefied petroleum gas (LPG) from synthesis gas. The KMnO₄ catalyst on HZSM-5 zeolite was prepared by impregnation method at a concentration of KMnO₄ at 0, 10, 20, 30 percent and the CuOZnOAl₂O₃ catalyst was prepared by co-precipitation method. Then synthesize liquefied petroleum gas (LPG) from synthesis gas (H₂:CO = 2:1) with a fixed bed reactor at a flow rate of 20 ml/min, temperature at 350°C and high pressure of 40 bar for 4 hours. and analyze the product by gas chromatography (GC) technique. It was found that the %CO conversion, %LPG selectivity and %LPG yield was the most catalyst is CZA/HZSM-5 with a value of 92.3023 38.4633 and 35.5025 respectively.

The catalytic capacity of CZA catalyst was studied with HZSM-5 type zeolite by different ratios of 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 g), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 g) และ 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 g) by weight, using the same analytical method. It was found that the %CO conversion, %LPG selectivity and %LPG yield was the most catalyst is 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 g) at 92.8756, 41.5752 and 38.6132 respectively.

Keywords : Impregnation, Co-precipitation, Liquefied petroleum gas, Synthesis gas

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และความกรุณาจาก คณะอาจารย์และบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มนตรี ทองคำ อาจารย์ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่กรุณาให้แนะนำและให้ คำปรึกษา ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนถ่ายทอดประสบการณ์ในการทำงานของท่าน เพื่อเป็นประโยชน์ในการคิดวิเคราะห์ การวางแผน โดยให้คำปรึกษาตั้งแต่การค้นหาข้อมูลจนการ ดำเนินงานสำเร็จ รวมทั้งตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร และ ผศ.ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ ที่กรุณาเป็น กรรมการสอบโครงการพิเศษ อีกทั้งยังให้ความรู้ คำแนะนำและช่วยตรวจทานแก้ไขให้โครงการพิเศษ เล่มนี้ออกมาสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการพิเศษนี้ได้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ และบุคลากร คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการดำเนินโครงการ พิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้ กำลังใจในการทำโครงการพิเศษ และได้ให้โอกาสทางการศึกษาที่ดีจนสำเร็จการศึกษา

จันจิรา จันทอน
พรมรินทร์ ทวยหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
คำย่อและสัญลักษณ์	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความหมายและความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แก๊สปิโตรเลียมเหลว	4
2.1.1 แหล่งที่มาของแก๊สปิโตรเลียมเหลว	4
2.1.1.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่นน้ำมัน	4
2.1.1.2 กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ	5
2.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สปิโตรเลียมเหลว	6
2.1.2.1 คุณสมบัติทางเคมี	6
2.1.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ	7
2.1.3 วิธีการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว	13
2.1.3.1 ปฏิกริยาในการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว	13
2.1.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการเลือกเกิดในการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว	14
2.2 แก๊สสังเคราะห์	14
2.2.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	14
2.2.2 กระบวนการรีฟอร์มมิ่ง	15
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา	15
2.3.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา	16
2.3.1.1 โลหะที่ว่องไว	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	17
2.4.1 การตกตะกอน	18
2.4.2 การเผาหรือการแคลไซน์	18
2.4.3 วิธีจุ่มซุบ	18
2.4.4 การอัดเม็ด	19
2.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟิชเชอร์	19
2.5.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบทริกเกิลเบต	20
2.5.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบทริกเกิลเบตเคาน์เตอร์เคอเรนท	20
2.5.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบแพคบัปเปิ้ลเบต	21
2.6 ควอร์ตซ์ / ทราเยกซ์	21
2.7 โพลีเอทิลีนเปอร์เมอกรานด์	22
2.8 คอปเปอร์ออกไซด์	23
2.9 ซิงค์ออกไซด์	24
2.10 อะลูมิเนียมออกไซด์	24
2.11 ซีโอไลต์	25
2.11.1 คุณสมบัติทั่วไป	26
2.11.2 ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5	26
2.12 วิธีการสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	27
2.12.1 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	27
2.12.2 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
2.12.3 เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์	29
2.12.4 เทคนิคการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม	30
2.12.5 เทคนิคการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller	31
2.13 วิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
2.13.1 Synthesis of LPG from synthesis gas	33
2.13.2 Selective synthesis of LPG from synthesis gas	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.13.3 Direct synthesis of LPG from carbon dioxide over hybrid catalysts comprising modified methanol synthesis catalyst and β -type zeolite	33
2.13.4 The design of a CZ@H- β P catalyst with core shell structure and its application in LPG synthesis from syngas	34
2.13.5 Direct syngas conversion to liquefied petroleum gas: Importance of a multifunctional metal-zeolite interface	34
2.13.6 Mechanism and catalytic performance for direct dimethyl ether synthesis by CO ₂ hydrogenation over CuZnZr/ferrierite hybrid catalyst	34
2.13.7 Characterization of precursors of methanol synthesis catalysts, copper/zinc/aluminum oxides, precipitated at different pHs and temperature	35
2.13.8 Residual sodium effect on the catalytic activity of Cu/ZnO/Al ₂ O ₃ , in methanol synthesis from CO hydrogenation	35
2.13.9 Effect of Si/Al ratio of high-silica HZSM-5 catalysts on the prins condensation of isobutylene and formaldehyde to isoprene	36
2.13.10 การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ จากผาติงกระป๋อง อะลูมิเนียมที่ใช้แล้วสำหรับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์	36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	37
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ	37
3.2 สารเคมีและแก๊ส	38
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา	38
3.4 วิธีการทดลอง	39
3.4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์	39
3.4.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การเผาไหม้ของซีเม้นต์เปอร์แมงกาเนตบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5	42
3.4.4 การอัดเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา	42
3.4.5 การสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว	42
3.5 การวิเคราะห์การแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม	44
3.6 วิธีการสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	44
3.6.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope	44
3.6.2 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	45
3.6.3 เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์	45
3.6.4 เทคนิคการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคบรูว์นเนอร์-เอมเมท เทลเลอร์	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการรายงานผล	46
4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ HZSM-5 แตกต่างกันผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA)	46
4.1.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett (BET)	46
4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค (SEM)	47
4.1.3 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (EDS)	50
4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน (XRD)	52
4.1.5 การวิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา (NH ₃ -TPD)	53
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ HZSM-5 แตกต่างกันผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์(CZA)	54
4.2.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์	55
4.2.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด	55
4.2.3 ร้อยละผลิตภัณท์	59
4.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค (SEM)	63
4.3.3 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (EDS)	66
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน	71
4.4.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์	72
4.4.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด	73
4.4.3 ร้อยละผลิตภัณฑ์	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการวิจัย	79
5.1.1 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ HZSM-5 แตกต่างกันผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA)	79
5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของตัวเร่ง ปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารอ้างอิง	83
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก แผนการดำเนินการโครงการพิเศษ	88
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง	89
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง	92
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์	113
ภาคผนวก จ การคำนวณค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด	114
ภาคผนวก ฉ การคำนวณค่าร้อยละผลิตภัณฑ์	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของแก๊สปีโตรเลียมเหลวและเชื้อเพลิงต่างๆ	7
2.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของแก๊สปีโตรเลียมเหลวที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	8
2.3 ค่าความหนืดของแก๊สปีโตรเลียมเหลวที่ 20 องศาเซลเซียส	9
2.4 ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สปีโตรเลียมเหลวความดันคงที่ 1 บรรยากาศ	10
2.5 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก๊สปีโตรเลียมเหลว ต่อ 1 องศาเซลเซียส	10
2.6 ค่าความถ่วงจำเพาะที่สถานะแก๊ส ที่อุณหภูมิ 15.5 องศาเซลเซียส	10
2.7 ค่าความสามารถในการอัดตัวของแก๊สที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	11
2.8 อุณหภูมิของจุดติดไฟ	11
2.9 สมบัติทั่วไปของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	22
2.10 สมบัติทั่วไปของคอปเปอร์ออกไซด์	23
2.11 สมบัติทั่วไปของซิงค์ออกไซด์	24
2.12 สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมออกไซด์	25
4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ซิงค์ออกไซด์ (CZA) และ ซีโอไลต์ HZSM-5	46
4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา	49
4.3 ตารางแสดงขนาดผลึกคอปเปอร์ออกไซด์ คอปเปอร์และการกระจายตัวของ ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10%KMnO ₄ -HZSM-5 , CZA/20% KMnO ₄ -HZSM-5 และ CZA/30%KMnO ₄ -HZSM-5	52
4.4 ค่าความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเทคนิคการคายซับของแอมโมเนีย (NH ₃ -TPD)	53
4.5 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยผลการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา KMnO ₄ บน HZSM-5 และ CZA ที่ตัวแปรต่างกัน	60
4.6 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuOZnOAl ₂ O ₃ /HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2500:0.2500กรัม) โดยน้ำหนัก	67
4.7 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuOZnOAl ₂ O ₃ /HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3300:0.1700กรัม) โดยน้ำหนัก	68
4.8 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuOZnOAl ₂ O ₃ /HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 1:2 (0.1700:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก	70
4.10 ผลการวิเคราะห์ร้อยละธาตุโลหะชนิดที่ปรากฏบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลท์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก	71
4.11 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยผลการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนต่างกัน	77
ค.1 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของ ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5	92
ค.2 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของ ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO ₄ -HZSM-5	93
ค.3 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของ ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5	94
ค.4 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของ ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO ₄ -HZSM-5	95
ค.5 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5	96
ค.6 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO ₄ HZSM-5	97
ค.7 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO ₄ HZSM-5	98
ค.8 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO ₄ HZSM-5	99
ค.9 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5	100
ค.10 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO ₄ -HZSM-5	101
ค.11 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5	102
ค.12 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO ₄ -HZSM-5	103
ค.13 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500กรัม)	104
ค.14 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700กรัม)	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.15 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)	106
ค.16 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม)	107
ค.17 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม)	108
ค.18 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)	109
ค.19 ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม)	110
ค.20 ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700กรัม)	111
ค.21 ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250กรัม)	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่นน้ำมัน	5
2.2 กระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ	6
2.3 พันธะเคมีของกลุ่มไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว	7
2.4 พันธะเคมีของกลุ่มไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว	7
2.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอน	18
2.6 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการจุ่มซูปแบบเปียก	19
2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบทริกเคิลเบต	20
2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบทริกเคิลเบตเคาน์เตอร์เคอเรนท	21
2.9 เครื่องปฏิกรณ์แบบแพคบัปเปิ้ลเบต	21
2.10 ลักษณะของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	22
2.11 ลักษณะของคอปเปอร์ออกไซด์	23
2.12 ลักษณะของซิงค์ออกไซด์	24
2.13 ลักษณะของอะลูมิเนียมออกไซด์	25
2.14 แสดงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ZSM-5	27
2.15 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์	28
2.16 ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
2.17 ส่วนประกอบหลักการทำงานของกล้องเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	31
2.18 กราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปเส้นตรงของสมการ BET	32
3.1 การติดตั้งเครื่องมือในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา	39
3.2 การล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน	40
3.3 ผงตะกอนของตัวเร่งปฏิกิริยา	40
3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง	43
3.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา $CuZnOAl_2O_3/(KMnO_4/HZSM-5)$	44
4.1 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง CZA/10% $KMnO_4$ -HZSM-5, CZA/20% $KMnO_4$ -HZSM-5 และ CZA/30% $KMnO_4$ -HZSM-5 เทียบกับกราฟแสดงโครงสร้างผลึกของสารมาตรฐาน	47
4.2 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง CZA/ $KMnO_4$ -HZSM-5 เทียบกับกราฟแสดงโครงสร้างผลึกของสารมาตรฐาน	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5	50
4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10% KMnO ₄ -HZSM-5	50
4.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20% KMnO ₄ -HZSM-5	51
4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30% KMnO ₄ -HZSM-5	51
4.7 การคายซัพของแอมโมเนียของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5	53
4.8 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/20% KMnO ₄ -HZSM-5 และ CZA/30% KMnO ₄ -HZSM-5	55
4.9 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลว (%LPG Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/30% KMnO ₄ -HZSM-5	56
4.10 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอน (%HC Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/30% KMnO ₄ -HZSM-5	57
4.11 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นมีเทน (%C1 Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/30% KMnO ₄ -HZSM-5	57
4.12 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/30% KMnO ₄ -HZSM-5	58
4.13 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นเมทานอล (%MeOH Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/30% KMnO ₄ -HZSM-5	58
4.14 กราฟแสดงร้อยละผลผลิตกันท์ของแก๊สปีโตรเลียมเหลว (%LPG Yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5, CZA/30% KMnO ₄ -HZSM-5	59
4.15 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการตกตะกอนร่วม	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ถูกเตรียม 4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO, JCPDS no.80-7600) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO, JCPDS no.79-2080) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃ , JCPDS no.73-2294) และซีโอไลต์ ชนิด HZSM-5 (HZSM-5, JCPDS no.44-0003)	63
4.17 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า	64
4.18 รูปร่างสัณฐานวิทยาของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า	64
4.19 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5	65
4.20 Map Spectrum CuOZnOAl ₂ O ₃ /HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2500:0.2500กรัม) โดยน้ำหนัก	67
4.21 Map Spectrum CuOZnOAl ₂ O ₃ /HZSM-5 ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723กรัม) โดยน้ำหนัก	68
4.22 Map Spectrum CuOZnOAl ₂ O ₃ /HZSM-5 ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250กรัม) โดยน้ำหนัก	69
4.23 Map Spectrum CuOZnOAl ₂ O ₃ /HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:2 (0.1700:0.3300กรัม) โดยน้ำหนัก	70
4.24 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)	72
4.25 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลว (%LPG Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูล (ต่อ)

รูลที่	หน้า
4.26 กราฟแสดงร้อยละควมจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไฮดรคาร์บอน (%HC Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)	74
4.27 กราฟแสดงร้อยละควมจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นมีเทน (%C1 Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)	74
4.28 กราฟแสดงร้อยละควมจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)	75
4.29 กราฟแสดงร้อยละควมจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นเมทานอล (%MeOH Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)	75
4.30 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปีโตรเลียมเหลว (%LPG yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)	76
ค.1 ค่ำร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5	92
ค.2 ค่ำร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO ₄ -HZSM-5	93
ค.3 ค่ำร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5	94
ค.4 ค่ำร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO ₄ -HZSM-5	95
ค.5 ค่ำร้อยละควมจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูยาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.6 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO ₄ -HZSM-5	97
ค.7 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5	98
ค.8 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO ₄ -HZSM-5	99
ค.9 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5	100
ค.10 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO ₄ -HZSM-5	101
ค.11 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5	102
ค.12 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO ₄ -HZSM-5	103
ค.13 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500กรัม)	104
ค.14 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700กรัม)	105
ค.15 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250กรัม)	106
ค.16 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500กรัม)	107
ค.17 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700กรัม)	108
ค.18 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250กรัม)	109
ค.19 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500กรัม)	110
ค.20 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700กรัม)	111
ค.21 ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250กรัม)	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
KMnO ₄	โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
HZSM-5	ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5
CZA	คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์
Cal	Calcined
LPG	Liquefied Petroleum Gas
Syngas	Synthesis Gas
GC	Gas Chromatography
TCD	Thermal Conductivity Detector
FID	Flame Ionization Detector
BET	Surface area and porosity analyzer
XRD	X-ray Diffractometer
SEM	Scanning Electron Microscope
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความหมายและความเป็นมา

แก๊สปิโตรเลียมเหลวจัดเป็นเชื้อเพลิงอีกชนิดหนึ่งที่มาจากซากดึกดำบรรพ์ ประกอบด้วย ส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอน 2 ชนิด คือ โพรเพนและบิวเทน ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี หนักกว่าอากาศ ติดไฟ ได้ในช่วงของการติดไฟที่ 2-15 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณในอากาศ และอุณหภูมิที่ติดไฟได้เองคือ 400 องศาเซลเซียส โดยมีการนำเอาพลังงานมาใช้เพื่อตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานในชีวิตประจำวัน รวมถึงเป็นปัจจัยขั้นพื้นฐานการผลิตทั้งในภาคธุรกิจ และภาคอุตสาหกรรม จึงทำให้มีการใช้พลังงาน ในอัตราที่เพิ่มมากขึ้น พลังงานส่วนใหญ่ที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันดิบ น้ำมันเชื้อเพลิง และ แก๊สธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่แก๊สปิโตรเลียมเหลวได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ โดยใช้อัตราส่วนผสมของ โพรเพนและบิวเทนประมาณ 70:30 ซึ่งจะให้ค่าความร้อนที่สูง ปิโตรเลียมเหลวมีคุณสมบัติเป็น แก๊สเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และ มีการใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น เป็นแก๊สหุงต้มภายในครัวเรือน เชื้อเพลิงสำหรับการเกษตร การขนส่ง และเป็นเชื้อเพลิงสำคัญในกระบวนการอุตสาหกรรม ต่างๆ มากมาย รวมถึงการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงของรถยนต์เพราะมีค่าออกเทน (octane number) สูง ประมาณ 95-115

ในปัจจุบันแก๊สปิโตรเลียมเหลวมาจากสองแหล่ง คือ ผลิตจากกระบวนการกลั่นน้ำมันในโรงกลั่นน้ำมันต่างๆ และผลิตจากกระบวนการแยกแก๊สของแก๊สธรรมชาติ ในแก๊สธรรมชาติ ประกอบด้วยแก๊สหลายชนิด ได้แก่ แก๊สมีเทน แก๊สอีเทน แก๊สโพรเพน และแก๊สบิวเทน เมื่อนำมาใช้ต้องผ่านกระบวนการแยกแก๊สออกจากกันก่อน แต่ด้วยราคาที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือก โดยเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว ในกระบวนการสังเคราะห์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสม ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงถือเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยไม่ต้องพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล

ดังนั้นการพัฒนาวិธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ในงานวิจัยนี้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ด้วยเทคนิคการจุ่มซุบ และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสมระหว่างโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ($\text{KMnO}_4/\text{HZSM-5}$) และคอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (CuOZnOAl₂O₃, CZA) จากการผสมทางกายภาพ เพื่อทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตัวแปรต่างกัน ได้แก่ CZA / HZSM-5 , CZA / 10%KMnO₄- HZSM-5 , CZA / 20%KMnO₄- HZSM-5 , CZA / 30%KMnO₄- HZSM-5 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาและมีผลต่อการสังเคราะห์ แก๊สปิโตรเลียมเหลวที่เหมาะสมที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาผลการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้นที่แตกต่างกัน คือ 10, 20, 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ โดยการผสมกันทางกายภาพ (Physical mixing)

2) เพื่อศึกษาผลการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยการผสมกันทางกายภาพ (Physical mixing)

3) เพื่อสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) จากแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) โดยผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed Reactor)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1) สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuOZnOAl₂O₃, CZA) โดยอัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์ต่อซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ คือ CuO: ZnO: Al₂O₃, 2:2:1 โดยโมล โดยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method)

2) สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร บนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5 โดยวิธีการจุ่มชุบแบบเปียก (Wet Impregnation)

2. ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว

ใช้วิธีการสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed Reactor) โดยใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuOZnOAl₂O₃, CZA) และตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ บนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5 ในอัตราส่วน 2 : 1 โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะ ดังนี้

1) สารตั้งต้น คือ แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) โดยใช้เป็นอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนกับ

คาร์บอนมอนอกไซด์ (H₂:CO) คือ 2:1 โดยโมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน (H_2) 5 เปอร์เซ็นต์ ณ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

3) อุณหภูมิเกิดปฏิกิริยาที่ 350 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

4) ความดันที่ 40 บาร์

5) อัตราการไหลของแก๊ส 20 มิลลิตรต่อนาที

3. การตรวจสอบการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม

ตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Off-line Gas Chromatography) โดยใช้หัวรับสัญญาณ(Detector) 2 ชนิด ได้แก่

1) TCD (Thermal Conductivity Detector)

2) FID (Flame Ionization Detector)

4. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้

1) ตรวจสอบเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

2) ตรวจสอบเกี่ยวกับสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3) ตรวจสอบเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจาย (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)

4) ตรวจสอบเกี่ยวกับพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคบรูน่าว เอ็มเมท เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller, BET)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้ในการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว

2. ทำให้ทราบผลการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพสแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีความเข้มข้นของโพสแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร และ ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมซีโอไลต์ HZSM-5

3. ทำให้ทราบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใด มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวได้ดีที่สุด

4. สามารถนำแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่สังเคราะห์ได้นำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เพื่อทดแทนพลังงานที่ใช้ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas) [กรมธุรกิจพลังงาน, 2551]

แก๊สปิโตรเลียมเหลว หมายถึง "แก๊สไฮโดรคาร์บอนเหลว คือ โพรเพน โพรพิลีน นอร์มัล บิวเทน ไอโซบิวเทน หรือบิวทีลีน อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างผสมกัน" โดยทั่วไปเรามักเรียกแก๊สปิโตรเลียมเหลวนี้ว่า แก๊สเหลว หรือแก๊สหุงต้ม ส่วนในทางการค้าและอุตสาหกรรม เรียกว่า แอล พี แก๊ส (LP GAS) หรือ แอล พี จี (LPG) ซึ่งเป็นอักษรย่อมาจาก liquefied petroleum gas

แก๊สปิโตรเลียมเหลวมีสภาพเป็นแก๊สที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ โดยมีน้ำหนักประมาณ 1.5-2 เท่าของอากาศ การที่ได้ชื่อว่าปิโตรเลียมเหลวเนื่องจากแก๊สจะถูกอัดให้อยู่ในสภาพของเหลวภายใต้ความดันเพื่อสะดวกต่อการเก็บและการขนส่ง เมื่อลดความดันแก๊สเหลวนี้จะกลายเป็นไอสามารถนำไปใช้งานได้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญในปัจจุบัน ซึ่งจะใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในครัวเรือน ร้านอาหาร ภัตตาคาร พาณิชยกรรม อุตสาหกรรม และในรถยนต์ เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่ขนส่งสะดวกไม่เปลืองที่เก็บและที่สำคัญ คือ เผาไหม้แล้วเกิดเขม่า น้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น แก๊สปิโตรเลียมเหลวมีองค์ประกอบหลักคือ โพรเพน และ บิวเทน ซึ่งสัดส่วนจะเป็นเท่าใดนั้นจะขึ้นกับผู้ผลิต อาจจะเป็นโพรเพน 100% หรือเป็นบิวเทน 100% ในประเทศไทยจะมีส่วนผสมที่โพรเพน 50% + บิวเทน 50% , โพรเพน 70% + บิวเทน 30% และในปัจจุบันเป็นโพรเพน 60% + บิวเทน 40%

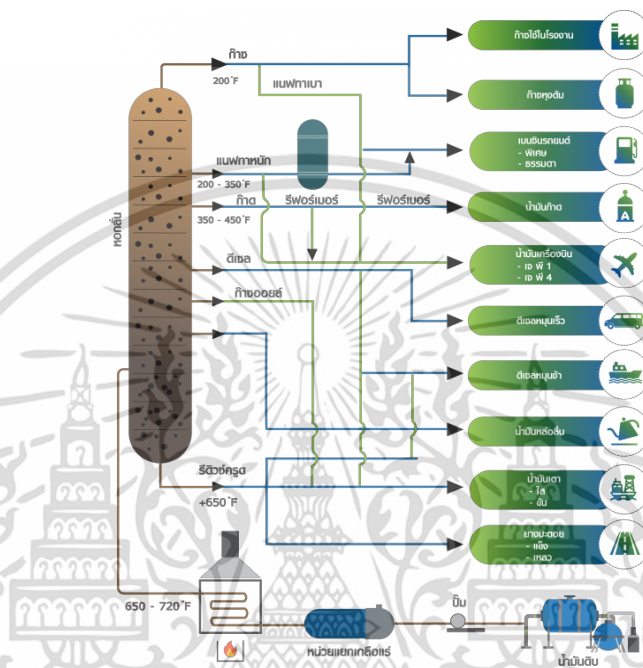
2.1.1 แหล่งที่มาของแก๊สปิโตรเลียมเหลว [กรมธุรกิจพลังงาน, 2551]

2.1.1.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่นน้ำมัน

กระบวนการนี้จะได้โพรเพนและบิวเทนประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ของกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ ก่อนจะนำน้ำมันดิบเข้ากลั่นต้องแยกน้ำและเกลือแร่ที่ปนอยู่ออกก่อน หลังจากนั้นนำน้ำมันดิบที่ได้มาให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 340-400 องศาเซลเซียส จากนั้นจะถูกส่งเข้าสู่หอกกลั่น ภายในประกอบด้วย ถาดถาด (tray) เรียงเป็นชั้น ๆ หลายสิบชั้น ไอร้อนที่ลอยตัวขึ้นไปเมื่อเย็นตัวลงจะกลั่นตัวเป็นของเหลวบนถาดตามชั้นต่าง ๆ และจะอยู่ชั้นใดขึ้นอยู่กับช่วงจุดเดือด ถ้าจุดเดือดต่ำ จะลอยขึ้นสู่ด้านบนของหอกกลั่น ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นแก๊ส (มีแก๊สปิโตรเลียมเหลวรวมอยู่ด้วย) ส่วนไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดปานกลางและสูงจะแยกตัวออกมาทางตอนกลางและตอนล่างของหอกกลั่น ได้แก่ แนพทา (naphtha) น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา ตามลำดับ

ไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นแก๊สที่ออกจากด้านบนของหอกกลั่นสามารถเรียกรวมกันว่า เอกสารนี้ "แก๊สปิโตรเลียม" ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 1 อะตอม ถึง 4 อะตอม และมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจน (N_2) ไฮโดรเจน (H_2)

และอื่น ๆ ปนอยู่ จำเป็นต้องกำจัดหรือแยกออกโดยนำแก๊สปิโตรเลียมผ่านเข้าหน่วยแยกแก๊สปิโตรเลียมเหลว (gas recovery unit) เพื่อแยกเอาโพรเพนและบิวเทนออกมา จากนั้นแก๊สปิโตรเลียมเหลวจะถูกส่งเข้าหน่วยฟอกซึ่งใช้โซดาไฟ (caustic soda) เพื่อแยกเอากรด (acid gas) เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออก หลังจากนั้นแก๊สปิโตรเลียมเหลวจะถูกส่งไปเก็บในถังเก็บและมีสภาพเป็นของเหลวภายใต้ความดัน



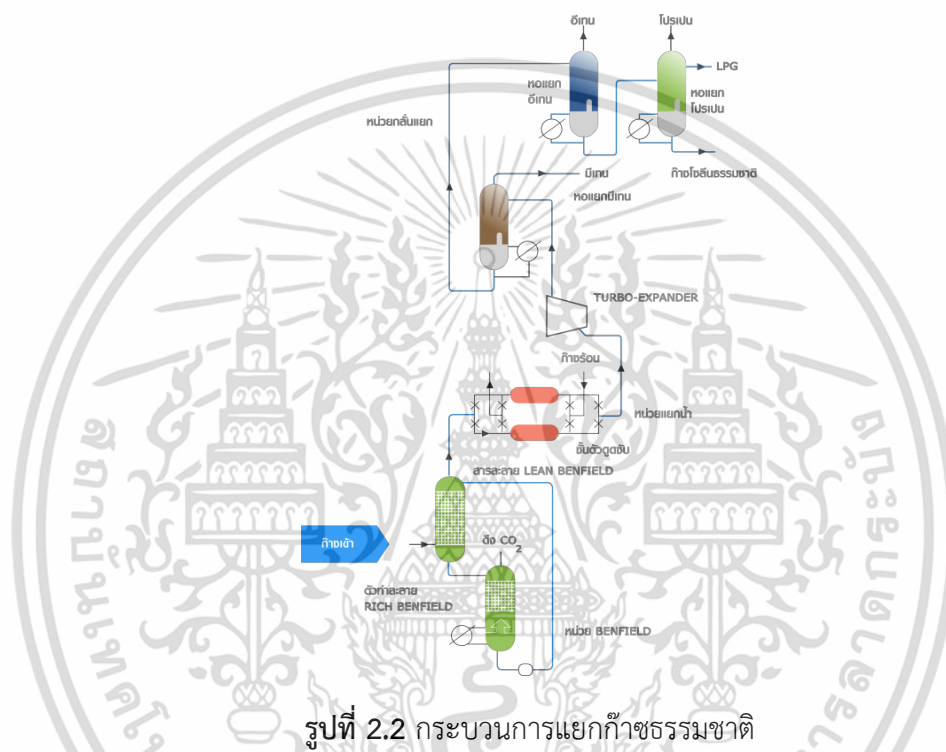
รูปที่ 2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่นน้ำมัน

2.1.1.2 กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ

ผลผลิตแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่ได้จากกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาตินี้จะมีแก๊สโพรเพนและบิวเทนในแก๊สธรรมชาติประมาณ 6-10 เปอร์เซ็นต์ แก๊สธรรมชาติที่นำขึ้นมาจากแหล่งขุดเจาะธรรมชาติจะส่งเข้าสู่โรงแยกแก๊ส (gas separation plant) เพื่อทำการแยกเอาสารไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในแก๊สธรรมชาติออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ คือ มีเทน (methane) อีเทน (ethane) โพรเพน (propane) บิวเทน (butane) แก๊สปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas) และแก๊สโซลีนธรรมชาติ (natural gasoline , NGL)

กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติเริ่มจากการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำที่เจือปนอยู่ในแก๊สธรรมชาติออกก่อน โดยกระบวนการ benfield ซึ่งใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) เป็นตัวจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และกระบวนการดูดซับ (absorption process) โดยใช้สารจำพวก molecular sieve ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุนทำหน้าที่ดูดซับน้ำ แก๊สธรรมชาติที่แห้งจากหน่วยนี้จะผ่านเข้าไปใน turbo-expander เพื่อลดอุณหภูมิจาก 250 เคลวิน เป็น 170 เคลวิน และลดความดันลงจาก 43 บาร์ เป็น 16 บาร์ ก่อนแล้วจึงเข้าสู่หอแยกมีเทน (de-methanizer)

มีเทนจะถูกกลั่นแยกออกไป ส่วนที่เหลือคือส่วนผสมของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป (ethane plus stream) ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวและจะออกทางส่วนล่างของหอ ผลิตรกัณฑ์ที่เป็นของเหลวหอดังกล่าวจะถูกนำเข้าสู่หอแยกอีเทน (de-ethanizer) และหอแยกโพรเพน (de-propanizer) เพื่อแยกอีเทนและโพรเพนออกตามลำดับ ในหอแยกโพรเพน โพรเพนจะถูกแยกออกทางด้านบนของหอ ส่วนแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่เป็นส่วนผสมของโพรเพนและบิวเทนจะถูกแยกออกมาจากส่วนกลางของหอและส่วนผลิตรกัณฑ์ที่ออกจากหอทางด้านล่างคือ แก๊สโซลีนธรรมชาติ (natural gasoline)



รูปที่ 2.2 กระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ

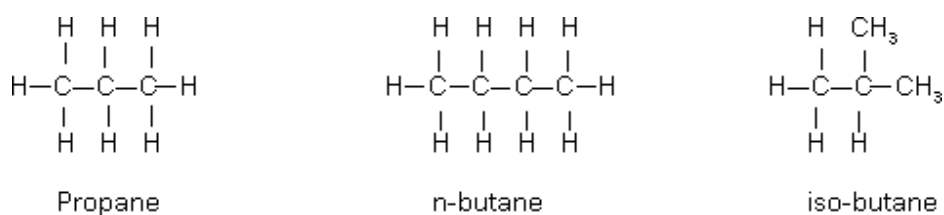
2.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สปิโตรเลียมเหลว [กรมธุรกิจพลังงาน, 2551]

2.1.2.1 คุณสมบัติทางเคมี

แก๊สปิโตรเลียมเหลว ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน 3 อะตอม และคาร์บอน 4 อะตอม ใน 1 โมเลกุล ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ประกอบด้วย โพรเพน (C_3H_8) โพรพิลีน (C_3H_6) บิวเทน (C_4H_{10}) บิวทิลีน (C_4H_8) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปรากฏอยู่ในส่วนผสมของแก๊สปิโตรเลียมเหลว อาจแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ พวกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbon) และไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon)

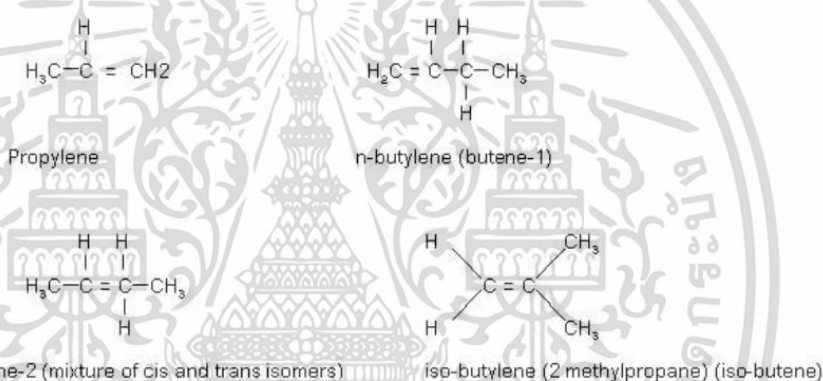
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbon) ได้แก่ โพรเพน (propane) นอร์มัลบิวเทน (n-butane) ไอโซบิวเทน (iso-butane)



รูป 2.3 พันธะเคมีของกลุ่มไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (Saturated Hydrocarbon)

กลุ่มไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (Unsaturated Hydrocarbon) ได้แก่ โพรพิลีน (Propylene), นอร์มัลบิวทิลีน (n-butylene) และ ไอโซบิวทิลีน (iso-butylene)



รูปที่ 2.4 พันธะเคมีของกลุ่มไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (Unsaturated Hydrocarbon)

2.1.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

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
ความดันออสโมส (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	C3H8	CH3OH	CH3OCH3	C10-C20

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปเพื่อประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คุณสมบัติทางกายภาพของแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่สถานะของเหลว

(ก) จุดเดือด และสถานะวิกฤติ

เนื่องจากแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีจุดเดือดต่ำมาก คือ โพรเพนมีจุดเดือดเท่ากับ -42 องศาเซลเซียส นอร์มัลบิวเทนเท่ากับ -0.5 องศาเซลเซียส และไอโซบิวเทนเท่ากับ -11.7 องศาเซลเซียส ดังนั้นแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิปกติและความดันบรรยากาศ แต่จะถูกอัดให้เป็นของเหลวอยู่ในถังภายใต้ความดันหรือนำลงไปแช่เย็นเอาไว้ ค่าความดันที่ทำให้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นของเหลว คือค่าความดันไอ (vapor pressure) เช่น ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความดันไอของโพรเพนเท่ากับ 7.3 บรรยากาศ และที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความดันไอก็จะสูงขึ้นโพรเพนที่อุณหภูมิ 96.67 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้อัดเท่ากับ 41.94 บรรยากาศ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโพรเพนจะไม่เป็นของเหลว แม้ว่าจะอัดด้วยความดันมากกว่า 41.94 บรรยากาศ อุณหภูมิ 96.67 องศาเซลเซียสและความดัน 41.94 บรรยากาศ คือ สถานะวิกฤติสำหรับโพรเพน

(ข) ความหนาแน่น ปริมาตรจำเพาะและความถ่วงจำเพาะ

ความหนาแน่น คือ อัตราส่วนของน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เช่น ที่อุณหภูมิ 15.5 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของโพรเพนมีค่าเท่ากับ 507 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนกลับของความหนาแน่นก็คือ ปริมาตรจำเพาะ โพรเพนมีค่าปริมาตรจำเพาะเท่ากับ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังนั้นถ้าต้องการเก็บโพรเพนไว้ใช้ 10 วัน โดยในแต่ละวันมีความต้องการ 0.5 ตัน จะต้องใช้ถังที่มีขนาดความจุอย่างน้อยที่สุด 10 ลูกบาศก์เมตร สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะจะแสดงถึงอัตราส่วนของความหนาแน่นระหว่างแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งกับน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของแก๊สปิโตรเลียมเหลว ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

โพรเพน	0.5077
นอร์มัลบิวเทน	0.5844
ไอโซบิวเทน	0.5631

ดังนั้นแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะที่เป็นของเหลวจะเบากว่าน้ำ ถ้าเกิดมีแก๊สรั่วขึ้นในขณะที่ยังมีอุณหภูมิโดยรอบในขณะนั้นต่ำมาก และแก๊สปิโตรเลียมเหลวเกิดไหลลงไปในรางระบายน้ำหรือคลอง แก๊สปิโตรเลียมเหลวจะลอยไปกับน้ำ อาจจะทำให้เกิดอัคคีภัยจากบริเวณที่แก๊สปิโตรเลียมเหลวรั่วออกไปได้ นอกจากนี้ อุณหภูมิยังมีผลต่อค่าความหนาแน่น คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของสารเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวจะลดลง

(ค) ความหนืด

ความหนืด หรือ ความข้นใส คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล

(ของเหลวหรือแก๊ส) แก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะของเหลวจะมีความหนืดน้อยมาก ทำให้แก๊สเหลว
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รั่วซึมได้ง่ายกว่าของเหลวชนิดอื่น นอกจากนี้แก๊สปิโตรเลียมเหลวไม่มีคุณสมบัติในการหล่อลื่น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมีความหนืดต่ำ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องจึงมีการสึกหรอสูงจึงต้องออกแบบให้เหมาะสมต่อการสึกหรอและแรงดันสูงได้ อุณหภูมิจะมีผลต่อความหนืดของของไหล ของไหลที่มีสถานะเป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความหนืดจะลดลง แต่ถ้าเป็นแก๊สเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนืดก็สูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 2.3 ค่าความหนืดของแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่ 20 องศาเซลเซียส [นฤมล, 2557]

โพรเพน	0.10 เซ็นติพอยท์
บิวเทน	0.16 เซ็นติพอยท์
น้ำ	1.00 เซ็นติพอยท์

(ง) ความดันไอ (Vapor Pressure)

แก๊สปิโตรเลียมเมื่อถูกบรรจุอยู่ในภาชนะปิดภายใต้ความดันจะมีสถานะเป็นของเหลว แก๊สปิโตรเลียมเหลวจะระเหยเป็นไอเต็มช่องว่างที่อยู่เหนือระดับส่วนที่เป็นของเหลวจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว (Saturation point) จึงจะหยุดระเหย ค่าความดันของแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่จุดอิ่มตัวนี้เรียกว่า “ค่าความดันไออิ่มตัว” ค่าความดันไออิ่มตัวเป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติการของสาร

สารที่มีความดันไอสูงจะสามารถระเหยได้เร็ว และเป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงค่าความดันไออิ่มตัวก็สูงขึ้นด้วย

(จ) ความร้อนแฝงในการระเหย

ความร้อนแฝงในการระเหย คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยต่อหน่วยน้ำหนักของสารเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สที่จุดเดือดปกติ (ณ ความดันบรรยากาศ) หรือปริมาณความร้อนที่ต้องถูกดึงออกต่อหน่วยน้ำหนักของสาร เพื่อให้ได้กลิ่นตัวเป็นของเหลวที่ความดันบรรยากาศและค่าความร้อนแฝงจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แก๊สปิโตรเลียมเหลวมีค่าความร้อนแฝงน้อยกว่าน้ำมาก ดังนั้น เมื่อแก๊สถูกปล่อยออกจากภาชนะเก็บแก๊สเหลวจะระเหย การที่แก๊สเหลวระเหยได้ ต้องได้รับความร้อนหรือดึงความร้อนจากบริเวณใกล้เคียง ทำให้บริเวณที่ถูกดึงความร้อนไปจะมีความเย็นจัด เพราะฉะนั้นถ้าแก๊สเหลวรั่วมาถูกผิวหนังหรือส่วนใดหนึ่งส่วนของร่างกายจะทำให้ผิวหนังหรือส่วนของร่างกายนั้นได้รับความเย็นจัดจนถึงกับไหม้

(ฉ) ความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะ คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัตถุหนึ่งหน่วยน้ำหนักมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศา มีหน่วยเป็นกิโลแคลอรี/กิโลกรัม/องศาเซลเซียส หรือ บีทียู/ปอนด์/องศาฟาเรนไฮต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สปิโตรเลียมเหลวความดันคงที่ 1 บรรยากาศ ที่ 25 องศาเซลเซียส

โพรเพน	0.6023
นอร์มัลบิวเทน	0.5748
ไอโซบิวเทน	0.5824

(ข) สัมประสิทธิ์การขยายตัว

แก๊สปิโตรเลียมเหลวมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 15 องศาเซลเซียส สำหรับบิวเทน อุณหภูมิยิ่งสูงการขยายตัวยิ่งมาก ซึ่งใช้ในการคำนวณปริมาตรสูงสุดที่สามารถจะบรรจุแก๊สลงภาชนะหรือถังเก็บได้ในสภาพอุณหภูมิต่างกัน การบรรจุแก๊สปิโตรเลียมเหลวลงในถังจะต้องเหลือที่ว่างเหนือแก๊สเหลวไว้ ส่วนของช่องว่างนี้จะมีไอแก๊สอยู่เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความดันที่เกิดการขยายตัวของเหลวในกรณีที่แก๊สได้รับความร้อนผิดปกติ นอกจากนี้ระบบท่อส่งต่าง ๆ ที่ส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวจำเป็นต้องมีอุปกรณ์นิรภัยแบบระบาย (hydrostatic relief valve) ไว้ในระบบด้วย

ตารางที่ 2.5 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก๊สปิโตรเลียมเหลว ต่อ 1 องศาเซลเซียส

โพรเพน	0.00300
บิวเทน	0.00200
น้ำ	0.00015

2. คุณสมบัติทางกายภาพของแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่สถานะแก๊ส

(ก) ความหนาแน่น ปริมาตรจำเพาะและความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะของแก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่อเป็นแก๊สจะแสดงถึงอัตราส่วนของความหนาแน่นระหว่างแก๊สกับอากาศที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน เป็นตัวเลขที่ชี้ให้เห็นว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่อเป็นแก๊สจะหนักเป็นกี่เท่าของอากาศ (เมื่อความหนาแน่นของอากาศ = 1)

ตารางที่ 2.6 ค่าความถ่วงจำเพาะที่สถานะแก๊ส ที่อุณหภูมิ 15.5 องศาเซลเซียส

โพรเพน	1.5
บิวเทน	2.0

แก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะที่เป็นแก๊สจะหนักกว่าอากาศ เมื่อเกิดการรั่วไหลขึ้นแก๊สจะไปรวมตัวอยู่ในที่ต่ำ และถ้าบริเวณที่ต่ำนั้นเป็นรางระบายน้ำหรือคูคลอง แก๊สอาจจะไหลตามน้ำ เอกสารนี้เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ผู้ใช้ควรศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมก่อนการดำเนินการใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดอุบัติเหตุไฟไหม้ ณ จุดซึ่งห่างไกลจากบริเวณที่แก๊สรั่วได้ ความหนืดแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะของแก๊สจะมีความหนืดสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

(ข) ความสามารถในการอัดตัวของก๊าซแอลพีจี (Compressibility factor)

สำหรับแก๊สอุดมคติ (Ideal gas) ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความดันและปริมาตร สามารถแสดงโดย สมการสถานะ (Equation of state) คือ $PV = nRT$ (P = ความดัน , V = ปริมาตร , n = จำนวนโมล , R = gas constant T = อุณหภูมิ) แต่สำหรับแก๊สปิโตรเลียมเหลวจะมีลักษณะเบี่ยงเบนไปจากแก๊สอุดมคติ จึงต้องเพิ่มค่าความสามารถในการอัดตัวของแก๊ส (Compressibility factor, Z) ในสมการคือ $PV = ZnRT$ สำหรับแก๊สไม่อุดมคติ โดยที่ Z จะมีค่าน้อยกว่า 1

ตารางที่ 2.7 ค่าความสามารถในการอัดตัวของแก๊สที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

โพรเพน	0.984
นอร์มัลบิวเทน	0.969
ไอโซบิวเทน	0.971

(ค) ช่วงการลุกไหม้ (Flammability Limits in Air)

แก๊สที่สันดาปได้จะมีช่วงส่วนผสมกับอากาศเพียงช่วงเดียวที่จุดไฟแล้วลุกไหม้ได้ เพราะมีอากาศผสมอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะ ช่วงการลุกไหม้ได้จะแสดงค่าเป็นอัตราส่วนร้อยละปริมาตรแก๊สต่ออากาศ ค่าทางด้านความเข้มข้นสูงของช่วงการลุกไหม้ เรียกว่าค่าขอบบน ส่วนทางด้านต่ำ เรียกว่าค่าขอบล่าง

แก๊สปิโตรเลียมเหลวจะสามารถลุกไหม้หรือติดไฟได้ ก็ต่อเมื่อมีแก๊สผสมอยู่ในอากาศ 2-9 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามีแก๊สปิโตรเลียมเหลวต่ำกว่า 2 ส่วนหรือมากกว่า 9 ส่วนในส่วนผสมของแก๊สกับอากาศ 100 ส่วน ส่วนผสมนั้นก็จะมีไม่ติดไฟ

(ง) อุณหภูมิของจุดติดไฟ (Ignition Temperature)

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับเชื้อเพลิงจนเลยอุณหภูมิค่าหนึ่ง เชื้อเพลิงจะเริ่มลุกไหม้เองแม้จะไม่มีประกายไฟหรือสาเหตุของการติดไฟ อุณหภูมิต่ำสุดที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ตามธรรมชาตินี้ เรียกว่าอุณหภูมิของจุดติดไฟ (Ignition Temperature)

ตารางที่ 2.8 อุณหภูมิของจุดติดไฟ

โพรเพน	460-580 องศาเซลเซียส
บิวเทน	410-550 องศาเซลเซียส
น้ำมันเบนซิน	280-430 องศาเซลเซียส
น้ำมันดีเซล	250-340 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งน้ำมันดีเซล

จะเห็นได้ว่า แก๊สปิโตรเลียมเหลวจึงติดไฟได้ยากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล จึงกล่าวได้ว่า แก๊สปิโตรเลียมเหลวมีความปลอดภัยสูงกว่า

(จ) อุณหภูมิของเปลวไฟ (Flame temperature)

อุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวสูงมากพอที่จะหลอมโลหะ เช่น หลอมเหล็ก ทองเหลือง อลูมิเนียม และแก้ว เป็นต้น โดยโพรเพน มีอุณหภูมิของเปลวไฟในอากาศ 1,930 องศาเซลเซียส และบิวเทน 1,900 องศาเซลเซียส จึงเหมาะสำหรับงานอุตสาหกรรมหลอมโลหะ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการอบเครื่องเคลือบดินเผาอบสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(ฉ) ค่าออกเทน (Octane Number)

แก๊สปิโตรเลียมเหลวมีค่าออกเทนสูง ประมาณ 95-110 ซึ่งสูงกว่าค่าออกเทนของน้ำมันเบนซิน จึงเหมาะกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงของรถยนต์มาก

(ช) อัตราส่วนปริมาตรของเหลว/แก๊ส (Liquid/Vapor Volume Ratio)

แก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่อระเหยและเปลี่ยนสถานะไปเป็นแก๊ส ปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงไปมาก ที่อุณหภูมิ 15.5 องศาเซลเซียส โพรเพนเหลว 1 หน่วยปริมาตร เมื่อกลายเป็นแก๊สจะมีปริมาตรเป็น 274 หน่วย บิวเทนเหลว 1 หน่วยปริมาตร เมื่อกลายเป็นแก๊สจะมีปริมาตรเป็น 233 หน่วย แก๊สปิโตรเลียมในสถานะที่เป็นของเหลว ถ้ารั่วออกมาจะมีอันตรายมากกว่าที่เป็นแก๊ส เพราะจะเพิ่มปริมาตรมากขึ้น ปริมาณแก๊สมากจะมีความอันตรายและมีความรุนแรงมาก

(ซ) ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Air Requirement)

แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สที่มีส่วนผสมอยู่ในอากาศ 21 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรและเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ ปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้จะต้องมีปริมาณที่แน่นอน ในกรณีที่แก๊สปิโตรเลียมเหลวเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมดก็จะกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ สามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังต่อไปนี้



จากสมการ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะเป็น 5 เท่าในกรณีของโพรเพน และ 6.5 เท่าในกรณีของบิวเทน ปริมาณออกซิเจนในอากาศมีประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการเผาไหม้โพรเพนอย่างสมบูรณ์ 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้อากาศ 24 ลูกบาศก์เมตร บิวเทน 1 ลูกบาศก์เมตร จะใช้อากาศ 31 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซิน แก๊สปิโตรเลียมเหลวต้องการปริมาณอากาศมากกว่าเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ฉ) ค่าความร้อนของการเผาไหม้ (heat of combustion)

ค่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการนำเอาแก๊สปิโตรเลียมเหลวหนึ่งหน่วยน้ำหนัก หรือหนึ่งหน่วยปริมาตรมาเผาไหม้ที่ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของการเผาไหม้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของเชื้อเพลิง และใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องจักร

(ญ) สี กลิ่น และการละลาย

แก๊สปิโตรเลียมเหลวบริสุทธิ์ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ผู้ผลิตจึงต้องเติมสารประกอบที่มีกลิ่นเหม็น เช่น สารพวกเมอร์แคปแทน(mercaptan) ลงไป เพื่อให้ผู้ใช้รู้ตัวเมื่อแก๊สเกิดการรั่ว หรือลืมนิปิดวาล์ว นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลาย (solvent) เช่นเดียวกับน้ำมันระเหย ที่ทำมาจากยางธรรมชาติเสียคุณสมบัติได้ เช่น ปะเก็น หรือ ซีลต่าง ๆ ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้กับถังที่บรรจุแก๊สปิโตรเลียมเหลว ควรใช้วัสดุอื่นที่ไม่ได้ทำมาจากยางธรรมชาติ เช่น ยางสังเคราะห์ เป็นต้น

2.1.3 วิธีสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว [ปานจิตต์, 2557]

2.1.3.1 ปฏิกริยาในการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว

ในการเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์เพื่อผลิตสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยา สำหรับการสังเคราะห์เมทานอลและซีโอดีจะต้องผ่านขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาดังต่อไปนี้ (ค่าเอนทัลปีคำนวณที่สภาวะมาตรฐาน, 25°C และ 1 atm)



การสังเคราะห์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์จะเริ่มจากปฏิกริยาการเกิดเมทานอล ดังสมการที่ 1 ปฏิกริยาดีไฮเดรชันของเมทานอลและไดเมทิลอีเทอร์ไปเป็นไฮโดรคาร์บอน ดังสมการที่ 2 3 และ 4 พบว่า ปฏิกริยาการสังเคราะห์เมทานอลเป็นขั้นควบคุมปฏิกริยา (2) โดยการ

เอกสารนี้... ไม่ว่ากร... ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการเลือกเกิดในการสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจนเหลว

- ความว่องไวในการเกิดเมทานอลและความต้านทานของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงก์ออกไซด์ต่อไอน้ำ
- ความสามารถในการเปลี่ยนของเมทานอลจากตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงก์ออกไซด์ไปยังแพลเลเดียม-เบต้าซีโอไลต์
- ความกว้างของรูพรุนในเบต้าซีโอไลต์จะช่วยในการแพร่กระจายของเมทานอลและผลผลิตไฮโดรคาร์บอนซึ่งจะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิภายในรูพรุน

2.2 แก๊สสังเคราะห์ (Syngas)

เป็นแก๊สเชื้อเพลิงผสมที่มีองค์ประกอบหลัก คือ ไฮโดรเจน (H_2) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีความสามารถในการเผาไหม้ที่ดี สามารถนำมาใช้ผลิตปิโตรเลียมสังเคราะห์ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง และ ตัวหล่อลื่นสำหรับผลิตแก๊สโซลีน แก๊สสังเคราะห์สามารถผลิตได้จากกระบวนการทางความร้อนเคมี (Thermochemical processes) เป็นการแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานโดยการใช้ความร้อนจนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน กระบวนการรีฟอร์มมิง

2.2.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification processes)

กระบวนการที่แปลงวัสดุคาร์บอนพื้นฐาน (carbon-based materials) ทั้งในรูปของแข็งและของเหลว เช่น ขยะชุมชน หรือชีวมวล ให้อยู่ในรูปของแก๊ส โดยการให้ความร้อนระดับหนึ่งแต่ไม่ถึงระดับการเผา และจำกัดปริมาณออกซิเจนหรืออากาศ โดยความร้อนระดับนี้จะทำให้โมเลกุลเกิดการแตกตัว เบื้องต้นจะได้ส่วนผสมของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน สามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอื่น ๆ

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส โดยให้ความร้อนผ่านตัวกลางของกระบวนการ เช่น อากาศ ออกซิเจนหรือไอน้ำ ซึ่งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะมีความแตกต่างจากกระบวนการเผาไหม้ (Combustion) เนื่องจากการเผาไหม้เป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ แต่สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีภายในของคาร์บอนในชีวมวลไปเป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible gas) อาศัยปฏิกิริยา 2 กระบวนการ โดยแก๊สที่ผลิตได้จะมีคุณภาพที่ดีกว่า และ ง่ายต่อการใช้งานกว่าชีวมวล เช่น สามารถใช้เดินเครื่องยนต์แก๊ส (Gas engine) และกังหันแก๊ส (Gas turbine) หรือใช้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวต่อไป (Liquid fuels) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปทางด้านเคมีความร้อน (Thermo chemical conversion process) โดยอาศัยอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 กระบวนการรีฟอร์มมิ่ง (Reforming processes)

เป็นกระบวนการในการแปรรูปเชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือแก๊สสังเคราะห์โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไอน้ำ มาทำปฏิกิริยา ซึ่งในกระบวนการรีฟอร์มมิ่งสามารถแบ่งออกได้หลายกระบวนการขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการสำคัญ คือ กระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen) สูง เสียค่าใช้จ่ายน้อย จึงถูกนำมาใช้ในทางการค้า โดยหลักการของกระบวนการนี้ คือ การป้อนไอน้ำ (Steam) เข้าสู่ระบบเพื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในสถานะแก๊ส เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สชีวภาพ และ เอทานอล เป็นต้น โดยไฮโดรเจน (Hydrogen) จะถูกดึงออกจากไอน้ำ (H₂O) และ สารไฮโดรคาร์บอน (HC) ส่วนออกซิเจนที่เหลือน้ำ และคาร์บอนที่เหลือจากไฮโดรคาร์บอนจะรวมตัวกันเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยนำแก๊สธรรมชาติทำปฏิกิริยา reforming กับไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงๆ (อาจจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งร่วมด้วย) เพื่อให้ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (C₂O) และ แก๊สไฮโดรเจน (H₂) (ดังสมการที่ 1 และ 2 ในขั้นที่ 1) จากขั้นตอนที่ 1 จะเห็นว่ามี CO เกิดขึ้นร่วมด้วย ดังนั้นจะมีการนำไอน้ำเข้ามาทำปฏิกิริยากับ CO อีกครั้งเพื่อให้ได้แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในขั้นที่ 2 ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water-Gas Shift reaction (WGS)



2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [สมฤทัย, 2550]

คำว่า "ตัวเร่งปฏิกิริยา" มาจากภาษากรีก 2 คำ ได้แก่คำว่า คตะตะ (cata) หมายถึง หัก (down) และไลไซน์ (lysein) หมายถึง แยกหรือแตก (spit or break) ดังนั้น "ตัวเร่งปฏิกิริยา" หมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในการเลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิดในขณะเดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดขึ้นข้างเคียง การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้ยังคงต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก

ความว่องไว และความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (intermediate) หลายทฤษฎีได้พยายามอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว เช่น ทฤษฎี

สถานะทรานสิชัน (transition - state - theory) อธิบายว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยลดพลังงาน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ขวางกั้น (potential energy barrier) ซึ่งสารตั้งต้นต้องมีเพื่อเปลี่ยนสารผลิตภัณฑ์ คือ ลดพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาต่ำลง

2.3.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา [พัชราพร, 2557]

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

2.3.1.1 โลหะที่ว่องไว (active metal site)

ส่วนโลหะที่ว่องไวบนตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ในการช่วยดูดซับสารตั้งต้นเพื่อนำมาทำปฏิกิริยา ถือเป็นตัวสำคัญในการเร่งการเกิดปฏิกิริยา โดยความว่องไวในการดูดซับของโลหะว่องไวดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของโลหะนั้น ๆ นอกจากนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงสำหรับโลหะว่องไว คือ ความเสถียรของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ความคงตัวเมื่อต้องใช้ตามภาวะต่าง ๆ รวมถึงราคา โดยโลหะว่องไวในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นที่นิยมสำหรับการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวคือ โลหะคอปเปอร์ (Cu) และ สำหรับการเร่งปฏิกิริยาต้องให้โลหะดังกล่าวอยู่ในรูปที่พร้อมในการทำปฏิกิริยา ซึ่งนิยมใช้ในรูป Cu^0 และ Cu^+

(1) ตัวรองรับ (Support)

การมีตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเพื่อช่วยให้เกิดการกระจายตัวของโลหะว่องไว ยิ่งตัวรองรับมีพื้นที่ผิวมาก การกระจายตัวของโลหะว่องไวนั้นก็ยิ่งมีโอกาสเพิ่มสูงขึ้น และยิ่งการกระจายตัวของโลหะเพิ่มขึ้นก็ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัสของโลหะว่องไวด้วย ทำให้มีการเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แนวทางการเลือกตัวรองรับที่ดี เช่น พื้นที่ผิว (นิยมให้มีพื้นที่ผิวมากแต่ไม่ใช่ทุกกรณี)

สมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวรองรับ คือการมีพื้นที่ผิวน้ำสูง สำหรับสารกัมมันต์ แม้ว่าบางครั้งอาจทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยามีวิธพันธ์ที่พบบ่อยจะเป็นแบบตัวเร่งที่มีหลายเฟส โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาจับอยู่บนตัวรองรับซึ่งมีพื้นที่ผิวสูง ตัวรองรับที่เป็นที่รู้จัก ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) หรืออะลูมินา (Al_2O_3) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซีโอไลต์ (Zeolites) และไทเทเนียม (TiO_2) ซึ่งต้องการให้ตัวเร่งปฏิกิริยากระจายตัวได้ดีบนตัวรองรับ สมบัติโดยทั่วไปของตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยามีดังนี้

1. ต้องเฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิด
2. มีความแข็งแรงเชิงกล เช่น ทนต่อการขูดขีด หรือการบีบอัด
3. มีเสถียรภาพหรือทนต่อสภาวะต่าง ๆ ได้ในระหว่างการทำปฏิกิริยา เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
4. มีพื้นที่ผิวสูงและมีความพรุน แต่ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทำงาน การมีความพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมถึงขนาดของรูพรุนและการกระจายของรูพรุนพอเหมาะการมีพื้นที่ผิวสูง หมายถึงมีรูพรุนที่มีขนาดเล็กแต่ถ้ารูพรุนเล็กเกินไปจะทำให้เกิดการอุดตันได้ โดยเฉพาะในกรณีที่มีปริมาณของโลหะตัวเร่งสูงขนาดอนุภาคขนาดเล็กแต่ไม่ควรเล็กกว่า 2 นาโนเมตร

5. มีราคาถูกซึ่งจะช่วยให้ต้นทุนในการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าต่ำ หากนำไปสู่การประยุกต์ ก็จะเป็นกระบวนการที่ช่วยประหยัดต้นทุนได้ [วิลาลินี, 2559]

(3) ตัวส่งเสริม (Promoter)

ตัวส่งเสริมเป็นตัวที่ช่วยปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น ช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวเพิ่มมากขึ้น การเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากขึ้น รวมถึงช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีความคงตัวมากขึ้น เป็นต้น ตัวส่งเสริมที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งช่วยไม่ให้เกิดการเกาะกลุ่มของโลหะว่องไว ทำให้ขนาดอนุภาคของโลหะมีขนาดเล็กและเกิดการกระจายตัวสม่ำเสมอ รวมถึงการช่วยเร่งการดูดซับและการทำปฏิกิริยาของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ การเติมโครเมียม (Cr) ช่วยป้องกันการจัดเรียงตัวใหม่ของโลหะคอปเปอร์ปรับปรุงขนาดรูพรุนและความว่องไวให้ดีขึ้น ช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (Water gas shift) และยังช่วยให้การรีดิวซ์คอปเปอร์ออกไซด์เกิดได้ดีขึ้น การเติมแพลเลเดียม (Pd) ช่วยในเรื่องการป้องกันการจัดเรียงตัวใหม่ของโลหะคอปเปอร์และเพิ่มความมั่นคงของพันธะระหว่างคอปเปอร์และซิงค์ออกไซด์ให้มากขึ้น การเติมเซอร์โคเนียม (Zr) ช่วยให้การดูดซับได้มากขึ้นและช่วยให้กระจายตัวได้ดีขึ้นการเติมโลหะที่มีประจุ $3+$ เช่น Al^{3+} Sc^{3+} และ Cr^{3+} จะช่วยรักษาความเป็น Cu^+ ไว้ได้อย่างดี นอกจากนี้ยังมีโลหะอีกหลายตัว ส่งเสริมได้เช่น โบรอน (B) แกลเลียม (Ga) โคบอลต์ (Co) แมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น

2.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา [พัชรพร, 2557]

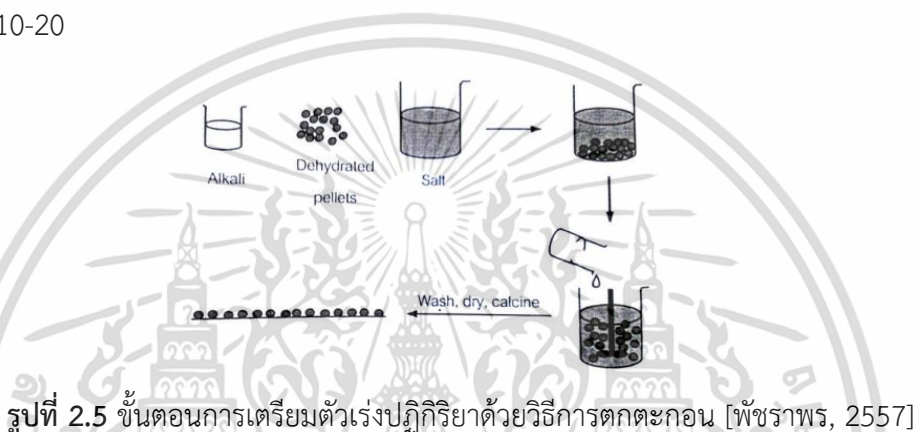
สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความมีเสถียรภาพ พื้นที่ผิว และความทนทาน การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไป สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มออกไซด์ (Active oxide component)
2. การพอกพูนองค์ประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาบนตัวรองรับ (Deposition-produced activity component)
3. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบพิเศษ (Special types)

กระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้จะเป็นเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการ ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การตกตะกอน (Precipitation)

วิธีการตกตะกอน (Precipitation Method) การทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเกลือของสารละลาย เช่น ไนเตรต ซัลเฟตคลอไรด์ หรือออกซาลेट กับอนุภาคของตัวรองรับในตัวกลางที่เป็นเบส เช่น แอลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ หรือแอมโมเนียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดการตกตะกอนออกมาเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ หรือโลหะคาร์บอเนต จากนั้นจึงนำไปให้ความร้อนจนเปลี่ยนเป็นโลหะออกไซด์ โลหะออกไซด์จะถูกแคลไซด์เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในระหว่างการเตรียมซึ่งมักจะต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้อยู่ในรูปโลหะก่อนจึงจะสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ การตกตะกอนเหมาะสมกับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีปริมาณโลหะที่เป็นส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาประมาณร้อยละ 10-20



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอน [พัชรพร, 2557]

2.4.2 การเผาหรือการแคลไซน์ (Calcination)

การเผาหรือการแคลไซน์เป็นใช้อากาศจัดสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการให้สลายตัวออกไป รวมถึงเป็นการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนอยู่ในรูปที่ต้องการ นั่นคือ อยู่ในรูปของออกไซด์ เช่น การเปลี่ยนคอปเปอร์คาร์บอเนตเป็นคอปเปอร์ออกไซด์ (CuCO_3 เป็น CuO) หรือซิงค์คาร์บอเนตเป็นซิงค์ออกไซด์ (ZnCO_3 เป็น ZnO) เป็นต้น โดยอัตราการให้ความร้อนมีผลต่อขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย คือ ยิ่งอัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นกับความสามารถในการสลายตัวของฟริเคอร์เซอร์แต่ละชนิด (ประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส) หลังจากการทำให้แห้ง กระบวนการที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือ การหลุดออกของน้ำภายในโครงสร้างที่จับอยู่ด้วยพันธะเคมี และการหลุดออกของไอออนลบต่างๆ ขั้นตอนนี้ อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงกระจายของขนาด รูพรุน การสร้างเฟสว่องไว การปรับปรุงผิวหน้า การเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลและเสถียรภาพเชิงความร้อน

2.4.3 วิธีจุ่มซุบ (Impregnation) [จิตวัต, 2557]

วิธีการจุ่มซุบเป็นเทคนิคหนึ่งในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการสัมผัสกันของของแข็งและของเหลวที่มีสารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ไปเกาะที่พื้นผิวของตัวรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การจุ่มซุบแบบแห้ง (Dry-Impregnation) จะทำการหยดสารละลายจนเต็มรูพรุนของสารตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาจนพอดี โดยจะเกิดกระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ

- 1.1) เกิดการถ่ายเทตัวถูกละลายเข้าสู่พื้นผิวภายในของตัวรองรับ
- 1.2) เกิดการแพร่ตัวถูกละลายเข้าสู่รูพรุนของตัวรองรับ
- 1.3) ตัวทำละลายถูกดูดซึมอยู่ที่บริเวณผนังของรูพรุน

2. การจุ่มซุบแบบเปียก (Wet-Impregnation) จะทำการจุ่มตัวรองรับลงในสารละลายที่มีโลหะที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะเกิดกระบวนการ 4 ขั้นตอน คือ

- 2.1) เกิดการถ่ายเทตัวถูกละลายที่บริเวณพื้นผิวภายนอกของตัวรองรับ
- 2.2) เกิดการถ่ายเทตัวถูกละลายเข้าสู่พื้นผิวภายในของตัวรองรับ
- 2.3) เกิดการแพร่ตัวถูกละลายเข้าสู่รูพรุนของตัวรองรับ
- 2.4) ตัวทำละลายถูกดูดซึมอยู่ที่บริเวณผนังของรูพรุน



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการจุ่มซุบแบบเปียก [พัชราพร, 2557]

2.4.4 การอัดเม็ด (Pelletizing)

เป็นกระบวนการขึ้นรูปวัสดุจากผงให้เป็นเม็ด และใช้ตะแกรงคัดเลือกขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด 500-800 microns ใช้แรงดัน 2000-3000 psi.

2.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟิกส์เบด (Fixed bed reactor) [กำชัย, 2548]

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed reactor) บางครั้งเรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบแพกเบด (Packed-bed reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นของแข็งบรรจุอยู่กับที่ภายในตัวเร่งปฏิกิริยาวางอยู่บนฐานรอง (Support) ซึ่งขึ้นความสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์นี้เรียกว่า เบด (bed) โดยทั่วไปสารตั้งต้นถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ในรูปของแก๊สและของเหลว เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ใช้กันมากในอุตสาหกรรมเคมีปิโตรเลียม และ ปิโตรเคมี สามารถแบ่งเอกสารนี้ได้ตามลักษณะการไหลของแก๊สและของเหลว วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบทริกเกิลเบด (trickle-bed reactor)

ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ แก๊สและของเหลวจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ และเคลื่อนที่ลงไปด้วยกันทั้งคู่ (cocurrent downflow) โดยของเหลวจะถูกพ่นเป็นละอองกระจายให้สัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา **ดังรูปที่ 2.7** การทำให้ของเหลวกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอครอบคลุมพื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดความสูงของเบด เป็นสิ่งสำคัญเพราะถ้าควบคุมกระบวนการได้ไม่ดี ของเหลวที่ไหลลงตามเบด จะรวมตัวกันและไม่ไหลผ่านบางบริเวณของเบด อาจทำให้บริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น เรียกว่า จุดร้อน (hot spot) เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีการใช้ในประเทศอเมริกา สำหรับป้อนสารไฮโดรคาร์บอนในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมากกว่า 20 ล้านบาร์เรลต่อวัน และใช้ใอุตสาหกรรมการบำบัดน้ำเสีย

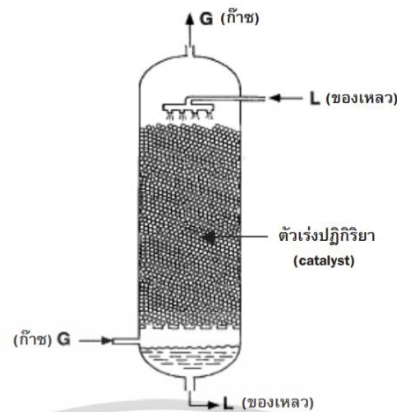


รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบทริกเกิลเบด

2.5.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบทริกเกิลเบดเคาน์เตอร์เคอเรนท์ (trickle-bed countercurrent reactor)

ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ ของเหลวจะไหลลงในขณะที่แก๊สเคลื่อนที่ขึ้นสวนทางกัน (counter current) ซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติของแก๊สและของเหลวตามแรงโน้มถ่วง **ดังรูปที่ 2.8** การดำเนินการในลักษณะนี้ช่วยให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ในการลำเลียงแก๊สและของเหลว การสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวเกิดขึ้นได้ดีกว่าระบบที่แก๊สและของเหลวเคลื่อนที่ไปด้วยกันทั้งคู่ เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้สามารถนำไปกำจัดแก๊สพิษในอากาศได้ดีโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สพิษกับของเหลวทำให้อากาศที่ออกจากเครื่อง มีความเข้มข้นของแก๊สพิษน้อยมาก

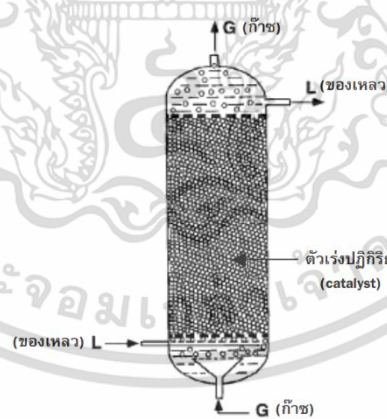
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบทริคเกิลเบดเคาน์เตอร์เคอเรนท์

2.5.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบแพคบัเบิลเบด (packed bubble-bed reactor)

ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ แก๊สและของเหลวเคลื่อนที่ขึ้นไปด้วยกัน (cocurrent upflow) ดังรูปที่ 2.9 โดยอัตราการไหลของแก๊สมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับของเหลวทำให้แก๊สเคลื่อนที่ขึ้นในรูปของฟองแก๊สกระจายตัวอยู่ในของเหลว ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ คือพื้นผิวทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะสัมผัสกับของเหลวการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นดีกว่าแบบทริคเกิลเบด และสามารถป้องกันการเกิดจุดร้อนได้ แต่มีข้อเสียคือค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของปั๊มมีค่าสูงเนื่องจากเกิดความดันลด (pressure drop) ภายในตัวเครื่องปฏิกรณ์สูง



รูปที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์แบบแพคบัเบิลเบด

2.6 ควอร์ตซ์ / ททรายแก้ว (quartz sand) [กรมทรัพยากรธรณี, 2550]

ควอร์ตซ์ (quartz) หรือ เซียวหนุมาน มีส่วนประกอบทางเคมี เป็นซิลิกา (SiO_2) มีมวลโมเลกุล 60.08 กรัมต่อโมล ส่วนมากจะใส ไม่มีสี ถ้ามีมลทินเจือปนอยู่จะให้สีต่างๆ เช่น ม่วง ชมพู เอกสารนี้ และเหลืองที่ควอร์ตซ์ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์เซรามิก อาจพบได้ทั้งแบบที่เกิดเป็นน้ำไม่ผ่านการสลาย (vein) ซึ่งตัดแทรกเข้ามาในหินแกรนิตหรือหินอื่นๆ และที่อยู่ในรูปของทรายแก้ว ซึ่งได้นำมาใช้

ในงานเซรามิกอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีปริมาณมาก มีซิลิกา (SiO_2) สูงกว่า 98% มีความบริสุทธิ์สูง นอกจากนี้ยังได้ง่าย และต้นทุนการผลิตต่ำ ประโยชน์ของควอร์ตซ์ ช่วยลดการเกิด sintering ช่วยให้สารประกอบกระจายตัวได้ดี ถ้าเป็นผลึกที่สมบูรณ์และมีความบริสุทธิ์มาก นำไปใช้ทำเลนส์ ปริซึม แว่นตา นาฬิกาควอร์ตซ์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่ถ้ามีมลทินจะนำไปใช้ทำเป็นผงขัด กระจกทราย และใช้ในการถลุงเหล็กแทนแร่ฟลูออไรต์ นอกจากนี้ยังนำไปใช้เป็นรัตนชาติและหินประดับด้วย ทรายแก้วใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา ใช้ทำเป็นแบบหล่อเหล็กในอุตสาหกรรมเหล็กหล่อ และใช้เป็นผงขัดสนิมเหล็กแทนการใช้กระจกทราย

2.7 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) [SGE CHEM, 2564]

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหรือต่างทับทิม เป็นสารเคมีประเภท Inorganic ชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นเกล็ดหรือผลึกสีม่วงเข้ม สามารถละลายน้ำได้ดี โดยทางเคมีแล้วถือว่าเป็นเกลือชนิดหนึ่ง มีฤทธิ์เป็นด่างอ่อนๆ และมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิเดชัน โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี และ ห้องปฏิบัติการ เช่น สารออกซิไดซ์ที่เข้มข้น และเป็นยาสำหรับผิวหนังอักเสบ สำหรับทำความสะอาดแผล และการฆ่าเชื้อโรคทั่วไป

ตารางที่ 2.9 สมบัติทั่วไปของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

สูตรทางเคมี	KMnO_4
มวลโมเลกุล	158.03 กรัมต่อโมล
ลักษณะทางกายภาพ	ของแข็งผลึกสีม่วง
ความหนาแน่น	2.703 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	240 องศาเซลเซียส
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น



รูปที่ 2.10 ลักษณะของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper Oxide) [ณิชากร, 2561]

คอปเปอร์ออกไซด์ สูตรทางเคมีคือ CuO เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบโมนอคลินิก ประกอบไปด้วยคอปเปอร์ซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันที่มีประจุ +2 หรือ +3 คอปเปอร์ออกไซด์ มีสมบัติพิเศษทางเคมีและกายภาพที่หลากหลาย มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงมีความเสถียรภาพในสภาวะอุณหภูมิสูง มีราคาถูก จึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก หรือ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และ มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมด้านอื่นๆหลายด้าน เช่น การนำไปใช้งานเป็นส่วนประกอบของ โซล่าเซลล์และอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ รวมถึงสมบัติพิเศษด้านการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ทำให้นักวิจัยและผู้ประกอบการให้ความสนใจในการนำไปพัฒนาและต่อยอดการผลิต

ตารางที่ 2.10 สมบัติทั่วไปของคอปเปอร์ออกไซด์

สูตรทางเคมี	CuO
มวลโมเลกุล	79.545 กรัมต่อโมล
ลักษณะทางกายภาพ	ของแข็งสีดำ
ความหนาแน่น	6.315 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1,326 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2,000 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลาย	สามารถละลายได้ในแอมโมเนียมคลอไรด์ , โพแทสเซียมไฮยาไนต์ แต่ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ , แอลกอฮอล์ , แอมโมเนียมคาร์บอเนต



รูปที่ 2.11 ลักษณะของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) [Vessel chemical, 2566]

ซิงค์ออกไซด์ คือ สารประกอบอนินทรีย์ เป็นสารประกอบที่เป็นผงสีขาว ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดและอัลคอล์ ซิงค์ออกไซด์จัดอยู่ในสารเคมีประเภททั่วไป สามารถเป็นตัวเร่งหรือกระตุ้นปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมยางอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นวัตถุดิบชนิดแรกๆ ที่ถูกเลือกนำมาใช้ในการผลิตยางล้อรถเข็น, ยางปูพื้น, สายพาน, สายลําเลียย และอะไหล่รถยนต์ สามารถเป็นตัวเพิ่มแรงดึง, การยึดเกาะ เป็นสารยับยั้งหรือฆ่าจุลชีพและแบคทีเรีย สามารถลดต้นทุนทางด้านการผลิตได้

ซิงค์ออกไซด์มีอยู่บนผิวโลก เรียกว่า แร่ซิงไซต์ (The mineral zinbite) แต่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนมากได้จากการสังเคราะห์

ตารางที่ 2.11 สมบัติทั่วไปของซิงค์ออกไซด์ [วิกิพีเดีย, 2561]

สูตรทางเคมี	ZnO
มวลโมเลกุล	81.38 กรัมต่อโมล
ลักษณะและสี	ผงสีขาว
ความหนาแน่น	5.606 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1975 องศาเซลเซียส
ค่าช่องว่างระหว่างระดับพลังงาน	3.37 อิเล็กตรอนโวลต์
ความสามารถในการละลาย	เกือบจะไม่ละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ละลายในกรดและเบส



รูปที่ 2.12 ลักษณะของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

2.10 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) [สายสมร, 2561]

อะลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีมากในเปลือกโลก โดยทั่วไปอะลูมิเนียมที่พบบนเปลือกโลกจะอยู่ในรูปของ aluminum silicate จัดเป็นแร่ธาตุที่พบในรูปของ Corundum (Al_2O_3) Diaspore ($Al_2O_3 \cdot H_2O$) Gibbsite ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) และ Bauxite ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) โดยปกติจะมีสีขาวหรือใสไม่มีสี แต่หากมีธาตุเจือปนเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดสีสวยงาม จัดเป็นอัญมณีที่มีค่า เช่น ทับทิม (Ruby)

ไพลิน (Sapphire) บุษราคัม (Yellow Sapphire) เป็นรูปแบบของ Corundum ที่มีมลทิน ในขณะที่ Corundum ที่ไม่มีมลทินจะไม่มีสี

อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) จัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญเนื่องจากสมบัติที่สำคัญหลายประการ เช่น มีความแข็งและจุดหลอมเหลวสูง ทนทานต่อการขีดข่วนและสารเคมี มีความโปร่งใสเป็นฉนวน และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น จะพบในเฟสอัลฟา แกมมา และเบต้า โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในเฟสของอัลฟาอะลูมินาและแกมมาอะลูมินา โดยอะลูมินาแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างเฉพาะและมีสมบัติที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.12 สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมออกไซด์

สูตรทางเคมี	Al_2O_3
มวลโมเลกุล	101.96 กรัมต่อโมล
ลักษณะทั่วไป	ผงสีขาว ไม่มีกลิ่น
ความหนาแน่น	3.5 - 3.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	2072 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2977 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลาย	ไม่ละลายน้ำ



รูปที่ 2.13 ลักษณะของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

2.11 ซีโอไลต์ (Zeolite) [ปานจิตต์, 2557]

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวมีปฏิกิริยาหลักคือการเกิดดีไฮเดรชันของเมทานอล ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยากรดเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์และแก๊สปิโตรเลียมเหลวขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ ในช่วงแรกตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่นิยมนำมาใช้ คือตัวอะลูมินาเป็นหลักแต่ต่อมาได้มีการนำซีโอไลต์ชนิดต่างๆ มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.1 คุณสมบัติทั่วไป

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีรูปผลึกหลายแบบ (crystalline aluminosilicates) ซีโอไลต์ประกอบด้วยโครงสร้างอะลูมินาและซิลิกา (SiO_4 หรือ AlO_4) โครงสร้างของอะลูมินาและซิลิกาถูกเชื่อมโยงเข้าด้วยกัน โดยอะตอมของออกซิเจนซึ่งเป็นอะตอมอยู่ตรงมุมของโครงสร้างเตตระฮีดรอน (tetrahedron) ทำให้เกิดซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้

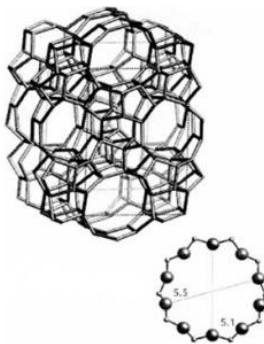
ประเภทของซีโอไลต์กำหนดจากลักษณะองค์ประกอบของโพรงและช่องว่างจากโครงสร้างที่เฉพาะตัวของซีโอไลต์ จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายอย่าง ซึ่งแต่เดิมนักจะถูกนำไปใช้เพียงในด้านสมบัติ molecular sieve ปัจจุบันพบว่าซีโอไลต์มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่งซีโอไลต์ ประเภทที่มีการแทนที่ตำแหน่งของอะตอม Si ด้วย Al หรือธาตุอื่นๆ ซึ่งทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด ลักษณะและขนาดของโพรงและช่องว่างต่างๆ ที่มีอยู่ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในโพรงซีโอไลต์มีส่วนการเลือกเกิดสูง ทำให้สมบัติในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์มีความเฉพาะตัวและเป็นที่สนใจ ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์ นอกจากจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการยึดจับ และการถ่ายโอนโปรตอนแล้วยังขึ้นกับความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลในโพรงของซีโอไลต์อีกด้วยนอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนด้วยไอออนของโลหะจะทำให้ซีโอไลต์ มีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาพิเศษมากขึ้น ซึ่งไอออนโลหะที่ใส่เข้าไปจะเป็นชนิดเดี่ยวหรือหลายชนิดที่เรียกว่า cocation ก็ได้

2.11.2 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 [จริชญา, 2557]

ZSM-5 ย่อมาจาก Zeolite-Structure-Mobil-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีบทบาทสำคัญในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา เป็นซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาน้อยกว่า 5 จึงมีจำนวนซิลิกาสูง ส่งผลให้มีความเป็นกรดสูง ถูกสร้างบนหน่วยโครงสร้างที่มีสมาชิก 10 วง (10-Membered ring building unit) หน่วยโครงสร้างเหล่านี้เชื่อมต่อกันเกิดเป็นลูกโซ่ (Chanel system) ดังรูปที่ 2.14 มีสูตรโครงสร้างเป็น $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5-100 \text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบอโรโรมบิก

ZSM-5 นิยมใช้ในการแตกตัวไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็ก เพราะมีเอกลักษณ์ในการควบคุมขนาดและรูปร่างของสารตั้งต้นที่จะแพร่ไปสู่เครือข่ายรูเปิดของมันได้ นอกจากนี้ ZSM-5 มักถูกใช้ในรูปกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ZSM-5

2.12 วิธีการสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

2.12.1 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) [คันศนีย์, 2558]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน เป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิชาระบบโครงสร้างผลึก (crystallography) มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพ การผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่าง ๆ

ทฤษฎีพื้นฐานของ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



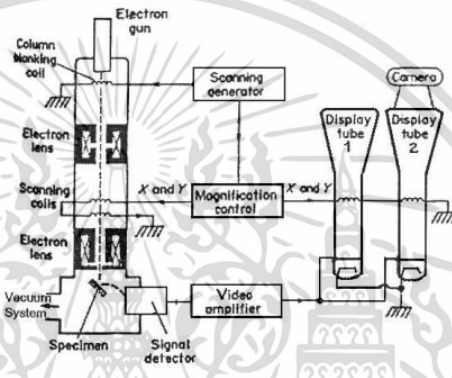
รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

2.12.2 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) [อารียา, 2554]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายประมาณ 10 เท่าจนถึง 500,000 เท่า การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของ เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอก ของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุเป็นต้น หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดง ดังรูปที่ 2.15 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) สแกนลงบนตัวอย่างที่บรรจุอยู่ภายในห้องสุญญากาศ โดยลำอิเล็กตรอนนี้เกิดขึ้นจากการกระทำทำให้คาโทดทั้งสแตนท์ร้อนจนสามารถปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกมา จากนั้นอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยพลังงานค่าสูงและถูกโฟกัสให้เป็นลำอิเล็กตรอนที่เล็กโดยทิศทางเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่าเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งลำอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ อิเล็กตรอนปฐมภูมิลำนี้จะไปตกกระทบที่บริเวณพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง โดยทำให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างหลุดออกจากวงโคจร และเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรนี้ว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิโดยสามารถศึกษาลักษณะของพื้นผิวตัวอย่างได้จากการใช้หัววัดสัญญาณ (Detector) รับอิเล็กตรอนทุติยภูมิลำนี้ และนำไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพ



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.12.3 เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) [ดลฤดี, 2563]

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย สเปกโตรเมตริ่งรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งมีบทบาทสำคัญในปัจจุบันในการวิเคราะห์ธาตุทั้งทางด้านวัสดุศาสตร์ ด้านชีวภาพ ภายภาพ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชิ้นส่วนขนาดเล็ก

โดยหลักการของ EDS เมื่อตัวอย่างที่ต้องการศึกษาถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอนทำให้สามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ด้วยการผลึกให้อิเล็กตรอนของตัวอย่างให้หลุดออกจากอะตอม ดังนั้นเพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพ อิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นถัดไปจะลงเข้ามาแทนที่ และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ซึ่งเรียกรังสีเอ็กซ์แบบแคแรกเทอร์ริสติก (Characteristic X-ray) โดยพลังงานของรังสีเอ็กซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ จากนั้นเมื่รังสีเอ็กซ์เข้าสู่หัววัดชนิด Silicon drift detectors (SSD) หัววัดจะสร้างสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบและจะนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์หาความสูงของสัญญาณส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินและรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ต่อไป

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี ดังนี้คือ

(1) Point analysis เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำของอิเล็กตรอนกระทบอยู่หนึ่งบนพื้นผิวของตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ

(2) Line scan analysis เป็นการวิเคราะห์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ ซึ่งนิยมใช้ในกรณีหาของเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

(3) Mapping analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่างซึ่งภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นภาพแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนั้นๆ

2.12.4 เทคนิคการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม (Gas chromatography, GC) [ต้นกล้า, 2558]

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับแยกตัวอย่างที่เป็นสารผสมที่ระเหยได้โดยเปลี่ยนสารผสมให้เป็นไอที่อุณหภูมิหนึ่ง ไอที่เกิดขึ้นจะถูกนำเข้าสู่คอลัมน์โดยอาศัยการพาไปของเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) หรือ carrier gas ตาม flow rate ที่ต้องการ ภายในคอลัมน์บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่ในการแยก เรียกว่าเฟสคงที่ (stationary phase) สารผสมจะถูกแยกออกเป็นส่วนๆที่คอลัมน์นี้ ด้วยความแตกต่างของสมบัติทางเคมีโครงสร้างน้ำหนักโมเลกุล จุดเดือดสารที่แยกได้ผ่านออกไปสู่ส่วนตรวจวัด (detector) ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยังระบบประมวลผล (Data system) ซึ่งสามารถคำนวณและรายงานผลออกมาเป็นโครมาโทแกรม ให้ทราบถึงองค์ ประกอบหรือเทียบปริมาณของสารตัวอย่างได้กล่าวคือสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ

หลักการและส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

(1) Carrier gases หรือแก๊สพา มีหน้าที่นำแก๊สตัวอย่างจาก จุดฉีด (injection port) ผ่านเข้าสู่คอลัมน์และไปยัง detector แก๊สที่ใช้ร่วมกับเครื่อง GC เป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่ทำ ปฏิกิริยากับโมเลกุลของ สารตัวอย่าง เช่น แก๊สฮีเลียม ไฮโดรเจน หรือไนโตรเจน

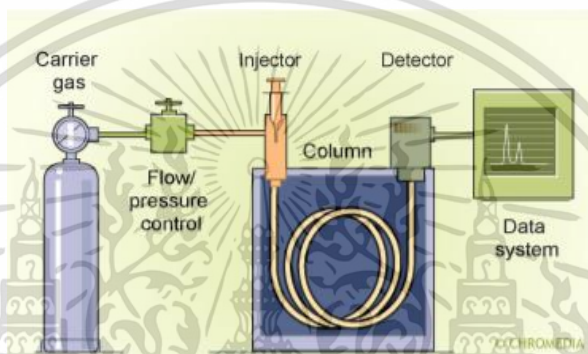
(2) Injector port เป็นส่วนที่ใช้ในการฉีดสารตัวอย่างเข้า คอลัมน์โดยทั่วไปส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างเข้าไป (inlet) มักจะมีตัวให้ความร้อน (heater) ติดตั้งอยู่ด้วย เพื่อให้สารตัวอย่างกลายเป็นไอ การเลือกใช้งานว่าจะใช้ inlet แบบใดนั้นขึ้นอยู่กับสารตัวอย่าง หากสารตัวอย่างเป็นแก๊สมักจะฉีดตัวอย่างเข้าไปด้วย gas sampling valve หากสารตัวอย่างเป็นของเหลวโดยมากจะใช้ micro syringe ฉีดสารตัวอย่างขึ้นมาตามปริมาตรที่ต้องการแล้วฉีดผ่าน silicone septum ที่ injection port ไปยังปลายของคอลัมน์

(3) Column เป็นส่วนที่ใช้แยกสารตัวอย่าง คอลัมน์ที่ใช้กัน ทั่วไปใน GC นั้นมีอยู่ 2 ประเภทคือ packed column และ capillary column การเลือกใช้คอลัมน์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ สารผสมไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน แต่สามารถพิจารณาเลือกจาก catalog ที่บริษัทผู้ผลิตคอลัมน์ออกมาจำหน่าย และค้นคว้าจากงานวิจัยในวารสารด้านโครมาโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อยู่ให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) Detector หรือส่วนตรวจวัด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดสารเชิงเดี่ยวที่ถูกแยกออกมาจากคอลัมน์แล้วส่งสัญญาณ ไฟฟ้าไปยังระบบประมวลผลสามารถจำแนกประเภทของส่วนตรวจวัดได้เป็นหลายประเภทตามคุณสมบัติการตรวจวัด โดยรูปแบบตรวจวัดที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง

(5) Data system หรือระบบประมวลผล เป็นส่วนที่ ประมวลผลและข้อมูลต่างๆ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งคำนวณ และรายงานผลเป็น retention time คือเวลาที่สารแต่ละชนิด ใช้ผ่านคอลัมน์ จากจุดเริ่มต้นถึงจุดสูงสุดของของพีคที่ได้จากโครมา โทแกรม retention time สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิง คุณภาพเพื่อระบุว่าเป็นสารชนิดใดเมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน นอกจากนี้ลักษณะ และขนาดของพีคที่ได้จากโครมาโทแกรมใช้ เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิง ปริมาณได้



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบหลักการทำงานของกล้องเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC)

2.12.5 เทคนิคการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) [อดิพล, 2557]

การวัดพื้นที่ผิวภายในวัสดุที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สอื่นที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จากไอโซเทอร์มของการดูดซับทางกายภาพหรือวิธี BET (BET ย่อมาจาก Brunauer- Emmet-Teller Method) ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว ซึ่งขึ้นอยู่กับ การดูดซับโดยจะหาจำนวนโมเลกุลที่ใช้เพื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้จากการดูดซับของ N_2

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad (1)$$

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาตรที่ถูกดูดซับกับความดันย่อยต่างๆและปริมาตรที่ถูกดูดซับแล้วเกิดการเป็นการดูดซับชั้นเดียวคือสมการของ BET แสดงในสมการที่ 1

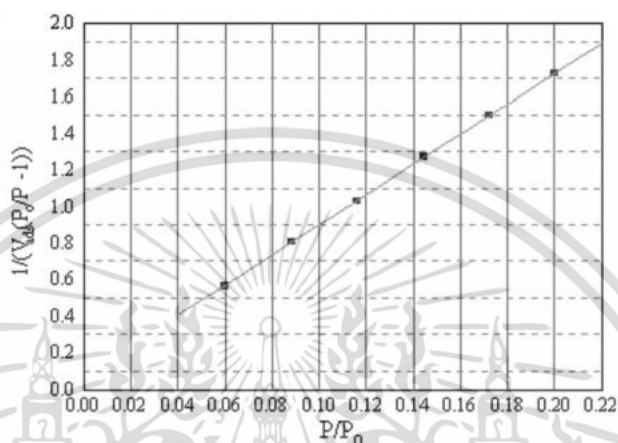
เมื่อ P คือ ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 P_0 คือ ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน ณ อุณหภูมิที่ศึกษา
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน P

V_m คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดการปกคลุมชั้นเดียว

C คือ ค่าคงที่

สมการนี้เขียนให้อยู่ในรูปของกราฟเส้นตรง $Y = a + bx$ เมื่อให้ X เป็น P/P_0 Y เป็น $P/V(P_0 - P)$, a คือจุดตัดแกน Y เป็น $1/V_m C$ และเทอม b ความชันเป็น $(C-1) / V_m C$ จากนั้นทำการเขียนกราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปเส้นตรงของสมการ BET ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.18 กราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปเส้นตรงของสมการ BET

จากสมการของ BET สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของสารได้โดยนำค่าปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของสารหรือค่า V_m ที่ได้สมการ 1 ไปคำนวณหาจำนวนโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้นโมเลกุลแล้วจึงนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้สมการดังนี้

$$S_{sp} = N_A \cdot a_{max} \cdot S_0 / W \quad (2)$$

โดยที่ S_{sp} คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (หน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัม), N_A คือ เลขอาโวกาโดร (6.02×10^{23}) (หน่วยเป็นโมเลกุลต่อกรัมโมล), a_{max} คือ จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้นโมเลกุล (เท่ากับ $V_m/22414$) S_0 คือ พื้นที่ผิวหน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ (1.62×10^{-20}) (ตารางเมตร) และ W คือน้ำหนักของสารหรือตัวดูดซับ (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 วิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.13.1 Synthesis of LPG from synthesis gas [Qianwen, 2543]

Qianwen Zhang และคณะได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) จากแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสม (hybrid catalyst) ที่ประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอลและซีโอไลต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ fixed bed ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในระบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสม เมทานอลเกิดจากแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์ จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นไดเมทิลอีเทอร์แล้วเปลี่ยนเป็นไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ที่องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสมมีผลอย่างมากต่อความว่องไวและความสามารถในการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา การกระจายผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนขึ้นอยู่กับลักษณะของซีโอไลต์ที่ใช้ความไวของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวเร่งการสังเคราะห์เมทานอลเป็นอย่างมาก ผลของการทำงานร่วมกันของตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ซีโอไลต์และเมทานอล ทำให้เกิดไฮโดรคาร์บอนที่ให้ผลผลิต ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสมซึ่งประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ของ USY และเมทานอล (Cu/ZnO) แสดงให้เห็นถึงการก่อตัวที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอน C3-C4 ถึงร้อยละ 75

2.13.2 Selective synthesis of LPG from synthesis gas [Kenji, 2547]

Kenji Asami และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสมที่ประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอล Cu-Zn และซีโอไลต์หลายชนิดที่ 523–623 K ภายใต้แรงดัน การรวมกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-Zn กับ USY หรือ β ซีโอไลต์ทำให้มีสมรรถนะการเร่งปฏิกิริยาสูงสำหรับการเกิด LPG สูงกว่า 70% ของการแปลง CO และการเลือก LPG ที่ 598 K และ 2.1 MPa

2.13.3 Direct synthesis of LPG from carbon dioxide over hybrid catalysts comprising modified methanol synthesis catalyst and β -type zeolite [Congming, 2557]

Congming Li และคณะได้ทำการศึกษาการเติมไฮโดรเจนของคาร์บอนไดออกไซด์เป็น C3 และ C4 พาราฟิน (LPG) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสมที่ประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-Zn ที่ดัดแปลงด้วย Zr กับ β ซีโอไลต์ที่ดัดแปลงด้วย Pd ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งอุณหภูมิของปฏิกิริยา ความดัน และอัตราส่วนของ H_2 ต่อ CO_2 จากการทดลอง ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสมแสดงความว่องไวที่เสถียรมากกว่า 100 ชั่วโมงและความสามารถในการจำเพาะสูงเป็นพิเศษของการสังเคราะห์แอลพีจี (โดยเฉพาะไอโซ-บิวเทน) แม้ในอุณหภูมิต่ำ (260 องศา

เซลเซียส) และแรงดันต่ำ (2 MPa) การแปลง CO_2 และผลผลิตของไฮโดรคาร์บอนถึง 25.2% และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13.3% ตามลำดับ ในขณะที่ยังคงความสามารถในการจำเพาะของ LPG และ CH₄ 75% และ 1% ตามลำดับ

2.13.4 The design of a CZ@H-β P catalyst with core shell structure and its application in LPG synthesis from syngas [Peng, 2561]

Peng Lu และคณะได้ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างเปลือกแกนหลักสำหรับการสังเคราะห์ LPG จากแก๊สสังเคราะห์ การสังเคราะห์เมทานอลอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเปลี่ยนจากแก๊สสังเคราะห์เป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวซึ่งเกิดจากการปรับปรุงความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา, ประเภทของซีโอไลต์, โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราส่วนน้ำหนักรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา และ อุณหภูมิของปฏิกิริยาในกระบวนการนี้มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะปฏิกิริยาของ CZ/β อัตราส่วน 4:1, ความดัน 3.0 เมกะปาสคาล, 40 มิลลิลิตรต่ออนาที และ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนไดออกไซด์ และ ร้อยละการคัดเลือกไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 61.8 และ 64.2 ตามลำดับ ค่าความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวสูงสุดที่ร้อยละ 70.2

2.13.5 Direct syngas conversion to liquefied petroleum gas: Importance of a multifunctional metal-zeolite interface [Peng, 2561]

Peng Lu และคณะได้ทำการศึกษาการสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบมัลติฟังก์ชันเพื่อเร่งปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยาต่อเนื่องกัน โดยอินเทอร์เฟซโลหะ-ซีโอไลต์ที่มาจากตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnAl@H-Beta เพื่อเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์เป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) อินเทอร์เฟซมัลติฟังก์ชันระหว่าง CuZnAl และ ซีโอไลต์ H-Beta ที่ประกอบด้วย Cu และกรดซีโอไลต์ โดยผ่านการสังเคราะห์เมทานอลผ่านแก๊สสังเคราะห์ อินเทอร์เฟซจะกระตุ้นการคายน้ำของเมทานอลไปยังโอเลฟินบนตำแหน่งที่เป็นกรดและไฮโดรจีนเนชันของโอเลฟินเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว C3-4 (LPG) ความสามารถในการคัดเลือก LPG ในไฮโดรคาร์บอนเหนือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้จะสูงถึง 77% พร้อมกับมีเทนที่มีค่าการเลือกเกิดเป็น C2 ที่ต่ำ (< 2.0%)

2.13.6 Mechanism and catalytic performance for direct dimethyl ether synthesis by CO₂ hydrogenation over CuZnZr/ferrierite hybrid catalyst [Qingtao, 2563]

Qingtao Sheng และคณะ ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnZr/ferrierite ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ Co-precipitation, Sol-Gel และ Grinding สำหรับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยา CO₂ hydrogenation จากผลการทดลองพบว่าวิธีที่ดีที่สุดในการเตรียม ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) เนื่องจากส่งผลต่อขนาดผลึกของ CuO ให้มีขนาดเล็กและการกระจายตัวของ Cu ดีขึ้น อุณหภูมิที่ใช้ในการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาดำกว่าอีกสองวิธี และ ยังทำให้การส่งผ่านเมทานอลไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือซีโอไลต์ดีอีกด้วย

ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดคือ 250 องศาเซลเซียส พบว่าการเตรียมตัวเร่งด้วยการตกตะกอน ร่วมได้ %selectivity ของ DME สูงสุด จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพบว่า %selectivity ของ DME ลดลง

2.13.7 Characterization of precursors of methanol synthesis catalysts, copper/zinc/ aluminum oxides, precipitated at different pHs and temperature [J.-L., 2538]

J.-L. Li and T.Inui ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการสังเคราะห์เมทานอล โดยใช้วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) ที่ pH และอุณหภูมิต่างๆ กัน จากนั้นนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, IR, BET, TPO และนำมาทำปฏิกิริยา การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ โดยมีอัตราส่วนโดยอะตอมของ Cu:Zn:Al เป็น 6:3:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ถูกเตรียมโดยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) ใช้สารละลายที่ทำหน้าที่ตกตะกอน คือ Na_2CO_3 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน ตอนที่ 1 ทำการทดลองหา pH ที่เหมาะสม ใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนร่วมและอุณหภูมิที่ทิ้งไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส โดย pH ที่ใช้ในการตกตะกอนร่วมคือ 5, 6, 7 และ 8 จากผลการทดลองพบว่า ตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนร่วมที่ $\text{pH} \leq 6$ เกิดการก่อตัวของ copper hydroxynitrate ส่วนตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนร่วมที่ $\text{pH} = 7$ เกิดการก่อตัวของ malachite ซึ่งเมื่อนำมาทำปฏิกิริยา พบว่าความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จาก $\text{pH} = 7$ ว่องไวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จาก $\text{pH} \leq 6$ และ ตอนที่ 2 ทำการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสม ใช้ $\text{pH} = 7$ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการตกตะกอนร่วมและอุณหภูมิที่ทิ้งไว้ คือ 30, 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า ตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนร่วมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่สุด ดังนั้น เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสำหรับการสังเคราะห์เมทานอลควรทำที่ $\text{pH} = 7$, $T = 70$ องศาเซลเซียส

2.13.8 Residual sodium effect on the catalytic activity of Cu/ ZnO/Al₂O₃, inmethanol synthesis from CO hydrogenation [Ki-Won, 2541]

Ki-Won Jun และคณะ ศึกษาผลของโซเดียมไอออนที่ตกค้างอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) หลังจากทำการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว พบว่า ผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ส่งผลให้การกระจายตัวของคอปเปอร์ (Cu-dispersion) ลดลง พื้นที่ผิวของคอปเปอร์ลดลงเช่นกัน นอกจากนี้หากมี NaNO_3 ตกค้างอยู่จะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเป็นเบสมากขึ้น ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเป็นกรดเกิดการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ได้แข็งแรงขึ้น ทำให้เมทานอลที่ได้จะลดลง จากการศึกษาพบว่า การล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จำนวน 10 ครั้ง จะสามารถกำจัดโซเดียม

ไอออนที่ตกค้างในตัวเร่งปฏิกิริยาได้หมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.9 Effect of Si/Al ratio of high-silica HZSM-5 catalysts on the prins condensation of isobutylene and formaldehyde to isoprene [Xue, 2562]

Xue Yu และคณะ ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่มีอัตราส่วน Si/Al ที่ต่างกัน มีการแสดงคุณสมบัติด้วย XRD, BET, NH₃-TPD, FT-IR สเปกตรัมของไพรีนที่ถูกดูดซับ ฯลฯ ผลของอัตราส่วน Si/Al ของ catalysts HZSM-5 ต่อการควบแน่นของไอโซบิวทิลีนและฟอร์มัลดีไฮด์ต่อไอโซพรีน ส่งผลให้กิจกรรมการเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความแรงของกรดโดยมีค่าลดลงตามอัตราส่วนของ Si/Al ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับให้เหมาะสมคือ HZSM-5 (600) โดยมีการแปลงไอโซบิวทิลีน 8.8% และการเลือก 90.2% เป็นไอโซพรีน ซึ่งบ่งชี้ว่าอัตราส่วน Si/Al ที่สูงขึ้นจะความเหมาะสมสำหรับการควบแน่นของไอโซบิวทิลีน และฟอร์มัลดีไฮด์ให้เป็นไอโซพรีน และอัตราส่วน Si/Al ที่ต่ำอาจนำไปสู่การก่อตัวของ by-products และการสะสมของ coke ซึ่งทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.13.10 การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃ จากฝาดึงกระปองอะลูมิเนียมที่ใช้แล้ว สำหรับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์ [ณัฐธีร์, 2564]

ศึกษาการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃ ที่ดัดแปลงโดยการใส่ฝาดึงกระปองอะลูมิเนียมใช้แล้วแทนอะลูมิเนียมไนเตรต โดยมีอัตราส่วนของตัวเร่งที่แตกต่างกันคือ 2:2:1 และ 6:3:1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่ง เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และวิธีการผสมแบบกายภาพ (Physical mixing) สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ สารตั้งต้นเป็นแก๊สสังเคราะห์ (H₂ : CO) อัตราส่วน 1:1 โดยมวล ความดัน 4 MPa อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ คือ คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ดัดแปลงด้วยฝาดึงกระปองอะลูมิเนียมที่ใช้แล้วผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยากรดคือซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่อัตราส่วน 6:3:1 เป็นตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด เนื่องจากมีขนาดผลึกเล็กที่สุดได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และร้อยละ ของความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์สูงถึง 47.63% และ 24.36% ตามลำดับ และ ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์คือ คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากสารเคมีผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยากรดคือซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่อัตราส่วน 2:2:1 เป็นตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์สูงถึง 42.64% และ 57.68% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์แก๊สซิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วย ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ($H_2:CO$) มีอัตราส่วน 2:1 โดยมีวัตถุประสงค์คือเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ $CuO-ZnO-Al_2O_3$ (CZA) ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ HZSM-5 ($KMnO_4$ -HZSM-5) ที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแตกต่างกัน โดยการผสมทางกายภาพ (physical mixing) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาในการเลือกเกิดเป็นแก๊สซิโตรเลียมเหลว

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ชุดเครื่องแก้ว (Pyrex)
2. เครื่องปั่นกวน (Stirrer) (NITRA, EURO-STD 01.439439)
3. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, Me-204)
4. โกร่งบดสาร (Mortar)
5. พีเอชมิเตอร์ (pH meter) (Denver Instrument, UB-10)
6. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) (Memmert Model WNB Basic)
7. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Ultrafiltration) (Millipore, WP6122050)
8. กระดาษกรอง เบอร์ 4 (Whatman, Cat no 1442 090)
9. เครื่องปั่นกวน (Stirrer) (NITRA, EURO-STD 01.439439)
10. โถดูดความชื้น (Desiccator)
11. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
12. เครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน (Centrifuge) (HERAEUS MAGAFUGE 8R CENTRIFUGE)
13. เตาอบ (Oven) (MEMMERT, Modell 100-800)
14. เตาเผา (Furnace) (As One 1-5921-01, RP-001)
15. ตะแกรงร่อนขนาดมาตรฐาน (Sieve) (Misumi Vona, 5-3294-33)
16. ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed reactor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารเคมีและแก๊ส

1. คอปเปอร์ไนเตรทไตรไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส
2. ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ความบริสุทธิ์ 98.0 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie PVT,Ltd. ประเทศอินเดีย
3. อะลูมิเนียมไนเตรทโนนไฮเดรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ความบริสุทธิ์ 98.0 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie PVT,Ltd. ประเทศอินเดีย
4. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัท Fisher scientific. ประเทศอังกฤษ
5. ซีโอไลต์ HZSM-5 (Zeolite HZSM-5)
6. น้ำปราศจากไอออน (Deionization water)
7. ฉนวนใยแก้ว (Glass wool) เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัท Chem-Supply Pty,Ltd ประเทศออสเตรเลีย
8. ทรายแก้ว (Quartz sand) เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัท Wako Pure Chemical Industries,Ltd. ประเทศญี่ปุ่น
9. แก๊สไนโตรเจน (N_2) ความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Praxair (Thailand), Ltd. ประเทศไทย
10. แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ความบริสุทธิ์ 5.00 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สไนโตรเจน (N_2) บริษัท Praxair (Thailand), Ltd. ประเทศไทย
11. แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) อัตราส่วน $\text{H}_2 : \text{CO}$ เท่ากับ 2:1 โดยโมล บริษัท Thai-Japan Gas Co.,Ltd. ประเทศไทย
12. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ความบริสุทธิ์ 99.0 เปอร์เซ็นต์ เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัท Thermo Fisher Scientific ประเทศออสเตรเลีย

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. เครื่องวิเคราะห์เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) Varian รุ่น CP-3800
2. เครื่องวิเคราะห์โครงผลึกและอสัณฐาน (X-ray Diffractometer, XRD) Shimadzu รุ่น XRD-6100
3. เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยาระดับจุลภาค (Scanning Electron Microscope, SEM)

เอกสารนี้ ZEISS รุ่น EVO MA 10 ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

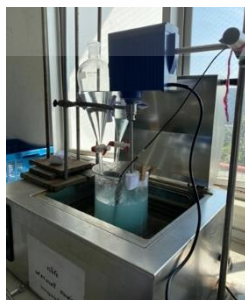
4. เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและองค์ประกอบ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)
5. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคบรูว์ เอ็มเมท เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller, BET)

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์

สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ใช้อัตราส่วน $\text{CuO}:\text{ZnO}:\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็น 2:2:1 โดยโมล โดยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method) กับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ดังนี้

1. ชั่งคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต 1.8362 กรัม (2%โดยโมล) ลงในปิ๊กเกอร์ขนาด 50 มล.
2. ชั่งซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 2.2607 กรัม (2%โดยโมล) ลงในปิ๊กเกอร์ขนาด 50 มล.
3. ชั่งอะลูมิเนียมไนเตรตโนนะไฮเดรต 0.7127 กรัม (1%โดยโมล) ลงในปิ๊กเกอร์ขนาด 50 มล.
4. ชั่งโซเดียมคาร์บอเนต 2.0136 กรัม ลงในปิ๊กเกอร์ขนาด 50 มล.
5. ละลายคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และอะลูมิเนียมไนเตรตโนนะไฮเดรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 500 มล. จากนั้นนำไปใส่กรวยแยกสารเพื่อเตรียมการตกตะกอนร่วม
6. ละลายโซเดียมคาร์บอเนตด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร
7. นำสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตใส่กรวยแยกสาร จากนั้นทำการติดตั้งเครื่องมือในการตกตะกอนร่วมดัง **รูปที่ 3.1** ในสภาวะเป็นกลาง ($\text{pH}=7$) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ปั่นกวนด้วยอัตราเร็ว 600 รอบต่ออนาที เมื่อสารละลายโลหะหมดให้ทำการปั่นกวนต่อไปเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง **รูปที่ 3.1** การติดตั้งเครื่องมือในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาครั้งที่มีการนำไปใช้

8. หลังจากปั่นจนเสร็จทำการพักตะกอนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
9. เมื่อครบกำหนดให้ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.2 ทำซ้ำประมาณ 2-3 ครั้ง จะได้ตะกอนสีฟ้าของคอปเปอร์คาร์บอเนตซิงค์คาร์บอเนตอะลูมิเนียมคาร์บอเนต ($\text{CuCO}_3\text{ZnCO}_3\text{Al}_2(\text{CO}_3)_3$)



รูปที่ 3.2 การล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน

10. อบตะกอนที่ได้ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในตู้อบลมร้อน จะได้ตะกอนดัง รูปที่ 3.3(ก)
11. นำตะกอนที่อบให้แห้งแล้วไปเผาในเตาเผาความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนสารประกอบคาร์บอเนตให้เป็นสารประกอบออกไซด์ของคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3$) ดัง รูปที่ 3.3(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) ตะกอนของ $\text{CuCO}_3\text{ZnCO}_3\text{Al}_2(\text{CO}_3)_3$

(ข) ตะกอนของ $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5

3.4.2.1 กลุ่มซุบสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ต่อปริมาตรลงบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5

1. เตรียมตัวรองรับโดยนำซีโอไลต์ HZSM-5 มาบดให้มีขนาดเท่ากัน
2. นำซีโอไลต์ HZSM-5 ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำออกจากรูพรุนของซีโอไลต์
3. ชั่งโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3.5000 กรัม และละลายด้วยน้ำปริมาตร 35 มิลลิลิตร
4. นำซีโอไลต์ HZSM-5 ที่อบแล้วมาใส่ลงในชามระเหย กลุ่มซุบสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตรลงบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5 โดยค่อย ๆ หยดสารละลายลงไปจนหมด
5. นำไปปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.4.2.2 กลุ่มซุบสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยมวล ต่อปริมาตรลงบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5

1. เตรียมตัวรองรับโดยนำซีโอไลต์ HZSM-5 มาบดให้มีขนาดเท่ากัน
2. นำซีโอไลต์ HZSM-5 ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำออกจากรูพรุนของซีโอไลต์
3. ชั่งโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 7.0000 กรัม และละลายด้วยน้ำปริมาตร 35 มิลลิลิตร
4. นำซีโอไลต์ HZSM-5 ที่อบแล้วมาใส่ลงในชามระเหย กลุ่มซุบสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตรลงบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5 โดยค่อย ๆ หยดสารละลายลงไปจนหมด
5. นำไปปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.4.2.3 กลุ่มซุบสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล ต่อปริมาตรลงบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5

1. เตรียมตัวรองรับโดยนำซีโอไลต์ HZSM-5 มาบดให้มีขนาดเท่ากัน
2. นำซีโอไลต์ HZSM-5 ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำออกจากรูพรุนของซีโอไลต์
3. ชั่งโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 10.5000 กรัม และละลายด้วยน้ำปริมาตร 35 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำซีโอไลต์ HZSM-5 ที่อบแล้วมาใส่ลงในขามระเหย กลุ่มซุบสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตรลงบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5 โดยค่อย ๆ หยดสารละลายลงไปจนหมด
5. นำไปปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
7. เผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3.4.3 การเผาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5

นำตะกอนที่อบแห้งแล้ว จากข้อที่ 3.4.2 ไปเผาในเตาเผาความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะได้ตะกอนสีน้ำตาลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5

3.4.4 การอัดเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตะกอนของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีความเข้มข้น 10, 20, 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตรบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ผ่านการเผาแล้วมาอัดเม็ดที่แรงดัน 2000-3000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และคัดแยกขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดประมาณ 500-850 ไมโครเมตร โดยจะมีทั้งหมด 5 ตัวแปรในการอัดเม็ด

3.4.4.1 ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ไม่ผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

3.4.4.2 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตรบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ผ่านการเผา

3.4.4.3 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตรบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ผ่านการเผา

3.4.4.4 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตรบนตัวรองรับซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ผ่านการเผา

3.4.4.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA)

3.4.5 การสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว

การสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์โดยตรงมีปฏิกิริยาดังสมการเคมี ดังนี้



มีขั้นตอนการสังเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. นำตะกอนของคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผสมกับซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ผ่านการเผา ที่อัดเม็ดแล้วมาผสมกันทางกายภาพ (physical) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น (mixing) ตามอัตราส่วน 2:1 (0.3300:0.1700 กรัม) โดยน้ำหนัก ประมาณ 0.5000 กรัม

2. นำตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3$ / Zeolite HZSM-5 ผสมเข้ากับ Quartz sand 0.5000 กรัม โดยวิธีทางกายภาพ เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยากระจายตัวกันได้ดี จะได้น้ำหนักรวมประมาณ 1.0000 กรัม
3. บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมแล้วลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ดังรูปที่ 3.4 โดยใช้ฉนวนใยแก้วรองรับด้านล่างของตัวเร่งปฏิกิริยาและปิดเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นนำเข้าเตาเผา

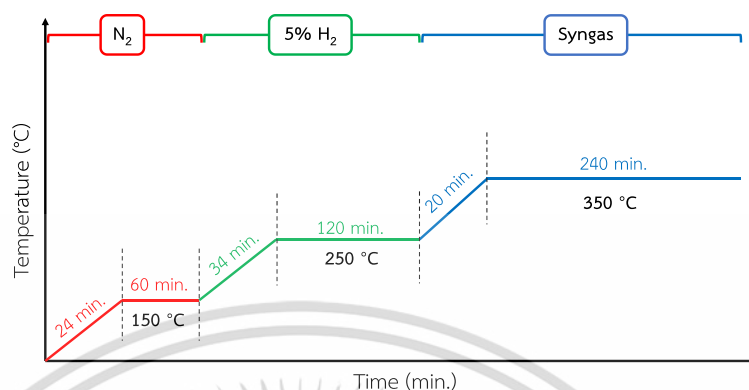


รูปที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed-bed Reactor)

4. เมื่อเปิดเครื่องปฏิกรณ์แล้ว ทำการป้อนแก๊ส เริ่มจากป้อนแก๊สไนโตรเจน (N_2) เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ โดยเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 24 นาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ให้คงอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. เมื่อใกล้ครบกำหนดเวลา ให้เปลี่ยนจากแก๊สไนโตรเจน (N_2) เป็นแก๊สไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ (5% H_2) เพื่อทำการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้คอปเปอร์ออกไซด์เปลี่ยนเป็นคอปเปอร์ โดยเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 34 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสให้คงอุณหภูมิไว้ 2 ชั่วโมง
6. ก่อนเริ่มการทำปฏิกิริยา เก็บตัวอย่างแก๊สสังเคราะห์ ($\text{H}_2:\text{CO} = 2:1$) เพื่อนำไปตรวจวัดด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สผสม
7. เริ่มทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์ปิโตรเลียมเหลว (LPG) โดยเปลี่ยนจากแก๊สไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ (5% H_2) เป็นแก๊สสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง $\text{H}_2:\text{CO}$ เป็น 2:1 ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ควบคุมความดันที่ 40 บาร์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 350 องศาเซลเซียส และให้คงอุณหภูมิไว้ 4 ชั่วโมง
8. เก็บตัวอย่างแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนครบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทำซ้ำข้อ (1) – (7) โดยเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น 10, 20, 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลบนตัวรองรับซีโอไลต์ H-ZSM-5



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจนเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CuOZnOAl₂O₃/HZSM-5

3.5 การวิเคราะห์การแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม (Gas Chromatography, GC)

เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคสำหรับการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสมที่ระเหยได้ โดยเปลี่ยนสารผสมให้กลายเป็นไอที่อุณหภูมิหนึ่ง และจะถูกนำเข้าคอลัมน์โดยอาศัยแก๊สตัวพา (carrier gas) เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar₂) ซึ่งเป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ในแต่ละองค์ประกอบของสารผสมจะแยกกันด้วยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่บนเฟสคงที่ (stationary phase) ที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและสมบัติทางเคมีของสารผสม เมื่อสารแต่ละชนิดถูกแยกออกเป็นส่วน ๆ และจะเข้าสู่ตัวรับสัญญาณ (Detector) จะแสดงผลออกมาเป็นพีคต่าง ๆ ที่จอแสดงผลจากนั้นนำผลมาวิเคราะห์

3.6 วิธีการสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

3.6.1 วิเคราะห์สัญญาณวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงในการตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดา เนื่องจากความยาวของคลื่นลำแสงอนุภาคอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถให้ประสิทธิภาพของกำลังขยายและการทราบรายละเอียดดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง สามารถแยกรายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 10 อังสตรอม โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาละ 1 กรัมส่งตรวจวิเคราะห์ที่กำลังขยาย 5,000 10,000 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 20,000 เท่า ในโหมด Hi-vacuum ระยะห่างจากวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ 15 mm เคลือบด้วยทองคำ 60 วินาที

3.6.2 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ชนิดการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิชาระบบโครงสร้างผลึก (crystallography) เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพ โดยทฤษฎีพื้นฐานของ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์ โดยทำการเตรียมตัวอย่างผงปฏิกิริยาละ 1 กรัมส่งตรวจวิเคราะห์ โดยเริ่มที่ 10 - 80 องศา

3.6.3 เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS)

หลักการของ EDS เมื่อตัวอย่างที่ต้องการศึกษาถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอนทำให้สามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ด้วยการผลึกให้อิเล็กตรอนของตัวอย่างให้หลุดออกจากอะตอม ดังนั้นเพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพ อิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นถัดไปจะลงเข้ามาแทนที่ และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ซึ่งเรียกรังสีเอ็กซ์แบบแคแบริกเทอร์สติก (Characteristic X-ray) โดยพลังงานของรังสีเอ็กซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ จากนั้นเมื่อรังสีเอ็กซ์เข้าสู่หัววัดชนิด Silicon drift detectors (SSD) หัววัดจะสร้างสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบและจะนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์หาความสูงของสัญญาณส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์ โดยทำการเตรียมตัวอย่างผงปฏิกิริยาละ 1 กรัมส่งตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพเชิงปริมาณและ mapping line scan

3.6.4 เทคนิคการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคบรูน่าว เอ็มเมท เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller, BET)

พื้นที่ผิวเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาวัสดุ โดยการหาปริมาตรพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัสดุได้หลายวิธี ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือวิธีการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิววัสดุ ซึ่งถูกศึกษาโดย บรูน่าว เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ทั้งนี้เทคนิคดังกล่าวถูกเรียกร้อยกว่าเทคนิค BET

โดยทำการเตรียมตัวอย่างผงปฏิกิริยาละ 1.00 กรัม ส่งตรวจวิเคราะห์ specific surface area adsorption isotherm desorption isotherm pore size distribution and pore volume เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการรายงานผล

โครงการพิเศษนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (Zeolite HZSM-5) ที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$, CZA) โดยการผสมกันทางกายภาพ (Physical mixing) และ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยการผสมกันทางกายภาพ เพื่อศึกษาตัวแปรที่ดีที่สุด

ในบทนี้ได้แสดงถึงผลของการวิเคราะห์แยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่เป็นสารผสมด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) เป็นการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันที่จะมีผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น ค่าการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ รวมถึงค่าร้อยละผลผลิตที่ได้สำหรับการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว

4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ HZSM-5 แตกต่างกันผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA)

4.1.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett (BET) [ลักษณะ, 2563 ; เน้นชวีย์, 2563]

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) และ ซีโอไลต์ HZSM-5

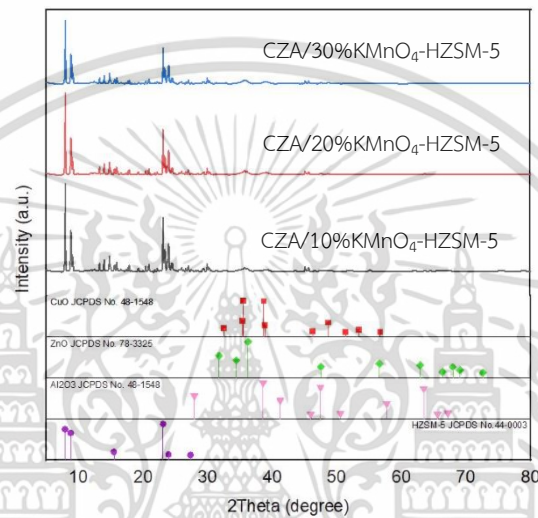
Catalysts	Surface area (m^2/g)	Pore volume (cm^3/g)	Pore size (A°)
CZA	174.45	0.58	128.10
HZSM-5	376.00	0.23	240.90
CZA/HZSM-5	297.80	0.59	124.70

จากตารางที่ 4.1 การทดสอบคุณลักษณะพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ซิงค์ออกไซด์ (CZA) มีพื้นที่ผิว $174.45 \text{ (m}^2/\text{g)}$ ปริมาตรรูพรุน $0.58 \text{ (cm}^3/\text{g)}$ และขนาดรูพรุน $128.10 \text{ (A}^\circ)$ แสดงให้เห็นว่ารูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) มีขนาดเล็กกว่ารูพรุน

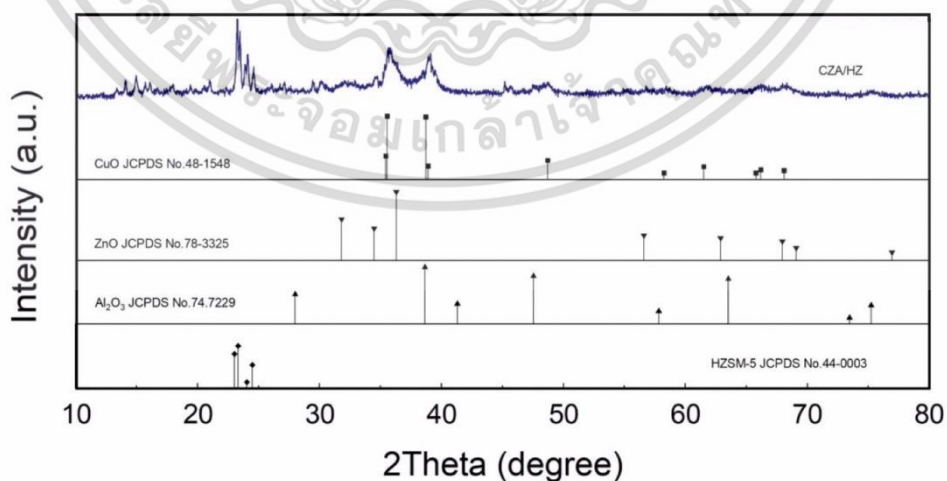
ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ทำให้สามารถเข้าไปกระจายตัวภายในรูพรุนของ HZSM-5 ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น

4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอัญฐาน (XRD)

การตรวจวิเคราะห์รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างข้อมูลที่ได้รับสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ ทั้งยังสามารถใช้ในการหาขนาดและความเป็นผลึกจากสมการ Scherr's ได้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง CZA/10%KMnO₄-HZSM-5 , CZA/20%KMnO₄-HZSM-5 และ CZA/30%KMnO₄-HZSM-5 เทียบกับกราฟแสดงโครงสร้างผลึกของสารมาตรฐาน [ชนิกานต์, 2565]



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง CZA/HZSM-5 เทียบกับกราฟแสดง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 โครงสร้างผลึกของสารมาตรฐาน [ลักชีกา, 2563]
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 เมื่อนำตั้งเร่งปฏิกิริยาทั้ง 4 แบบ ไปทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 พบพีคของ CuO ที่มุม 2θ เท่ากับ 32.52° และ 38.90° ในระนาบ (11-1) และ (200) ตามลำดับ พบพีค ZnO ที่มุม 2θ เท่ากับ 30.18° 32.14° และ 35.82° ในระนาบ (100) (200) และ (20-2) ตามลำดับ พบพีค Al_2O_3 ที่มุม 2θ เท่ากับ 39.00° 45.18° และ 61.68° ในระนาบ (104) (006) และ (116) ตามลำดับ และพบพีค HZSM-5 ที่มุม 2θ เท่ากับ 15.37° 23.08° และ 24.05° ในระนาบ (-311) (051) และ (520) ตามลำดับ

ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO₄-HZSM-5 พบพีคของ CuO ที่มุม 2θ เท่ากับ 35.60° และ 38.95° ในระนาบ (11-1) และ (200) ตามลำดับ พบพีค ZnO ที่มุม 2θ เท่ากับ 30.17° 36.10° และ 45.59° ในระนาบ (100) (101) และ (102) ตามลำดับ พบพีค Al_2O_3 ที่มุม 2θ เท่ากับ 26.98° 39.08° และ 45.57° ในระนาบ (012) (104) และ (006) ตามลำดับ และพบพีค HZSM-5 ที่มุม 2θ เท่ากับ 7.93° 14.76° และ 23.04° ในระนาบ (-101) (031) และ (051) ตามลำดับ

ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO₄-HZSM-5 พบพีคของ CuO ที่มุม 2θ เท่ากับ 35.84° และ 38.91° ในระนาบ (11-1) และ (200) ตามลำดับ พบพีค ZnO ที่มุม 2θ เท่ากับ 30.31° 36.03° และ 45.57° ในระนาบ (100) (101) และ (102) ตามลำดับ พบพีค Al_2O_3 ที่มุม 2θ เท่ากับ 26.95° 39.04° และ 45.59° ในระนาบ (012) (104) และ (006) ตามลำดับ และพบพีค HZSM-5 ที่มุม 2θ เท่ากับ 7.90° 14.73° และ 23.04° ในระนาบ (-101) (031) และ (051) ตามลำดับ

ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO₄-HZSM-5 พบพีคของ CuO ที่มุม 2θ เท่ากับ 35.72° และ 39.02° ในระนาบ (11-1) และ (200) ตามลำดับ พบพีค ZnO ที่มุม 2θ เท่ากับ 30.18° 35.86° และ 45.56° ในระนาบ (100) (101) และ (102) ตามลำดับ พบพีค Al_2O_3 ที่มุม 2θ เท่ากับ 26.97° 39.06° และ 45.52° ในระนาบ (012) (104) และ (006) ตามลำดับ และพบพีค HZSM-5 ที่มุม 2θ เท่ากับ 7.91° 14.79° และ 23.07° ในระนาบ (-101) (031) และ (051) ตามลำดับ

เมื่อนำกราฟของสารตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน CuO (JCPDS no. 00-048-1548), ZnO (JCPDS no. 01-078-3325), Al_2O_3 (JCPDS no. 01-074-7229) และ HZSM-5 (JCPDS no. 44-0003) พบว่าพีคของสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานส่วนใหญ่มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสารตัวอย่างมีสารข้างต้นเป็นองค์ประกอบจริง และสามารถหาขนาดผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) คอปเปอร์ (Cu⁰) และค่าการกระจายตัว ตามสมการของ Scherrer (Scherr's equation) โดยคำนวณองศาเลี้ยวเบน (2Theta) ของคอปเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงขนาดผลึกคอปเปอร์ออกไซด์ คอปเปอร์และการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA, CZA/HZSM-5, CZA/10%KMnO₄-HZSM-5, CZA/20%KMnO₄-HZSM-5 และ CZA/30%KMnO₄-HZSM-5 โดยใช้สมการของ ของ Scherrer (Scherr's equation)

Catalyst	Particle diameter (nm.)		Dispersion (%)	References
	d (CuO)	d (Cu ⁰)		
CZA	6.30	-	-	[ฉันทชัย, 2563]
CZA/HZSM-5	10.90	8.18	11.74	[ลักขิกา, 2563]
CZA/10%KMnO ₄ -HZSM-5	45.60	34.20	2.81	[ชนนิกันต์, 2565]
CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5	37.20	27.90	3.44	
CZA/30%KMnO ₄ -HZSM-5	42.00	31.50	3.05	

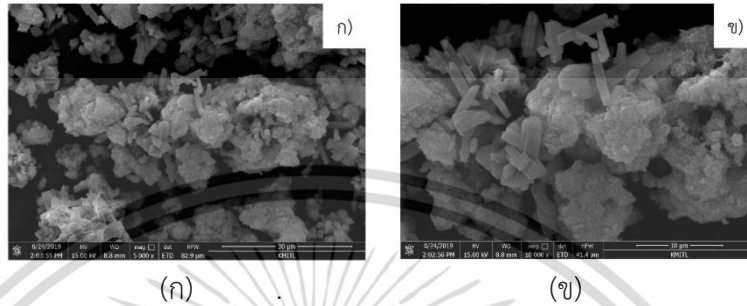
จากตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดผลึกคอปเปอร์ออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละตัวมีขนาดต่างกัน จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CZA มีขนาดผลึกของ CuO เล็กที่สุด เท่ากับ 6.30 นาโนเมตร ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 มีขนาดผลึกของคอปเปอร์ (Cu⁰) เท่ากับ 8.18 นาโนเมตร โดยที่ CZA/10%KMnO₄-HZSM-5 มีขนาดผลึกเท่ากับ 34.20 นาโนเมตร CZA/20%KMnO₄-HZSM-5 มีขนาดผลึกเท่ากับ 27.90 นาโนเมตร CZA/30%KMnO₄-HZSM-5 มีขนาดผลึกเท่ากับ 31.50 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO₄) จะมีขนาดผลึกของคอปเปอร์ (Cu⁰) และ คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ที่ใหญ่ขึ้น และการกระจายตัวที่น้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 4 ชนิดข้างต้น จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 มีขนาดเล็กที่สุด แต่เนื่องจากข้อมูลนี้เป็นข้อมูลของงานวิจัยที่นำมาอ้างอิง อาจทำการทดลองในสภาวะแตกต่างกัน เป็นผลทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้อย่างชัดเจน เป็นเพียงแนวโน้มของขนาดผลึกและการกระจายตัวเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค (SEM)

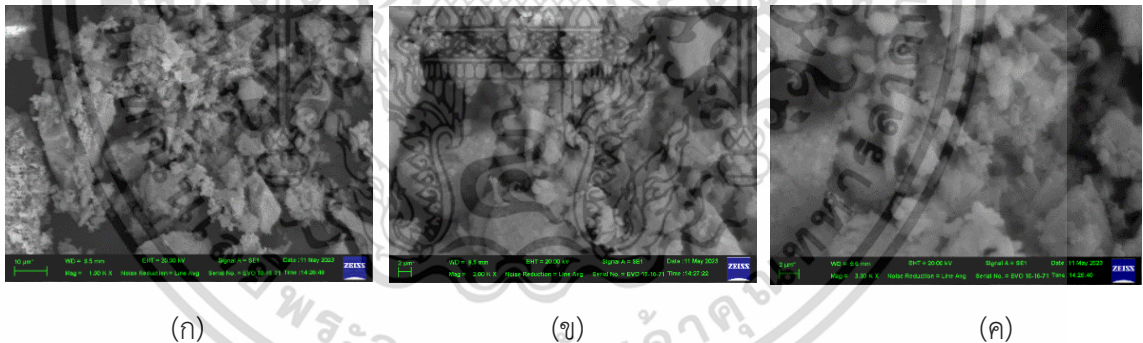
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของสารตัวอย่างเพื่อให้เห็นลักษณะพื้นผิว ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพ 3 มิติที่มีสีขาวดำด้วยกำลังขยายต่างๆ



รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ CZA/HZSM-5

(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

จาก รูปที่ 4.3 พบว่าสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 มีลักษณะของผลึก CZA ที่รวมตัวกันเป็นก้อนผสมอยู่กับ HZSM-5 ที่มีลักษณะเป็นแท่ง ซึ่งมีหลายขนาดและมีความกระจัดกระจาย [ฉันทภักดิ์, 2563]

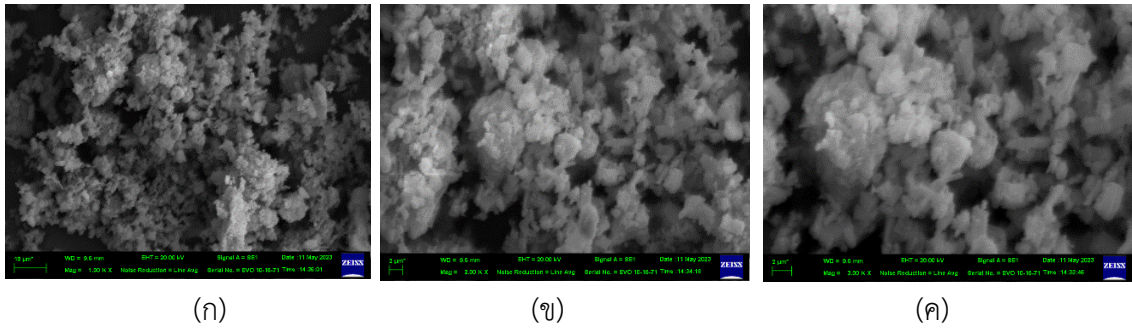


รูปที่ 4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10% KMnO_4 -HZSM-5

(ก) กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) กำลังขยาย 2000 เท่า (ค) กำลังขยาย 3000 เท่า

จาก รูปที่ 4.4 พบว่าสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10% KMnO_4 -HZSM-5 มีลักษณะของผลึกมีรูปร่างไม่แน่นอน มีหลายขนาด จัดเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบ และรวมตัวกันเป็นก้อน [ชนนิกานต์, 2565]

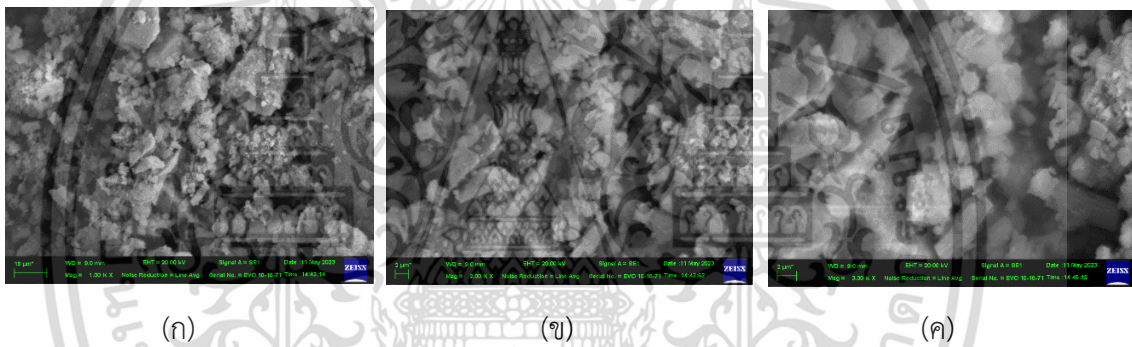
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20% KMnO_4 -HZSM-5

(ก) กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) กำลังขยาย 2000 เท่า (ค) กำลังขยาย 3000 เท่า

จาก รูปที่ 4.5 พบว่าสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20% KMnO_4 -HZSM-5 มีลักษณะของผลึกมีขนาดเล็กที่มีหลายขนาด มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีการกระจายตัวที่จัดเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบ และรวมตัวกันเป็นก้อน [ชนนิกานต์,2565]



รูปที่ 4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30% KMnO_4 -HZSM-5

(ก) กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) กำลังขยาย 2000 เท่า (ค) กำลังขยาย 3000 เท่า

จาก รูปที่ 4.6 พบว่าสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30% KMnO_4 -HZSM-5 มีลักษณะของผลึกมีรูปร่างไม่แน่นอน มีหลายขนาด จัดเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบและเกาะกลุ่มกันหนาแน่น [ชนนิกานต์,2565]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (EDS)

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา

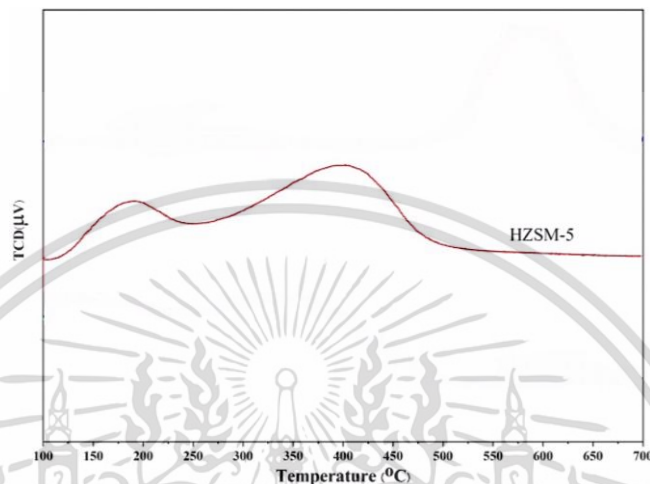
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ธาตุ	น้ำหนักจากการ ทดลอง (wt%)	น้ำหนักทางทฤษฎี (wt%)	
CZA/HZSM-5	Cu	58.23	Cu	47.93
	Zn	28.26		
	Al	1.84		
CZA/10%KMnO ₄ -HZSM-5	Cu	38.68	Cu	47.93
	Zn	18.55		
	Al	1.32		
	K	31.85		
	Mn	0.72		
	O	1.07		
CZA/20%KMnO ₄ -HZSM-5	Cu	38.08	Zn	24.10
	Zn	21.68		
	Al	1.57		
	K	37.27		
	Mn	0.54		
	O	0.56		
CZA/30%KMnO ₄ -HZSM-5	Cu	37.34	Al	2.65
	Zn	18.52		
	Al	1.08		
	K	35.03		
	Mn	1.40		
	O	1.07		

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) มาเปรียบเทียบกับค่าคำนวณอัตราส่วนทางทฤษฎี พบว่า มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีอัตราส่วนใกล้เคียงกับทฤษฎี [ชนนิกานต์,2565]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 การวิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา (NH₃-TPD) [ฉันทชัย, 2563]

การตรวจวิเคราะห์ในการวัดปริมาณความแรงของตำแหน่งความเป็นกรดบนพื้นที่ผิวของแข็งบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยากรดทำหน้าที่ช่วยในการเกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำออกจากโมเลกุลของเมทานอล นั่นคือซีไอโอสชนิด HZSM-5 แสดงดังรูปที่ 4.7 [ฉันทชัย, 2563]



รูปที่ 4.7 การคายซับของแอมโมเนียของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเทคนิคการคายซับของแอมโมเนีย (NH₃-TPD) [ฉันทชัย, 2563]

Catalysts	Acidity (mmol NH ₃ /g cat.)			
	Weak to moderate	Strong	Weak/Strong	Total
HZSM-5	0.264	0.831	0.318	1.095

จากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acidity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในการปฏิกิริยาการขจัดน้ำจากเมทานอล (Methanol Dehydration) จากการคายซับของแอมโมเนียในช่วงอุณหภูมิ 100-700 องศาเซลเซียส พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีค่าความแรงของกรดต่ำถึงกลางอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 100-450 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรดรวม 1.095 mmol NH₃/gcat มีค่าความแรงกรดต่ำถึงกลาง เท่ากับ 0.264 mmolNH₃/gcat และค่าความแรงกรดสูง เท่ากับ 0.831 mmolNH₃/gcat ซึ่งบ่งบอกได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีค่าความแรงของกรดบนพื้นที่ผิวสูงส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์ต่ำและจะเกิดผลิตภัณฑ์รองหรือจำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ง่าย ได้แก่ C₁, C₂, C₃, n-C₄, i-C₄, n-C₅ และ i-C₅

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ HZSM-5 แตกต่างกันผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA)

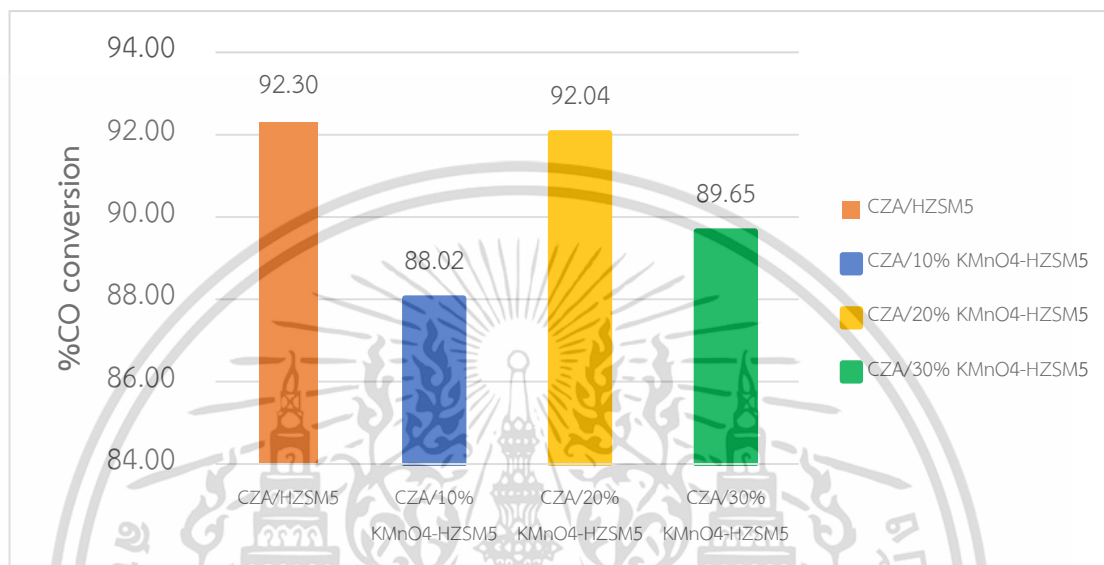
จากการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแตกต่างกัน ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) โดยผสมทางกายภาพ ในการสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจนเหลวจากแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor) จะสามารถบรรจุสารได้ 1 กรัม โดยจะแบ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม และ quartz sand 0.5000 กรัม ก่อนทำปฏิกิริยาต้องทำการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่แก๊สที่ไม่จำเป็นออกจากระบบและทำให้ระบบแห้ง จากนั้นทำการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนให้คอปเปอร์ออกไซด์เป็นคอปเปอร์ (0) ด้วยแก๊สไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ($5\% \text{H}_2$) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เริ่มทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโดรเจนเหลวโดยใช้แก๊สสังเคราะห์อัตราส่วนระหว่าง $\text{H}_2:\text{CO}$ เป็น 2:1 ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงควบคุมอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันที่ 40 บาร์ และผลิตภัณฑ์จะถูกเก็บทุก ๆ 1 ชั่วโมงและนำมาวิเคราะห์แยกผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์แยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา จะวิเคราะห์หาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด และร้อยละผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) โดยการผสมกันทางกายภาพ (Physical mixing) ซึ่งจะถูกรวบรวมด้วยเครื่อง Offline Gas Chromatography รุ่น CP-3800 ยี่ห้อ VARIAN โดยใช้คอลัมน์ CP-7538 ต่อกับตัวรับสัญญาณ Thermal Conductivity Detector (TCD) เพื่อวิเคราะห์แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สอาร์กอน (Ar) และคอลัมน์ HP-PLOT/Q จะต่อกับ Flame Ionization Detector (FID) เพื่อวิเคราะห์หาสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ในไฮโดรเจนและอากาศ ได้แก่ เมทานอล ไดมethylอีเทอร์ ไฮโดรคาร์บอน (มีเทน โพรเพน บิวเทน) และแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion)

การศึกษาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นค่าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงจากสารตั้งต้น คือแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ไปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยเปรียบเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยาโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography ใช้ตัวรับสัญญาณ Thermal Conductivity Detector (TCD) และ Flame Ionization Detector (FID)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO₄-HZSM-5, CZA/20% KMnO₄-HZSM-5, CZA/30% KMnO₄-HZSM-5

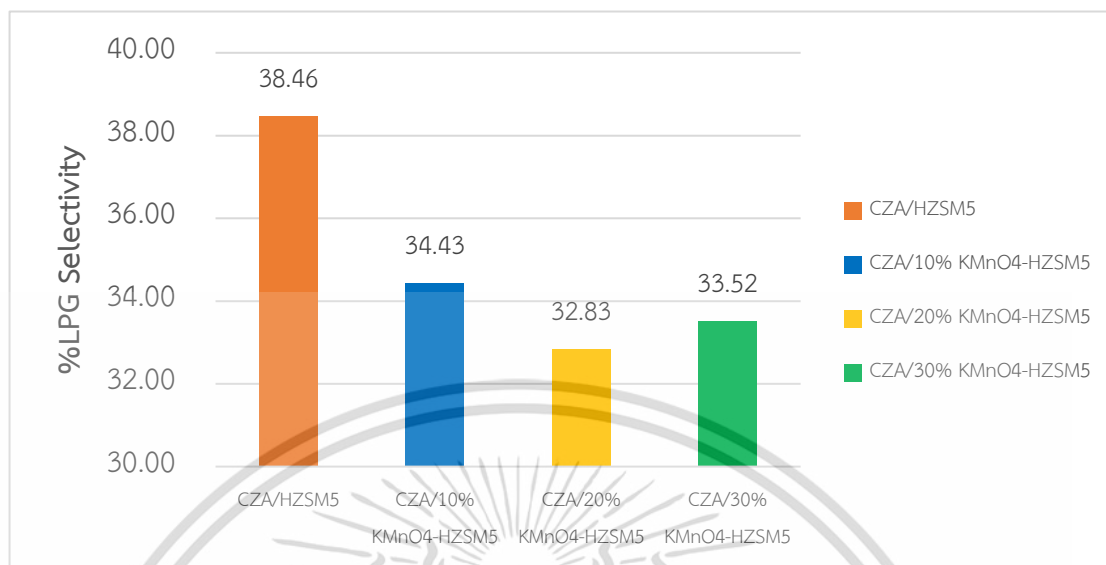
จากรูปที่ 4.8 พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 มีค่าสูงสุทธ้อยู่ที่ 92.30 เนื่องจาก ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ HZSM-5 (CZA/HZSM-5) มีขนาดของผลึก CuO เล็กที่สุด ทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามากที่สุด จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่นๆ รองลงมาเป็น CZA/20% KMnO₄-HZSM-5 มีค่าร้อยละ 92.04 , CZA/30% KMnO₄-HZSM-5 มีค่าร้อยละ 89.65 และ CZA/10% KMnO₄-HZSM-5 มีค่าร้อยละ 88.02 ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4.2.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity)

ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด เป็นค่าที่แสดงถึงร้อยละของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้ทั้งผลิตภัณฑ์หลัก คือ แก๊สปิโตรเลียมเหลว และผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน ไทเมทิล อีเทอร์ เมทานอล และคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.1 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG Selectivity)

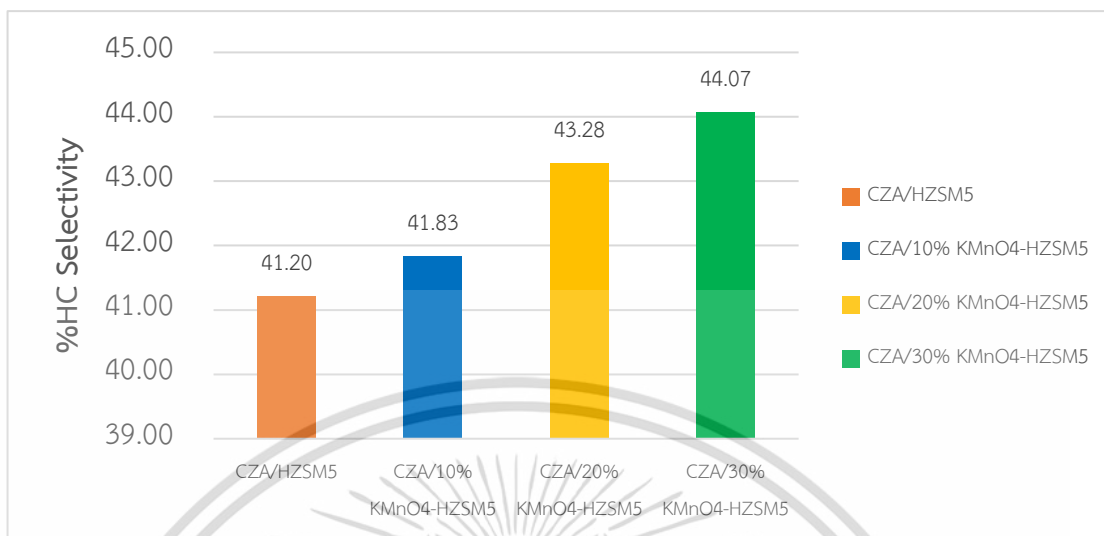


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO₄-HZSM-5, CZA/20% KMnO₄-HZSM-5, CZA/30% KMnO₄-HZSM-5

จากรูปที่ 4.9 พบว่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่นๆ โดยมีค่าร้อยละ 38.46 เนื่องจาก มีตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) ซึ่งช่วยในการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอล และ ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีความเป็นกรด จะช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำของเมทานอล และปฏิกิริยาการขจัดน้ำของไดเมทิลอีเทอร์ เมื่อเติม KMnO₄ ที่มีสมบัติเป็นเบสลงไปทำให้ความเป็นกรดของ HZSM-5 ลดลง ซึ่งความเป็นกรดนั้นไม่เหมาะสมต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว รองลงมาเป็น CZA/10%KMnO₄-HZSM-5 มีค่าร้อยละ 34.43 , CZA/30%KMnO₄-HZSM-5 มีค่าร้อยละ 33.52 และ CZA/20%KMnO₄-HZSM-5 มีค่าร้อยละ 32.83 ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

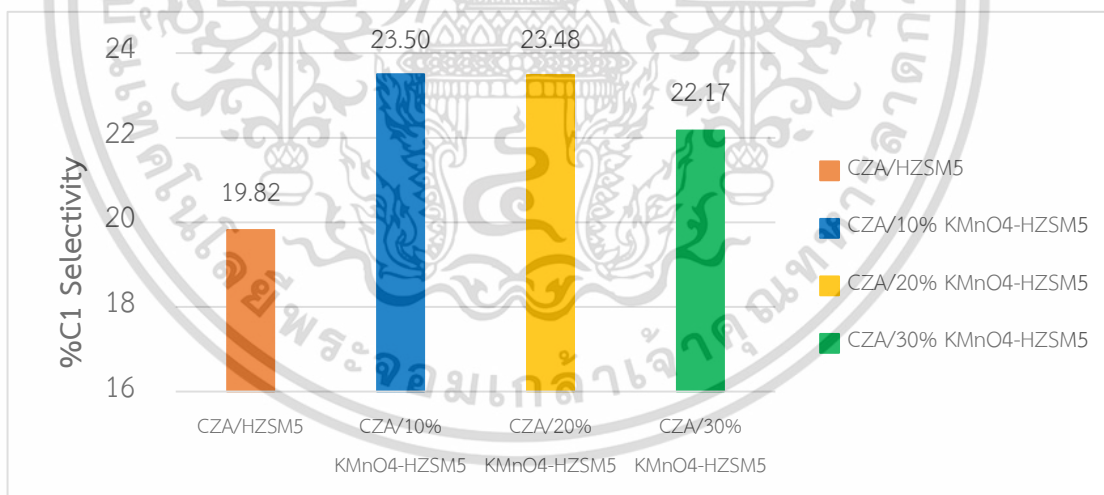
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดไฮโดรคาร์บอน (%HC Selectivity)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอน (%HC Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO₄-HZSM-5, CZA/20% KMnO₄-HZSM-5, CZA/30% KMnO₄-HZSM-5

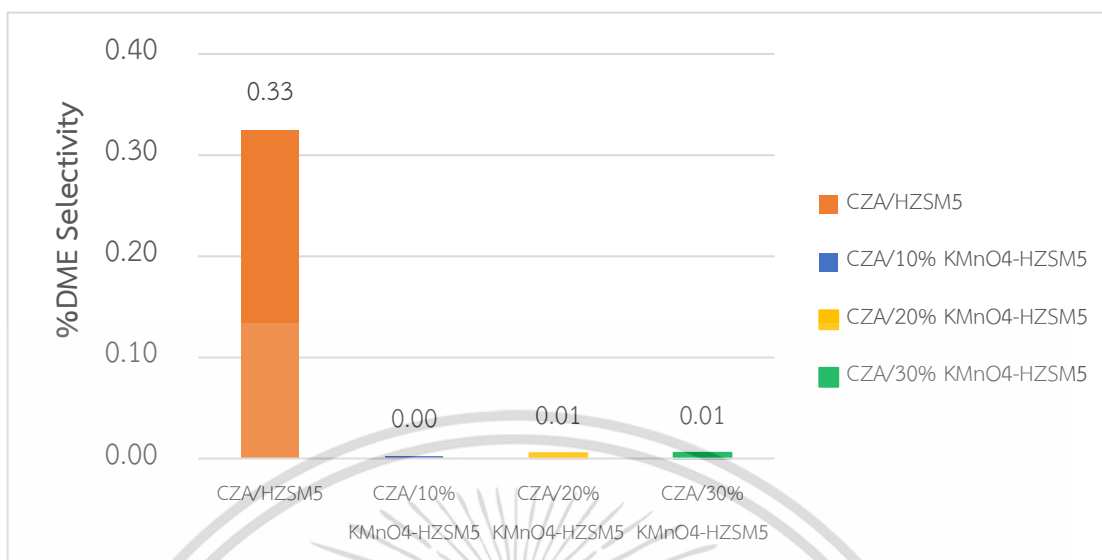
4.2.2.3 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดมีเทน (%C1 Selectivity)



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นมีเทน (%C1 Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO₄-HZSM-5, CZA/20% KMnO₄-HZSM-5, CZA/30% KMnO₄-HZSM-5

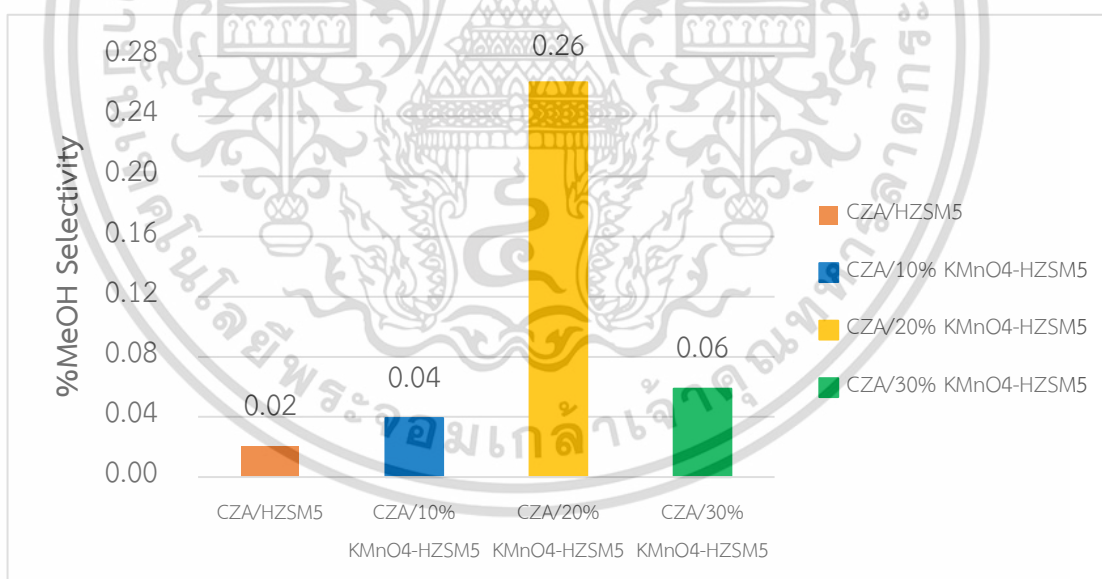
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.4 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity)



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO₄-HZSM-5, CZA/20% KMnO₄-HZSM-5, CZA/30% KMnO₄-HZSM-5

4.2.2.5 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเมทานอล (%MeOH Selectivity)

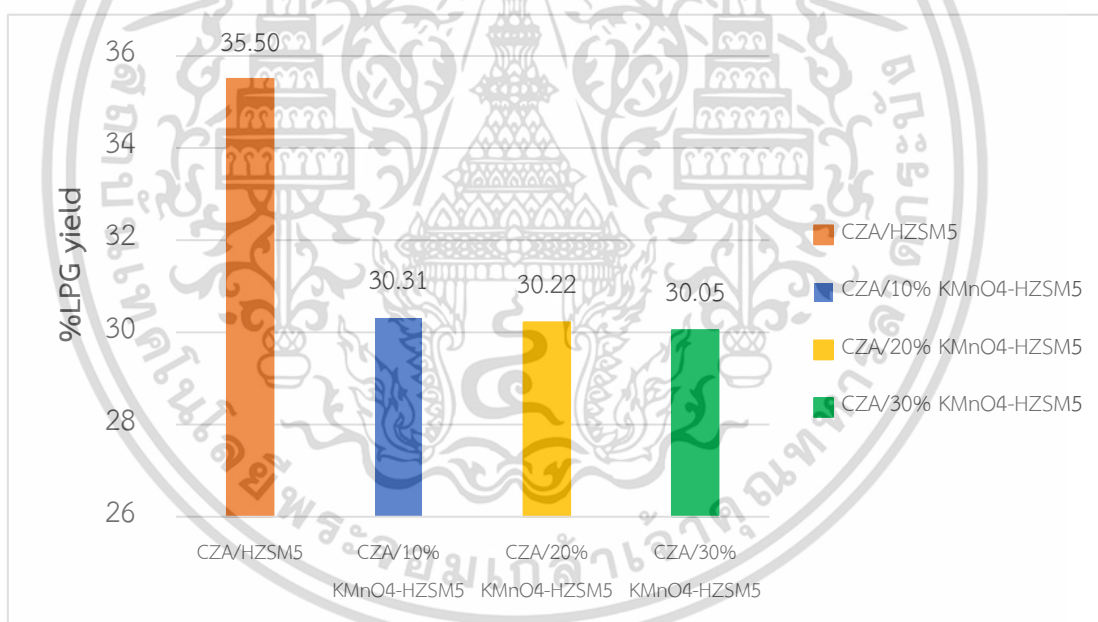


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นเมทานอล (%MeOH Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO₄-HZSM-5, CZA/20% KMnO₄-HZSM-5, CZA/30% KMnO₄-HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10-4.13 แสดงถึงค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน (C2, C3) , มีเทน (C1) , ไดเมทิลอีเทอร์ และเมทานอลตามลำดับ ในปฏิบัติการการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวด้วยแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ HZSM-5 ในความเข้มข้นที่ต่างกัน พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์แปรผันตรงกับร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตลงบนซีโอไลต์ HZSM-5 พบว่า ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์มีค่าน้อยกว่าซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ไม่ผ่านการจุ่มซับ เนื่องจาก เมื่อเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีความเป็นเบส ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีความเป็นกรดน้อยลงจึงเกิดการขจัดน้ำออกจากเมทานอลได้น้อยลง เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ไม่ผ่านการจุ่มซับ

4.2.3 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% KMnO₄-HZSM-5, CZA/20% KMnO₄-HZSM-5, CZA/30% KMnO₄-HZSM-5

จากรูปที่ 4.14 แสดงถึงค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG yield) พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 มีค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวมากที่สุด คือ ร้อยละ 35.50 เนื่องจากมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และ ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ผ่านการจุ่มซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีความเป็นกรดที่ลดลง ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสอดคล้องกับผลของการเกิดไดเมทิลอีเทอร์ เมทานอล และผลการวิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ($\text{NH}_3\text{-TPD}$) ของฉันทนซัลค์ จึงทำให้ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ไม่ผ่านการจุ่มซูปพอสเซียมเปอร์แมงกานีสมีความเป็นกรดที่เหมาะสม ส่งผลให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปีโตรเลียมเหลวสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยผลการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา KMnO_4 บน HZSM-5 และ CZA ที่ตัวแปรต่างกัน

Catalysts	%CO conversion	%Selectivity					%LPG yield
		LPG	HC	C1	DME	MeOH	
CZA/HZSM5	92.30	38.46	41.21	19.82	0.325	0.02	35.50
CZA/10% KMnO_4 -HZSM5	88.02	34.44	41.83	23.50	0.002	0.04	30.31
CZA/20% KMnO_4 -HZSM5	92.04	33.83	43.28	23.48	0.005	0.26	30.48
CZA/30% KMnO_4 -HZSM5	89.65	33.52	44.07	22.17	0.006	0.06	30.63

การทดสอบประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวที่สังเคราะห์ได้จากแก๊สสังเคราะห์โดยตรงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกานีสบนซีโอไลต์ HZSM-5 ($\text{KMnO}_4\text{-HZSM-5}$) ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน และคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) ที่ผสมกันด้วยวิธีทางกายภาพ (physical mixing) ซึ่งสามารถสรุปได้ดัง **ตารางที่ 4.5** จากผลการทดลอง ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% $\text{KMnO}_4\text{-HZSM-5}$, CZA/20% $\text{KMnO}_4\text{-HZSM-5}$, CZA/30% $\text{KMnO}_4\text{-HZSM-5}$ เท่ากับ 92.30, 88.02, 92.04, และ 89.65 ตามลำดับ ร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% $\text{KMnO}_4\text{-HZSM-5}$, CZA/20% $\text{KMnO}_4\text{-HZSM-5}$, CZA/30% $\text{KMnO}_4\text{-HZSM-5}$ เท่ากับ 38.46, 34.44, 33.83 และ 33.52 ตามลำดับ และร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5, CZA/10% $\text{KMnO}_4\text{-HZSM-5}$, CZA/20% $\text{KMnO}_4\text{-HZSM-5}$, CZA/30% $\text{KMnO}_4\text{-HZSM-5}$ เท่ากับ 35.50, 30.31, 30.48 และ 30.63 ตามลำดับ ซึ่งโพแทสเซียมเปอร์แมงกานีสบนซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีความเข้มข้นแตกต่าง และคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) ที่ผสมกันด้วยวิธีทางกายภาพ ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ ร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลว และร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สปีโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์มากที่สุด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเจนออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) และซีโอไลต์ HZSM-5 ที่ผสมกันด้วยวิธีทางกายภาพ เนื่องจากมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์และร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวมากที่สุดที่ร้อยละ 92.30 และ 35.50 ตามลำดับ

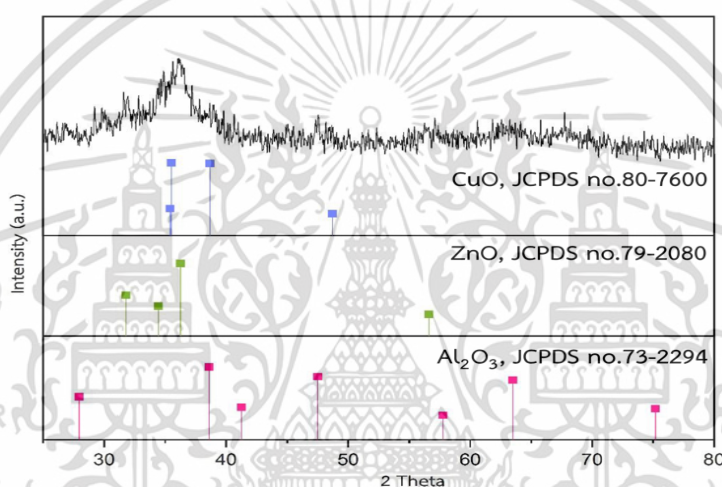
จากผลการทดลอง โพรแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่จุ่มซับบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ไม่ส่งผลต่อการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลว คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบอัตราส่วนที่แตกต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเจนออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ผสมกันด้วยวิธีทางกายภาพ โดยอัตราส่วนที่ใช้ คือ 1:1 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 (0.3300:0.1700 กรัม) และ 3:1 (0.3750:0.2500 กรัม) โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์จะถูกตรวจสอบเอกลักษณ์ ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะของผลึกและออสซิลลูชัน (X-ray diffraction: XRD), ภาพที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS นอกจากนี้ยังมีผลการวิเคราะห์แยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารผสมจากการทำปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Offline Gas Chromatography รุ่น CP-3800 ยี่ห้อ VARIAN โดยใช้คอลัมน์ CP-7538 ต่อกับตัวรับสัญญาณ Thermal Conductivity Detector (TCD) เพื่อวิเคราะห์แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สอาร์กอน (Ar) และคอลัมน์ HP-PLOT/Q จะต่อกับ Flame Ionization Detector (FID) เพื่อวิเคราะห์หาสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ในไฮโดรเจนและอากาศ ได้แก่ เมทานอล ไดมethylอีเทอร์ ไฮโดรคาร์บอน (มีเทน โพรเพน บิวเทน) และแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน

4.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอัญฐาน (X-ray diffraction: XRD)

เป็นเทคนิคการนำรังสีเอ็กซ์มาวิเคราะห์สารประกอบในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษา รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสาร โดยยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน ของรังสีในมุมที่ต่างกัน และผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวัสดุภาค องค์ประกอบของสารตัวอย่างนั้นๆ โดยข้อมูลที่ได้สามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสาร ตัวอย่างได้

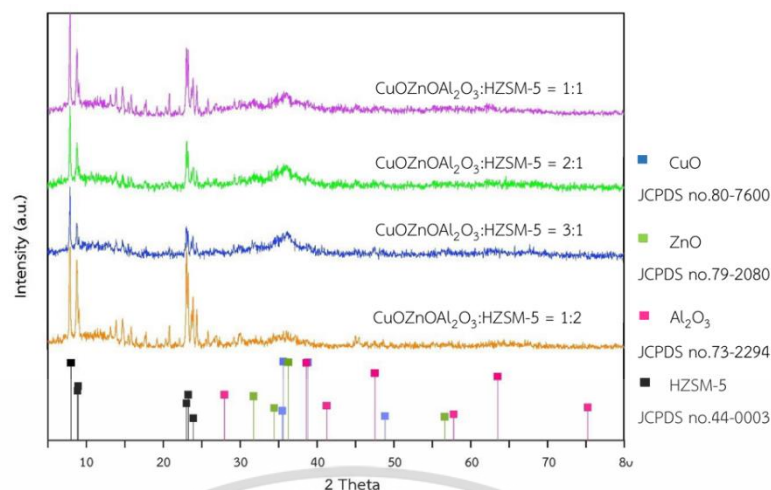


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการตกตะกอนร่วม

[เมธาพร,2562]

จากรูปที่ 4.15 การวิเคราะห์โครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการตกตะกอนร่วม พบพีคขึ้น ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 35.64° 36.16° 38.68° และ 48.68° ซึ่งใกล้เคียงกับโครงสร้างผลึกมาตรฐาน ของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO; 35.42° 35.54° 38.71° และ 48.72°) พบพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 31.60° 34.52° 36.24° และ 48.20° ซึ่งใกล้เคียงกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของซิงค์ออกไซด์ (ZnO; 31.78° 34.45° 36.27° และ 56.61°) และพบพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 27.76° 39.04° 47.56° และ 63.44° ซึ่งใกล้เคียงกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 ; 27.95° 38.59° 41.25° 47.50° และ 63.48°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



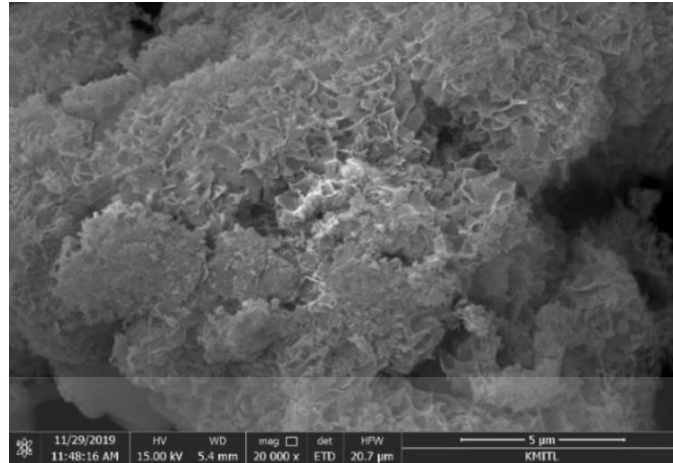
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ถูกเตรียม 4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของออกไซด์ออกไซด์ (CuO, JCPDS no.80-7600) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO, JCPDS no.79-2080) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃, JCPDS no.73-2294) และซีโอไลต์ ชนิด HZSM-5 (HZSM-5, JCPDS no.44-0003) [เมธาพร,2562]

จากรูปที่ 4.16 การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีผสมทางกายภาพ (physical mixing) ให้ได้ 4 อัตราส่วนเป็น 1:1 (0.5000:0.5000กรัม) 2:1 (0.6700:0.3300กรัม) 3:1 (0.7500:0.2500กรัม) และ 1:2 (0.3300:0.6700กรัม) โดยน้ำหนัก โดยมีพีคหลักที่ขึ้นใกล้เคียงกับ ตำแหน่ง 2θ ของฟีดคอปเปอร์ ออกไซด์ (CuO; 35.42° 35.54° 38.71° และ 48.72°) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO; 31.78° 34.45° 36.27° และ 56.61°) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃; 27.95° 38.59° 41.25° 47.50° และ 63.48°) และ ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (HZSM-5; 7.97° 8.82° 23.32° และ 23.95°)

4.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค (SEM)

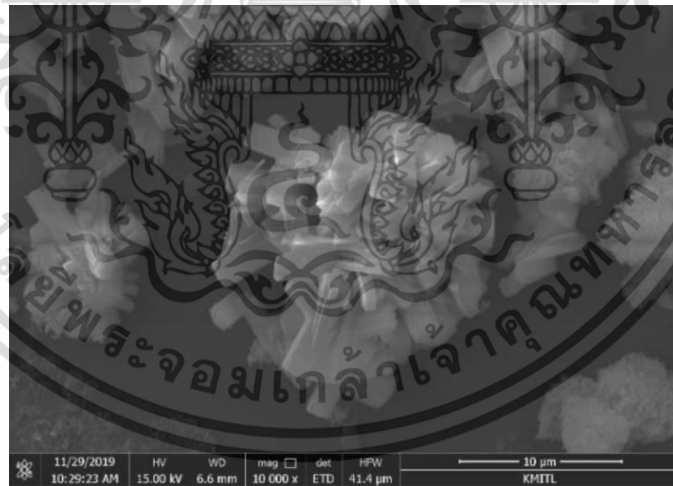
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของสาร ตัวอย่างเพื่อให้เห็นลักษณะพื้นผิว ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งภาพที่ได้ จะเป็นภาพ 3 มิติที่มีสีขาวดำด้วยกำลังขยายต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



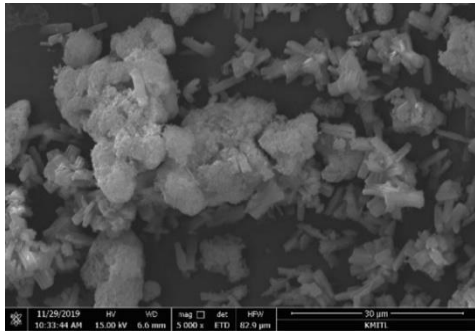
รูปที่ 4.17 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่กำลังขยาย 20000 เท่า [เมธาพร, 2562]

จากรูปที่ 4.17 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

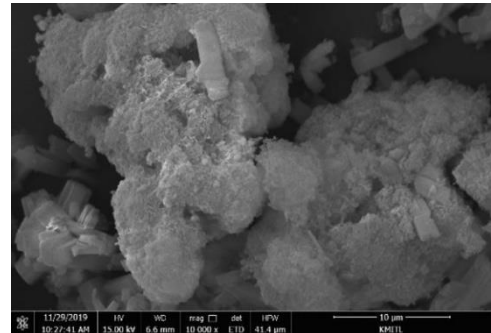


รูปที่ 4.18 รูปร่างสัณฐานวิทยาของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่กำลังขยาย 10000 เท่า [เมธาพร, 2562]

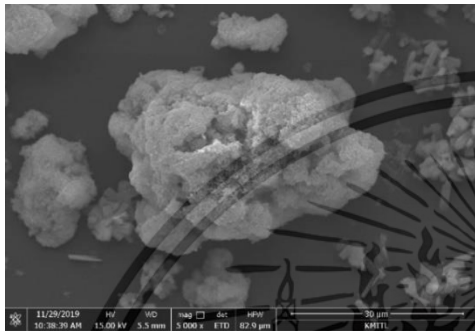
จากรูปที่ 4.18 ลักษณะสัณฐานวิทยาของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เกรดการค้า ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากรด จะแสดงลักษณะเป็นผลึกค่อนข้างสูง มีขนาดใกล้เคียงกัน และเป็นแท่งพื้นผิวเรียบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



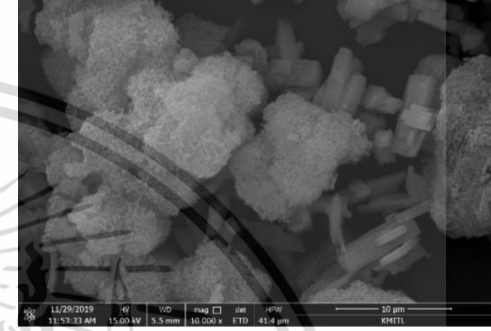
(ก)



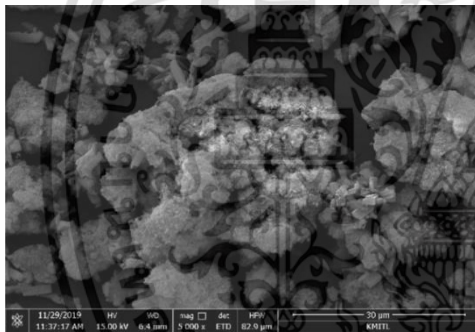
(ข)



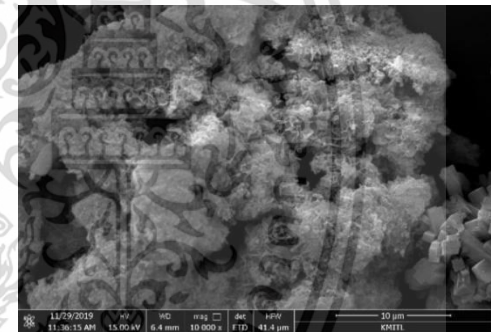
(ค)



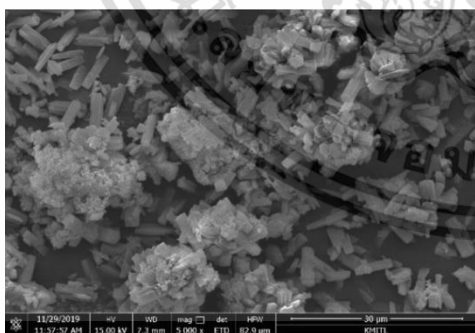
(ง)



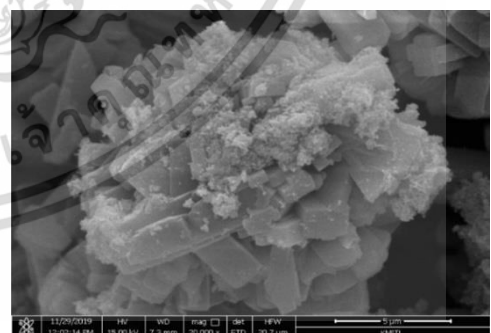
(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

รูปที่ 4.19 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 [เมธาพร, 2562]

(ก) $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

(ข) $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

(ค) $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

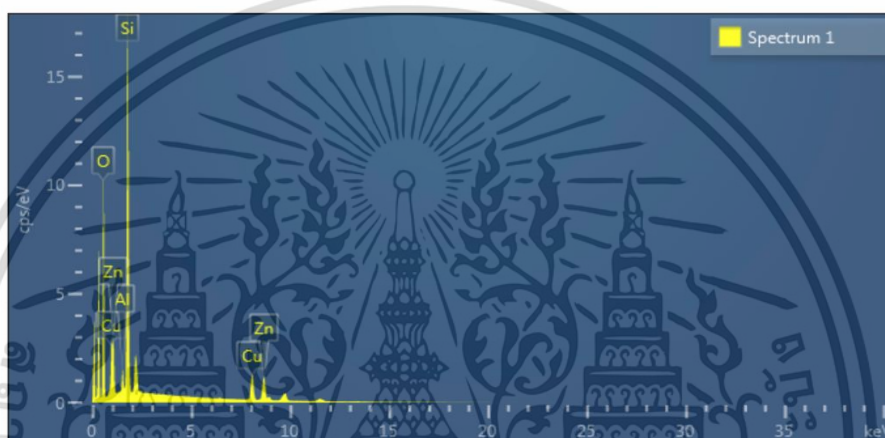
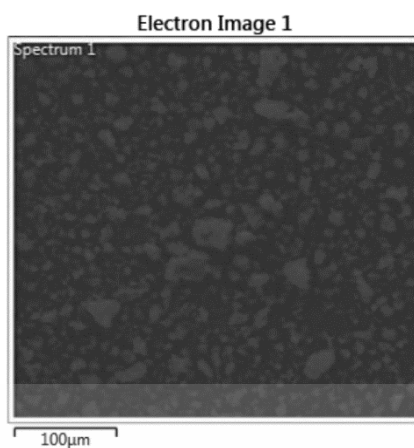
- (ง) $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10000 เท่า
 (จ) $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 5000 เท่า
 (ฉ) $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10000 เท่า
 (ช) $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 5000 เท่า
 (ซ) $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

จากรูปที่ 4.19 ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3$) ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ($\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$) ด้วยวิธีทางกายภาพ (physical mixing) ในอัตราส่วน 1:1 (0.2500:0.2500 กรัม) 2:1 (0.3300:0.1700 กรัม) 3:1 (0.3750:0.1250 กรัม) และ 1:2 (0.1700:0.3300 กรัม) โดยน้ำหนัก

จะเห็นได้ว่า (ก)-(ฉ) แสดงลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์มากกว่าซีโอไลต์ สังเกตเห็นว่าการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนและการกระจายที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250 กรัม) โดยน้ำหนัก ค่อนข้างมีกลุ่มก้อนของคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์มาก มีการกระจายตัวที่ไม่ค่อยดี เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ และปริมาณของซีโอไลต์ก็น้อยลง ส่วนในรูปที่ 4.5 (ช)-(ซ) แสดงลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของซีโอไลต์มากกว่าคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ สังเกตเห็นถึงการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ HZSM-5 ได้อย่างชัดเจน

4.3.3 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (EDS)

Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโตรเมตรีรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ในการศึกษาองค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

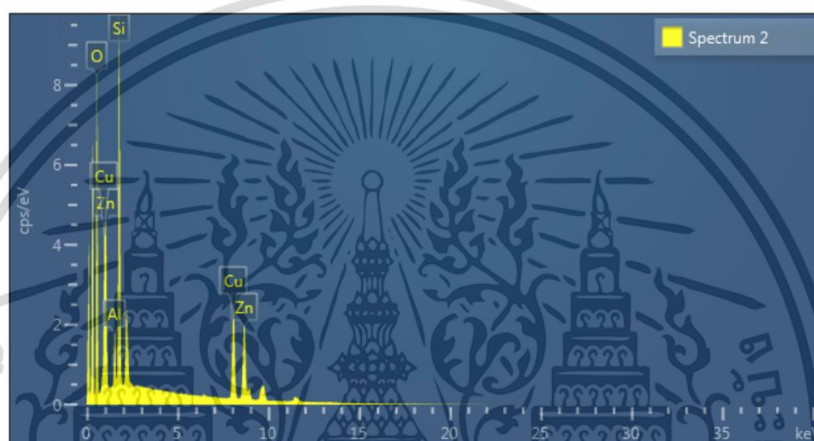
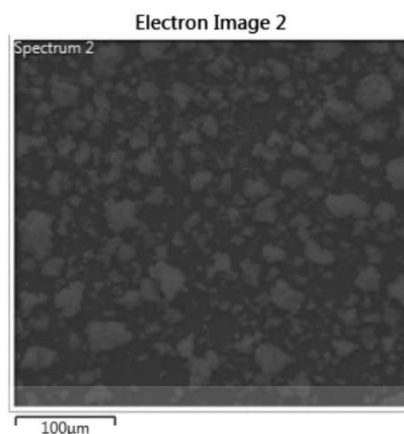


รูปที่ 4.20 Map Spectrum CuOZnOAl₂O₃/HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2517:0.2510 กรัม) โดยน้ำหนัก [เมธาพร, 2562]

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา CuOZnOAl₂O₃/HZSM-5 ในอัตราส่วน 1:1 (0.2517:0.2510กรัม) โดยน้ำหนัก

Element	Line Type	Apparent Concentration	K Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic%	Standard Label	Factory Standard
O	K series	30.47	0.10253	49.07	0.19	68.21	SiO ₂	Yes
Al	K series	0.79	0.00567	2.05	0.06	1.69	Al ₂ O ₃	Yes
Si	K series	13.36	0.10583	29.62	0.14	23.46	SiO ₂	Yes
Cu	K series	5.2	0.05213	9.26	0.12	3.24	Cu	Yes
Zn	K series	5.63	0.05628	10.00	0.12	3.40	Zn	Yes
Total;				100.00		100.00		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

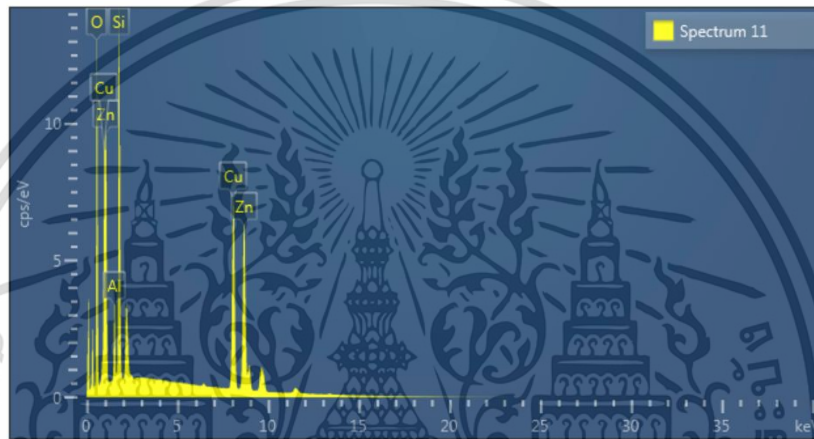
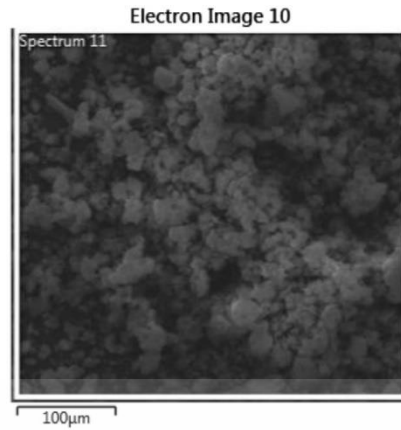


รูปที่ 4.21 Map Spectrum $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723 กรัม) โดยน้ำหนัก [เมธาพร, 2562]

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 2:1 (0.3346:0.1723 กรัม) โดยน้ำหนัก

Element	Line Type	Apparent Concentration	K Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic%	Standard Label	Factory Standard
O	K series	24.40	0.08210	39.99	0.20	63.91	SiO_2	Yes
Al	K series	1.06	0.00758	3.59	0.08	3.40	Al_2O_3	Yes
Si	K series	7.10	0.05629	20.06	0.12	18.26	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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

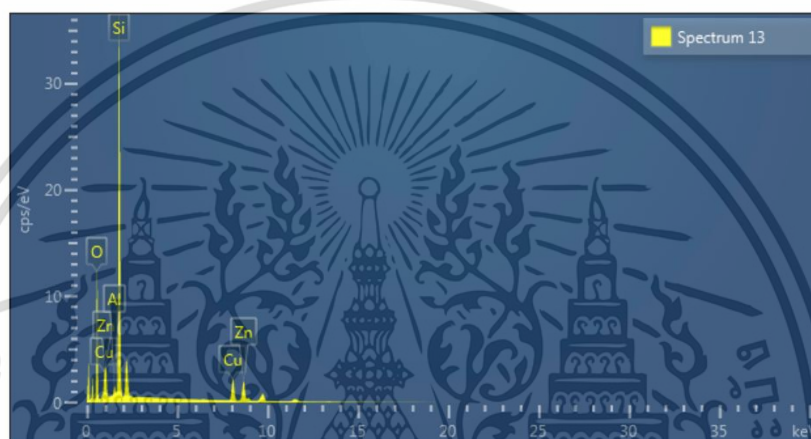
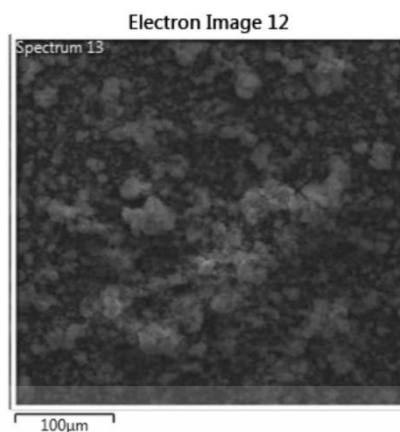


รูปที่ 4.22 Map Spectrum $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ ในอัตราส่วน 3:1 (0.3750:0.1250 กรัม) โดยน้ำหนัก [เมธาพร, 2562]

ตารางที่ 4.8 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
O	K series	37.50	0.12618	29.27	0.13	55.06	SiO_2	Yes
Al	K series	2.27	0.01631	4.12	0.06	4.60	Al_2O_3	Yes
Si	K series	10.35	0.08201	15.26	0.08	16.35	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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 Map Spectrum $\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ อัตราส่วน 1:2 (0:1710:0.3300 กรัม) โดยน้ำหนัก [เมธาพร, 2562]

ตารางที่ 4.9 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
O	K series	37.50	0.12618	29.27	0.13	55.06	SiO_2	Yes
Al	K series	2.27	0.01631	4.12	0.06	4.60	Al_2O_3	Yes
Si	K series	10.35	0.08201	15.26	0.08	16.35	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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ร้อยละธาตุแต่ละชนิดที่ปรากฏบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยน้ำหนัก [เมธาพร, 2562]

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

จากตารางที่ 4.10 พบปริมาณองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3$, CZA) เป็นไปตามอัตราส่วนที่สังเคราะห์จากวิธีการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) โดยใช้อัตราส่วน $\text{CuO}:\text{ZnO}:\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็น 4.5:4.5:1 และเมื่อนำไปผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในปริมาณที่แตกต่าง กันซึ่งผสมด้วยวิธีทางกายภาพ (physical mixing) จะพบว่าปริมาณองค์ประกอบเพิ่มขึ้นหรือลดลง เป็นไปตามอัตราส่วนที่ผสมกัน

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน

จากการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3$, CZA) ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยผสมทางกายภาพ ในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor) จะสามารถบรรจุสารได้ 1.0000 กรัม โดยจะแบ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5000 กรัม และ quartz sand 0.5000 กรัม ก่อนทำปฏิกิริยา ต้องทำการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่แก๊สที่ไม่จำเป็นออกจากระบบและทำให้ระบบแห้ง จากนั้นทำการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนให้คอปเปอร์ออกไซด์เป็นคอปเปอร์ (0) ด้วยแก๊สไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ($5\% \text{H}_2$) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เริ่มทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์ปิโตรเลียมเหลวโดยใช้แก๊สสังเคราะห์อัตราส่วนระหว่าง $\text{H}_2:\text{CO}$ เป็น 2:1 ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

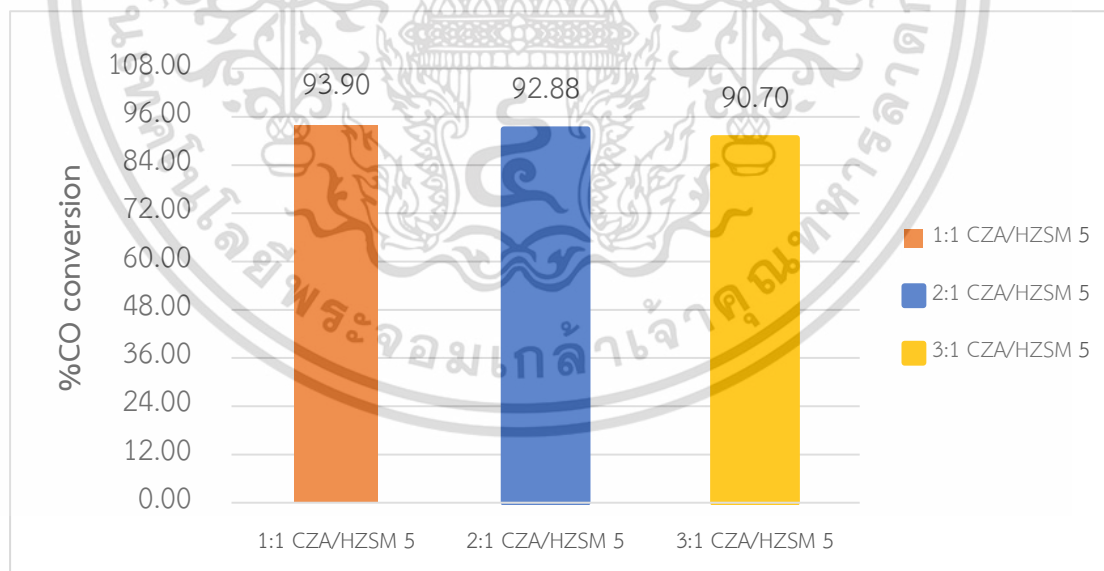
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเวลา 4 ชั่วโมงควบคุมอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันที่ 40 บาร์ และผลิตภัณฑ์จะถูกเก็บทุก ๆ 1 ชั่วโมงและนำมาวิเคราะห์แยกผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์แยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา จะวิเคราะห์หาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด และร้อยละผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3$, CZA) ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยผสมทางกายภาพ ซึ่งจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Offline Gas Chromatography รุ่น CP-3800 ยี่ห้อ VARIAN โดยใช้คอลัมน์ CP-7538 ต่อกับตัวรับสัญญาณ Thermal Conductivity Detector (TCD) เพื่อวิเคราะห์แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สอาร์กอน (Ar) และคอลัมน์ HP-PLOT/Q จะต่อกับ Flame Ionization Detector (FID) เพื่อวิเคราะห์หาสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ในไฮโดรเจนและอากาศ ได้แก่ เมทานอล ไดมethylอีเทอร์ ไฮโดรคาร์บอน (มีเทน โพรเพน บิวเทน) และแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่ต้องการ

4.4.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (% CO conversion)

การศึกษาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นค่าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงจากสารตั้งต้น คือแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ไปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยเปรียบเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยาโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography ใช้ตัวรับสัญญาณ Thermal Conductivity Detector (TCD) และ Flame Ionization Detector (FID)



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (% CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

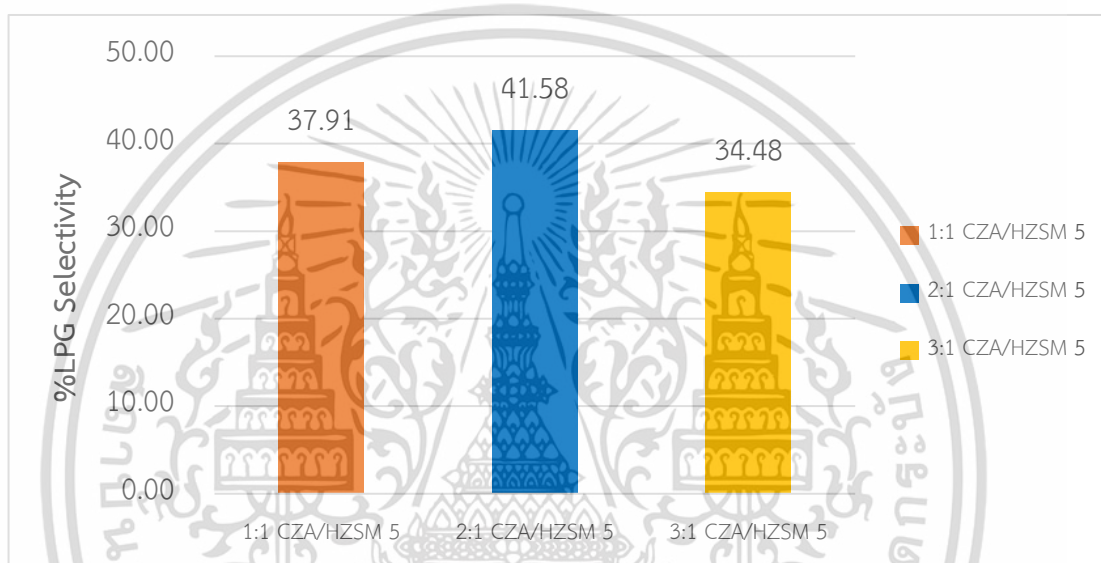
จาก**รูปที่ 4.24** พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (% CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500) มีค่าสูงสุดร้อยละ 93.90

เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่นๆ รองลงมาเป็น 2:1 CZA/HZSM-5 มีค่าร้อยละ 92.88 และ 3:1 CZA/HZSM-5 มีค่าร้อยละ 90.70 ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4.4.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity)

ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด เป็นค่าที่แสดงถึงร้อยละของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้ทั้งผลิตภัณฑ์หลัก คือ แก๊สปิโตรเลียมเหลว และผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน ไดมethylอีเทอร์ เมทานอล และคาร์บอนไดออกไซด์

4.4.2.1 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG Selectivity)

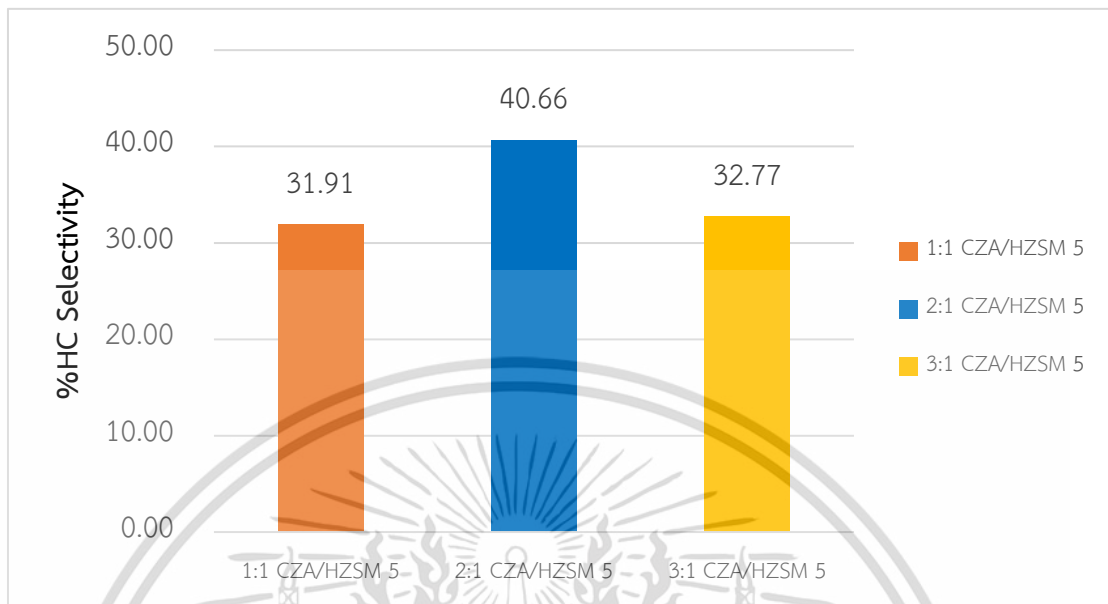


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

จากรูปที่ 4.25 พบว่าค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม) มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่นๆ โดยมีค่าร้อยละ 41.58 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา CZA ช่วยในการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอลจากนั้นซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีความเป็นกรดจะช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำของเมทานอล และปฏิกิริยาการขจัดน้ำของไดเมทิลอีเทอร์ รองลงมาเป็น 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม) มีค่าร้อยละ 37.91 และ 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม) มีค่าร้อยละ 34.48 ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

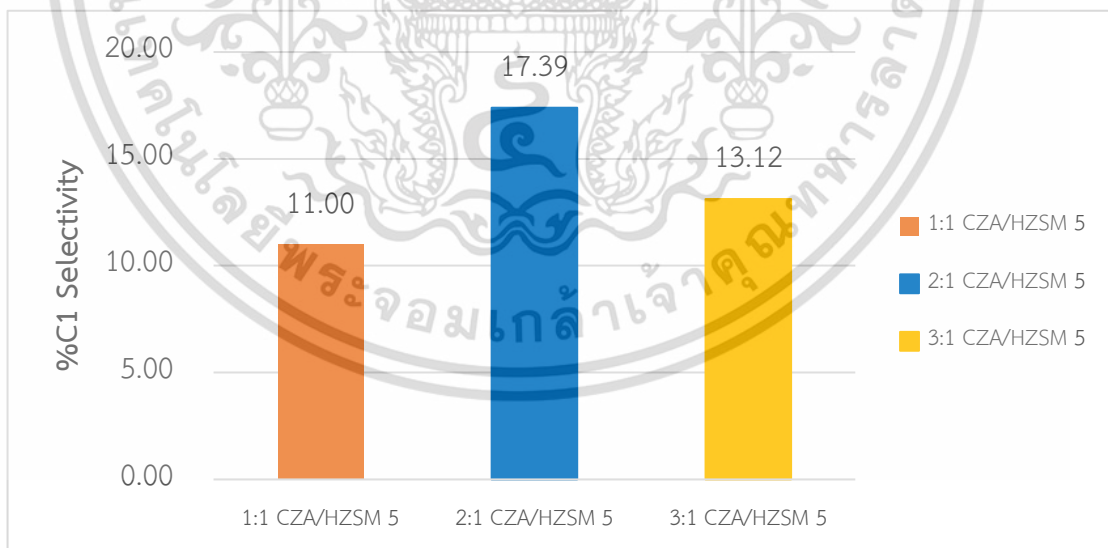
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.2 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดไฮโดรคาร์บอน (%HC Selectivity)



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอน (%HC Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

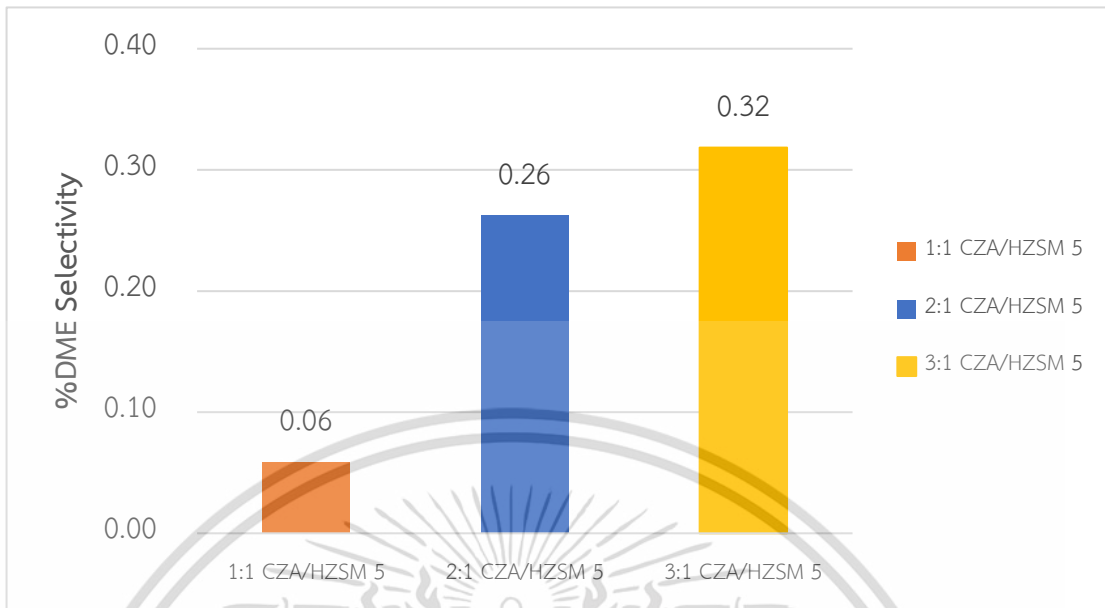
4.4.2.3 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดมีเทน (%C1 Selectivity)



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นมีเทน (%C1 Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

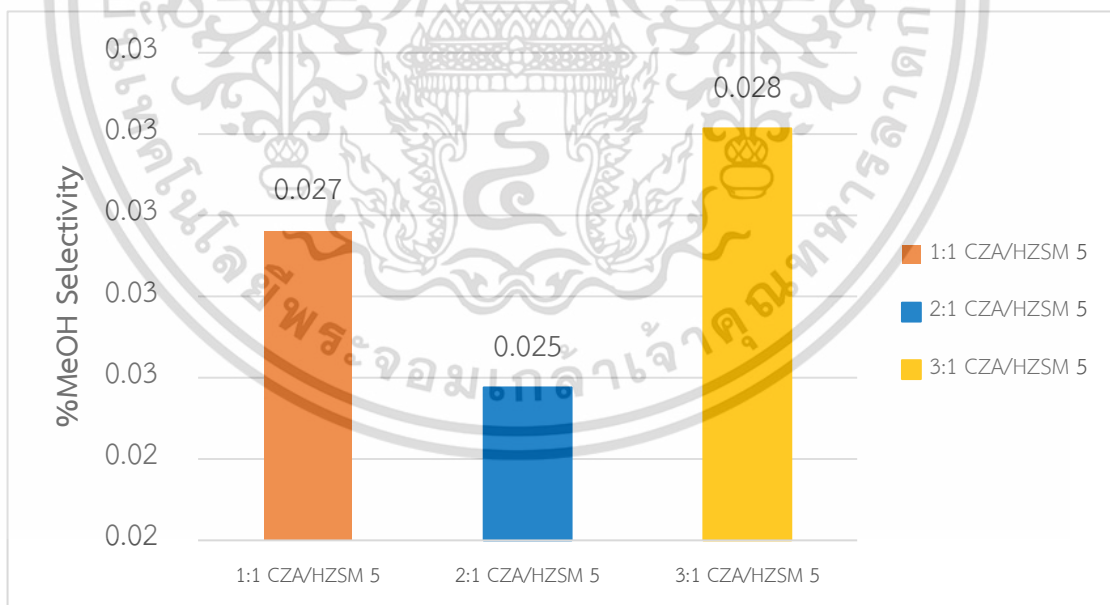
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.4 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity)



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

4.4.2.5 ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเมทานอล (%MeOH Selectivity)

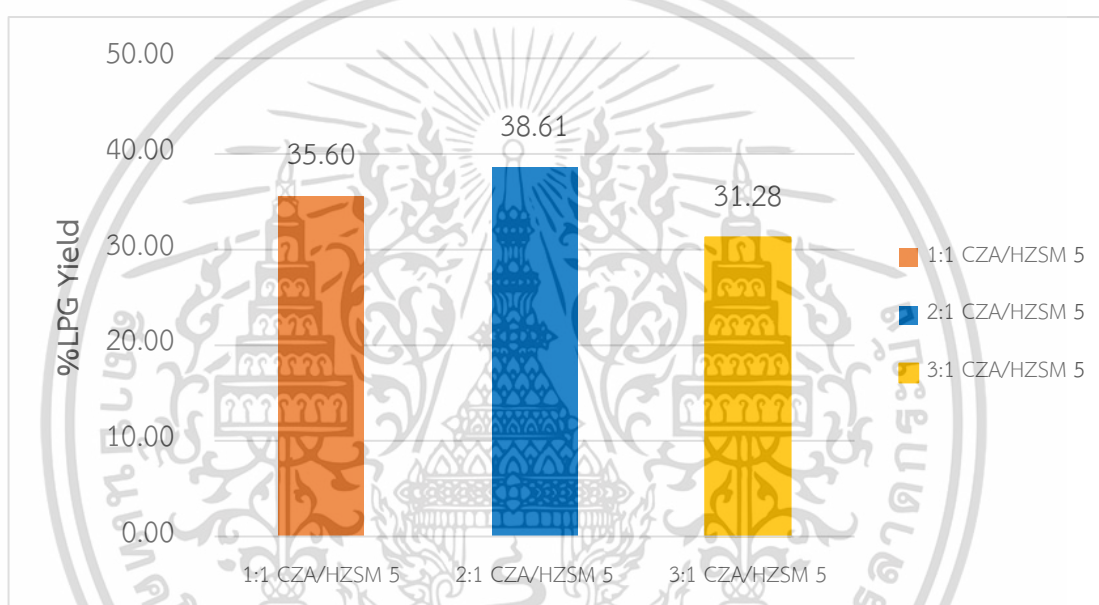


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นเมทานอล (%MeOH Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามในชื่อผู้บริหารเชิงนามเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.26 - 4.29 แสดงถึงค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน (C2, C3) , มีเทน (C1) , ไดมethylอีเทอร์ และเมทานอลตามลำดับ ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวด้วยแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน พบว่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนแปรผันตามร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว ส่วนร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดมethylอีเทอร์ และเมทานอลพบว่าแปรผันตามอัตราส่วนของ CZA/HZSM-5

4.4.3 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield)



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG yield) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

จากรูปที่ 4.30 แสดงถึงค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลว พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม) มีค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวมากที่สุดคือ ร้อยละ 38.61 เนื่องจาก สมการการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวจะต้องใช้เมทานอล 2 โมล เพื่อเกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำของเมทานอลให้ได้ไดมethylอีเทอร์ ซึ่งที่อัตราส่วน 2:1 CZA/HZSM-5 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เมทานอลให้เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาขจัดน้ำของเมทานอล และมีซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีปริมาณพื้นที่ผิวที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปิโตรเลียมเหลวจากแก๊สสังเคราะห์มากที่สุด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) และ ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีอัตราส่วน 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม) เนื่องจากมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์และร้อยละผลิตภัณธ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวมากที่สุดที่ร้อยละ 92.90 และ 38.61 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวที่สังเคราะห์ได้จากแก๊สสังเคราะห์โดยตรงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (Zeolite HZSM-5) ที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$, CZA) โดยการผสมกันทางกายภาพ (Physical mixing) และ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยการผสมกันทางกายภาพ และ การศึกษาประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวที่สังเคราะห์ได้จากแก๊สสังเคราะห์โดยตรงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) และ ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน ได้แก่ 1:1 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 (0.3750:0.1250 กรัม) สามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ HZSM-5 แตกต่างกันผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA)

จากการศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) และ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) ผสมกับซีโอไลต์ HZSM-5 สำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวด้วยแก๊สสังเคราะห์อัตราส่วน 2:1 ($\text{H}_2:\text{CO}$) บนเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor) ที่ความดัน 40 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จากการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่า ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ไม่ส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลว และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สปีโตรเลียมเหลวให้มีค่าที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett (BET) พบว่ารูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์สังกะสีออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ทำให้สามารถเข้าไปกระจายตัวภายในรูพรุนของ HZSM-5 ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) พบว่ามีโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO), ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ ซีโอไลต์ HZSM-5 เทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐาน ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการตรวจสอบปริมาณธาตุและองค์ประกอบธาตุ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM-EDS) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มเนื่องจากการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสม (Bifunctional catalyst) ที่ประกอบด้วยคอปเปอร์ออกไซด์สังกะสีออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นโลหะและ HZSM-5 ที่เป็นกรด ทั้งสององค์ประกอบทำหน้าที่ในการเร่งขั้นตอนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา คือ คอปเปอร์ออกไซด์สังกะสีออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ช่วยในการเร่งปฏิกิริยาเมทานอลและ HZSM-5 ช่วยเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน

จากผลทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์สังกะสีออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) ผสมกับซีโอไลต์ HZSM-5 ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์, ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลว และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สปีโตรเลียมเหลวสูงสุด คือ 92.30, 38.46 และ 35.50 ตามลำดับ

5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์สังกะสีออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์สังกะสีออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ผสมกันด้วยวิธีทางกายภาพ โดยอัตราส่วนที่ใช้ คือ 1:1 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 (0.3300:0.1700 กรัม) และ 3:1 (0.3750:0.1250 กรัม) โดยน้ำหนัก สำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวด้วยแก๊สสังเคราะห์อัตราส่วน 2:1 ($\text{H}_2:\text{CO}$) บนเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor) ที่ความดัน 40 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จากการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่า อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลว และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สปีโตรเลียมเหลว

จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) พบว่ามีโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO), ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ ซีโอไลต์ HZSM-5 เทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐาน

ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัญญาณวิทยาโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการตรวจสอบปริมาณธาตุและองค์ประกอบธาตุ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM-EDS) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มเนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสม (Bifunctional catalyst) ที่ประกอบด้วยคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นโลหะและ HZSM-5 ที่เป็นกรด ทั้งสององค์ประกอบทำหน้าที่ในการเร่งขั้นตอนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา คือ คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ช่วยในการเร่งปฏิกิริยาเมทานอลและ HZSM-5 ช่วยเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน

จากผลทดลองพบว่าอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลว และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สปีโตรเลียมเหลว ซึ่งสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) และ ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีอัตราส่วน 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม) มีประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเหมาะสมกว่าอัตราส่วนอื่นๆ เนื่องจากมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์และร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปีโตรเลียมเหลวมากที่สุดที่ร้อยละ 92.90 และ 38.61 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวที่สังเคราะห์ได้จากแก๊สสังเคราะห์โดยตรงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (Zeolite HZSM-5) ที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuZnOAl}_2\text{O}_3$, CZA) โดยการผสมกันทางกายภาพ (Physical mixing) และ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) ผสมกับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยการผสมกันทางกายภาพ และ การศึกษาประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวที่สังเคราะห์ได้จากแก๊สสังเคราะห์โดยตรงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) และ ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน ได้แก่ 1:1 (0.2500:0.2500 กรัม), 2:1 (0.3300:0.1700 กรัม), 3:1 (0.3750:0.1250 กรัม) มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ศึกษาผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนซีโอไลต์ HZSM-5 เพื่อการกระจายตัวของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
2. ศึกษาตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างออกไป เช่น ซีโอไลต์ชนิด H-Beta , USY เพื่อเป็นการยับยั้งการสลายตัวของโดเมทิลอีเทอร์อีเทอร์ลดการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ เพื่อให้ร้อยละการเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวสูงขึ้น
3. ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการใช้สารเคมีชนิดอื่นมาปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น
4. ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวด้วยวิธีการสังเคราะห์ที่แตกต่างออกไป
5. ศึกษาการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น เทคนิค TPD, TPR, EDX เพื่อยืนยันผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. 2550. **ควอร์ตซ์ / ททรายแก้ว**. [Online]. Available:
http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=628&filename=m
- กรมธุรกิจพลังงาน. 2551. **คุณสมบัติของก๊าซปิโตรเลียมเหลว**. [Online]. Available:
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
- กำชัย นัยนิติกุล. 2005. “**Multiphase Reactor Technology**.” หน้า 141-146. ใน
Mechanical Technology. 183. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร
 เหนือ.
- จิตวัต ศิวาวุธ. 2557. “**ผลของปริมาณอัตราส่วนและลำดับการจุ่มชุบของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ
 ร่วม(ทองแดง สังกะสีและอะลูมิเนียม) บนตัวรองรับซิลิกาไททานเนียมสำหรับการผลิต
 เมทานอลจากปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของคาร์บอนไดออกไซด์**.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรม
 ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิรัชญา ช่วยเกลี้ยง. 2557. “**ไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันพืชโดยกระบวนการคละตะไลดิกแครงกิ้ง**.”
 วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชนนิกานต์ และ นภสร. 2565. “**การเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์โดยตรงเป็นไดเมทิลอีเทอร์บนตัวเร่ง
 ปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/modified-HZSM-5**.” ปรินญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี
 อุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ณัฐธีร์, วลัยลักษณ์ และ อทิตยา. 2564. “**การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃ จากฝาดึง
 ครอบ อะลูมิเนียมที่ใช้แล้วสำหรับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ จากแก๊สสังเคราะห์**.”
 ปรินญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
 เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ณัชชภัคย์ ปิยะบัณฑิตกุล. 2563. “**ผลของอะลูมิเนียมที่มีต่อขนาดผลึกคอปเปอร์ออกไซด์ใน
 การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ทางตรงจากแก๊สสังเคราะห์**” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร
 มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง.
- ณิชากร ภูตานนท์. 2561. “**การสังเคราะห์คอปเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการจัดเรียงตัวด้วย
 ตัวเองบนกระดาษและการศึกษาถึงการประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง**.”
 วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ บัณฑิตวิทยาลัย,
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ดลฤดี โตเย็น. 2563. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). [Online]. Available: <http://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/EDS.pdf>
- ต้นกล้า อินสว่าง. 2558. “เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC).” หน้า 2-3. ใน ผศ.ดร.ธินา ภัทรมานนท์. จดหมายข่าวศูนย์เครื่องมือวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น : ศิริภรณ์.
- นฤมล ทองขาว. 2557. “การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/ZnO-ZSM-5 โดยอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสและการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มัลสำหรับการผลิตแอลพีจี.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปวีณสุดา เนตรวงศ์. 2555. “ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์/ซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคสเปรย์สำหรับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปานจิตต์ แซ่ปุ่น. 2557. “ผลของสารตั้งต้นต่อโครงสร้างและกัมมันตภาพเชิงเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคคอปเปอร์/ซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนเมตรที่เตรียมด้วยอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิส.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พัชรพร เปาะและ. 2557. “การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์/ซิงก์ออกไซด์ด้วยอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิส.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เมธาพร และ อารียา. 2562. “การสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงก์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ลักษิกา วรณยุกต์ และ อรุณรัตน์. 2563. “การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ซิงก์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์/เอชซีเอสเอ็มไฟว์ที่ถูกดัดแปลงด้วยแลนทานัม” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วิลาสินี วิสัยจร. 2559. “ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์บนเซอร์เนียมไดออกไซด์และแคลเซียม ออกไซด์ปรับปรุงจากเปลือกหอยนางรมสำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจิเนชั่น.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ศันศันย์ รักไทยเจริญชีพ. 2558. “ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)ในงานทดสอบวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์.” วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 63(197) : 38-40

สมฤทัย ชุนโสภา. 2550. “การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่มีเสถียรภาพสำหรับการแตกตัวของน้ำมันทานในแก๊สซิโพลีเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สายสมร นิยมสรวย. 2561. “การเคลือบฟิล์มบางอลูมินาด้วยเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริงเพื่อปรับปรุงคุณภาพอัญมณีเนื้ออ่อน.” อัญมณี, มหาวิทยาลัยบูรพา

อติพล สว่างอารมย์. 2557. “การศึกษาประสิทธิภาพของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคทองคำต่อการเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลติก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

อารีญา เอี่ยมปู้. 2554. “การประเมินชั้นเคลือบแคลเซียม-ฟอสฟอรัสบนไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้าเพื่อใช้เป็นวัสดุชีวภาพ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

Congming Li, Xingdong Yuan and Kaoru Fujimoto. 2014. “Direct synthesis of LPG from carbon dioxide over hybrid catalysts comprising modified methanol synthesis catalyst and β -type zeolite.” Applied Catalysis A: General. 475 : 155-160.

J.-L. Li, T.Inui. 1995. “Characterization of precursors of methanol synthesis catalysts, copper / zinc / aluminium oxides, precipitated at different pHs and temperatures.” Applied Catalysis A: General. 137(1996) : 105- 117.

Kenji Asami, Qianwen Zhang, Xiaohong Li, Sachio Asaoka and Kaoru Fujimoto. 2004. “Selective synthesis of LPG from synthesis gas.” Studies in Surface Science and Catalysis, 147 : 427-432.

Ki-won Jun, Wen-Jie Shen, K.S. Rama Rao, Kyu-Wan Lee. 1998. “Residual sodium effect on the catalytic activity of Cu/ZnO/Al₂O₃ in methanol synthesis from CO₂ hydrogenation.” Applied Catalysis A: General. 174(1998) : 231- 238.

Peng Lu, Dongming Shen, Shilin Cheng, Emmerson Hondo Linet Gapu Chizema, Chengwei Wang, Xikun Gai, Chengxue Lu and Ruiqin Yang. 2018. “The design of a CZ@H- β -P catalyst with core shell structure and its application in LPG synthesis from syngas.” Fuel. 223 : 157-163.

Peng Lu, Jian Sun, Dongming Shen, Ruiqin Yang, Chuang Xing, Chengxue Lu, Noritatsu Tsubaki and Shengdao Shan. 2018. “Direct syngas conversion to

liquefied petroleum gas: Importance of a multifunctional metal-zeolite interface.” Applied Energy. 209 : 1-7.

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

Qianwen Zhang, Xiaohong Li, Kenji Asami, Sachio Asaoka and Kaoru Fujimoto.

2004 “**Synthesis of LPG from synthesis gas.**” Fuel Processing Technology, 85(8-10) : 1139-1150.

Qingtao Sheng, Run-Ping Ye, Weibo Gong, Xiufeng Shi, Bang Xu, Morris Argyle, Hertanto Adidharma, Maohong Fan. 2020. "**Mechanism and catalytic performance for direct dimethyl ether synthesis by CO, hydrogenation over CuZnZr/ferrierite hybrid catalyst.**" Journal of Environmental sciences. 92(2020) : 106-117.

SGE CHEM. (2564). **ต่างทับทัมมืความสำคัญอย่างไร.** [Online]. Available :

<https://sgechem.com/articles/ต่างทับทัมมื-คือะไร/>

Vessel Chemical. (ม.ป.ป.). **ซิงค์ออกไซด์.** [Online]. Available :

<http://vessel-chemical.com/ซิงค์ออกไซด์-อาร์เอ/>

Xue Yu a , Bing Liu b and Yuewei Zhang. 2019. “**Effect of Si/Al ratio of high-silica HZSM-5 catalysts on the prins condensation of isobutylene and formaldehyde to isoprene.**”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

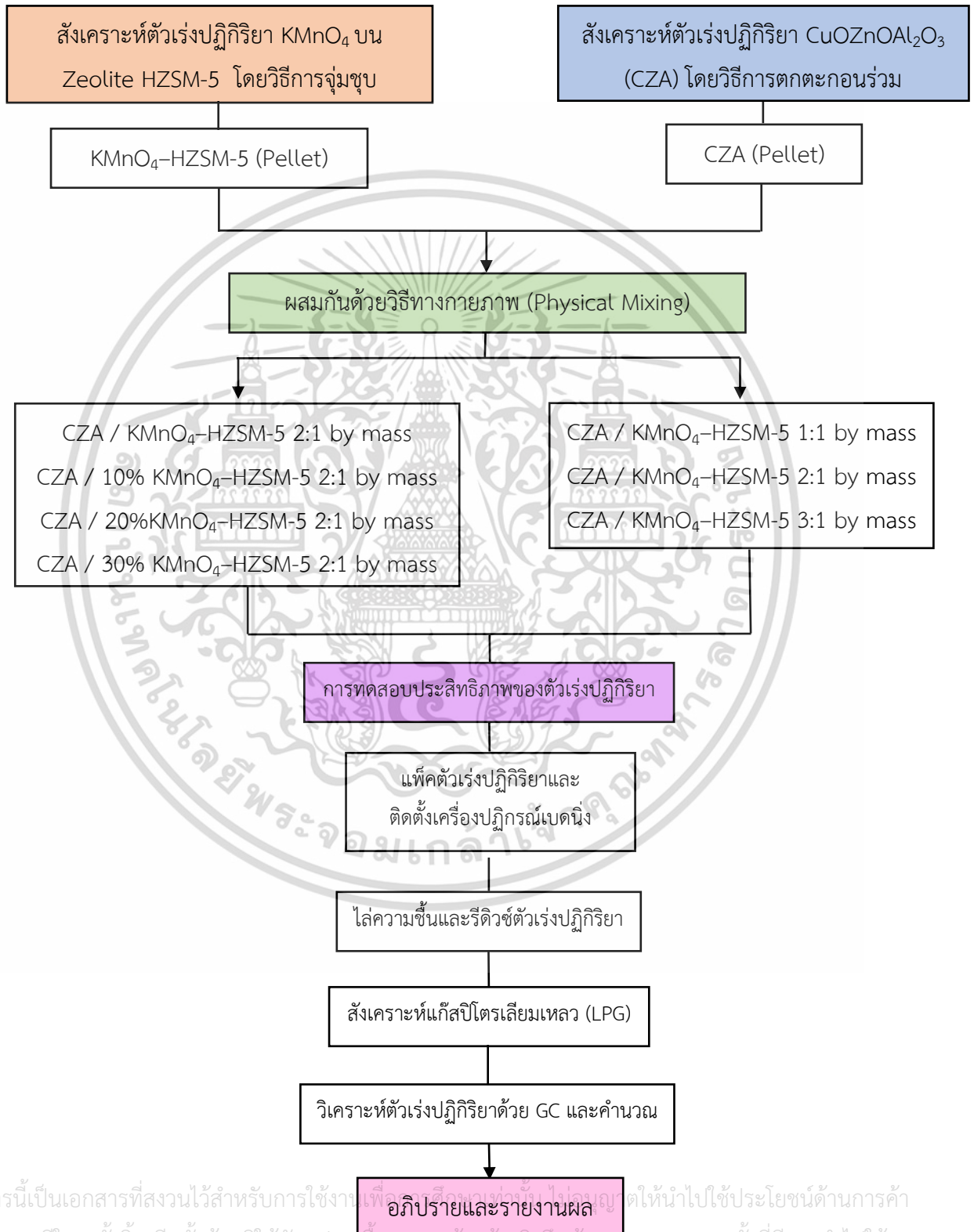


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

แผนการดำเนินการโครงการพิเศษ

ในโครงการพิเศษนี้ มีแผนการดำเนินการโดยมีขั้นตอน ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลอง

1. การคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

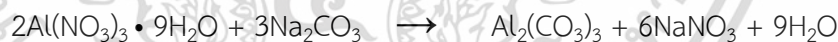
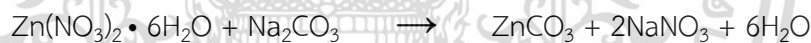
1.1 วิธีการคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนตัวรองรับ HZSM-5 ผสมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์

อัตราส่วนโดยมวลของ CZA : HZSM-5 , CZA : 10%KMnO₄-HZSM-5, CZA : 20%KMnO₄-HZSM-5 , CZA : 30%KMnO₄-HZSM-5 เท่ากับ 2:1 โดยน้ำหนัก

ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%KMnO₄-HZSM-5, 20%KMnO₄-HZSM-5, 30%KMnO₄-HZSM-5 ที่เตรียมได้มีมวลเท่ากับ 0.3300 กรัม

ดังนั้น จะต้องชั่ง CZA มา 0.1700 กรัม

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuOZnOAl₂O₃) ในอัตราส่วน CuO:ZnO:Al₂O₃ เป็น 2:2:1 โดยโมล ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมกับ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



1.2 การคำนวณหาน้ำหนักคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต (Cu(NO₃)₂ · 3H₂O)

มวลโมเลกุลคอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuOZnOAl₂O₃) 262.89 g/mol

มวลโมเลกุลคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต (Cu(NO₃)₂ · 3H₂O) 241.60 g/mol

มวลโมเลกุลคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) 79.55 g/mol

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \text{mol}_{\text{CuO}} &= \frac{g_{\text{CuO}}}{Mw_{\text{CuO}}} = \frac{g_{\text{want}}}{Mw_{\text{CuOZnOAl}_2\text{O}_3}} \\ &= \frac{g_{\text{CuO}}}{79.55 \text{ g/mol}} = \frac{2 \text{ g}}{262.89 \text{ g/mol}} \end{aligned}$$

$$g_{\text{CuO}} = 0.6052 \text{ g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{0.6052 \text{ g}}{79.55 \text{ g/mol}}$$

$$= 0.0076 \text{ mol}$$

จาก $mol_{CuO} = \frac{g_{Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O}}{Mw_{Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O}}$

$$0.0076 \text{ mol} = \frac{g_{Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O}}{241.60 \text{ g/mol}}$$

$$g_{Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O} = 1.8362 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต 1.8362 กรัม

1.3 การคำนวณหาน้ำหนักซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)

มวลโมเลกุลซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) 297.46 g/mol

มวลโมเลกุลซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 81.38 g/mol

จาก $mol_{ZnO} = \frac{g_{ZnO}}{Mw_{ZnO}} = \frac{g_{want}}{Mw_{CuOZnOAl_2O_3}}$

$$\frac{g_{ZnO}}{81.38 \text{ g/mol}} = \frac{2 \text{ g}}{262.89 \text{ g/mol}}$$

จาก $g_{ZnO} = 0.6191 \text{ g}$

$$mol_{ZnO} = \frac{g_{ZnO}}{Mw_{ZnO}} = \frac{0.6191 \text{ g}}{81.38 \text{ g/mol}} = 0.0076 \text{ mol}$$

จาก $mol_{ZnO} = \frac{g_{Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O}}{Mw_{Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O}}$

$$0.0076 \text{ mol} = \frac{g_{Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O}}{297.46 \text{ g/mol}}$$

$$g_{Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O} = 2.2607 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 2.2607 กรัม

1.4 การคำนวณหาน้ำหนักอะลูมิเนียมไนเตรตโนนะไฮเดรต ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$)

มวลโมเลกุลอะลูมิเนียมไนเตรตโนนะไฮเดรต ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) 375.13 g/mol

มวลโมเลกุลอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 101.96 g/mol

จาก $mol_{Al_2O_3} = \frac{g_{Al_2O_3}}{Mw_{Al_2O_3}} = \frac{g_{want}}{Mw_{CuOZnOAl_2O_3}}$

$$\frac{g_{Al_2O_3}}{101.96 \text{ g/mol}} = \frac{1 \text{ g}}{262.89 \text{ g/mol}}$$

$$g_{Al_2O_3} = 0.3878 \text{ g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จาก $mol_{Al_2O_3} = \frac{g_{Al_2O_3}}{Mw_{Al_2O_3}}$ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{0.3878 \text{ g}}{101.96 \text{ g/mol}}$$

$$= 0.0038 \text{ mol}$$

จาก $mol_{Al_2O_3} = 2 \times \frac{g_{Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O}}{Mw_{Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O}}$

$$0.0038 \text{ mol} = 2 \times \frac{g_{Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O}}{375.13 \text{ g/mol}}$$

$$g_{Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O} = 0.7127 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งอะลูมิเนียมไนเตรตโนนอะไฮเดรต 0.7127 กรัม

1.5 การคำนวณหาน้ำหนักโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

มวลโมเลกุลโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 105.98 g/mol

$$mol_{Na_2CO_3} = mol_{CuO} + mol_{ZnO} + mol_{Al_2O_3}$$

$$= 0.0076 + 0.0076 + 0.0038$$

$$= 0.019 \text{ mol}$$

จาก $mol_{Na_2CO_3} = \frac{g_{Na_2CO_3}}{Mw_{Na_2CO_3}}$

$$0.019 \text{ mol} = \frac{g_{Na_2CO_3}}{105.98 \text{ g/mol}}$$

$$g_{Na_2CO_3} = 2.0136 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งโซเดียมคาร์บอเนต 2.0136 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

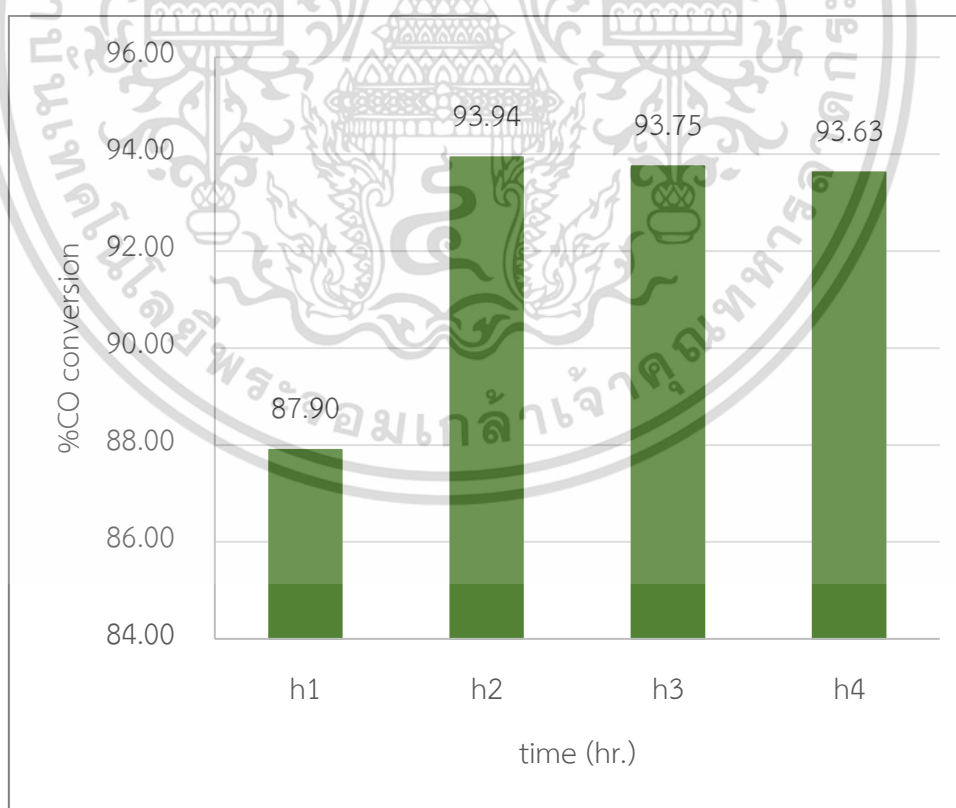
ผลการทดลอง

1.การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมง-
กานาเตบนซีโอไลต์ HZSM-5 แตกต่างกันผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์
ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA)

ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion)

ตารางที่ ค.1 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของ
ตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5

ชั่วโมงที่	%CO conversion
1	87.90
2	93.94
3	93.75
4	93.63

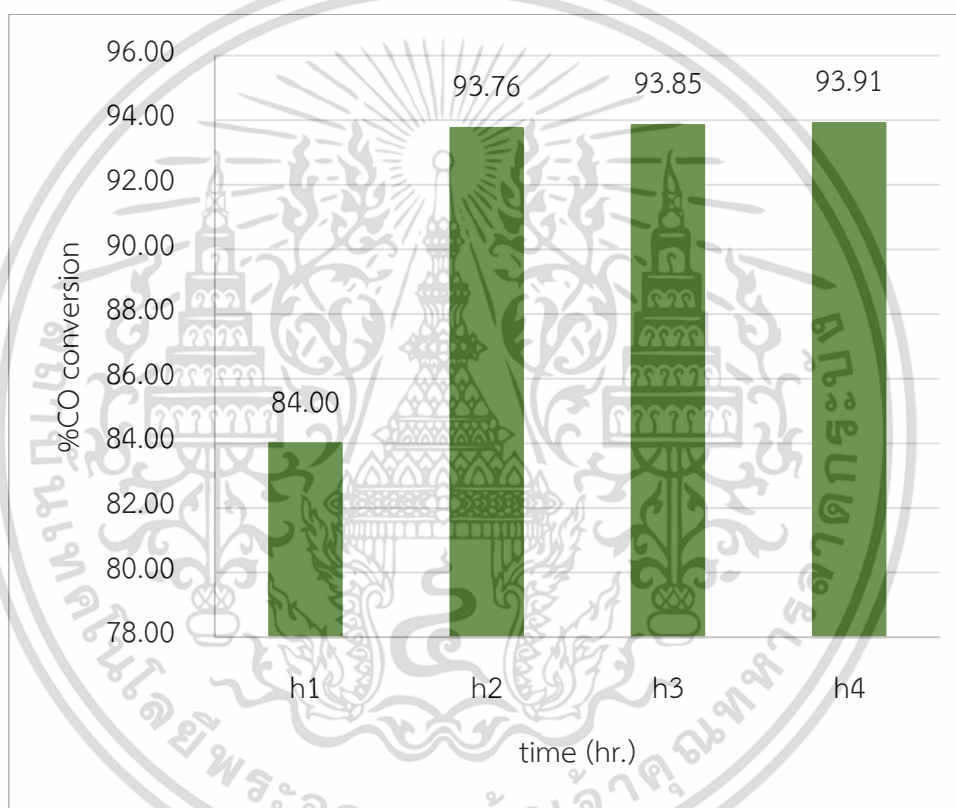


รูปที่ ค.1 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่ง
ปฏิกิริยา CZA/HZSM-5

ไม่ว่าการพิมพ์นี้ให้ข้อมูลที่มีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO₄-HZSM-5

ชั่วโมงที่	%CO conversion
1	78.15
2	91.68
3	91.30
4	90.97

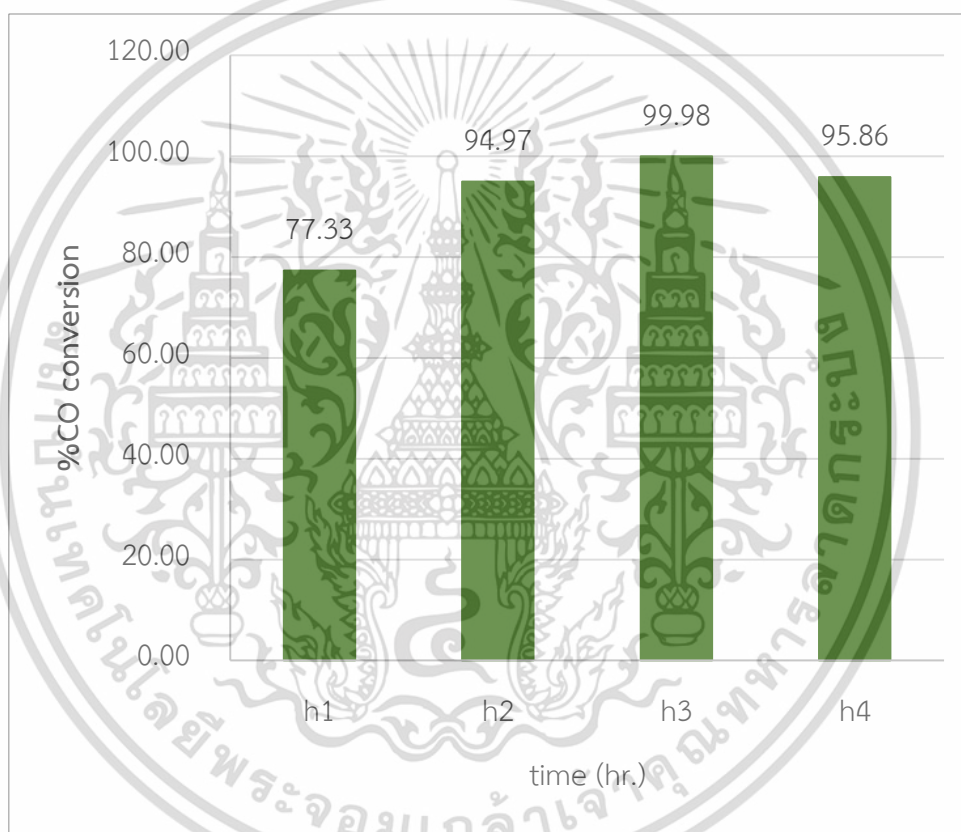


รูปที่ ค.2 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO₄-HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO₄-HZSM-5

ชั่วโมงที่	%CO conversion
1	77.34
2	94.97
3	99.98
4	95.86

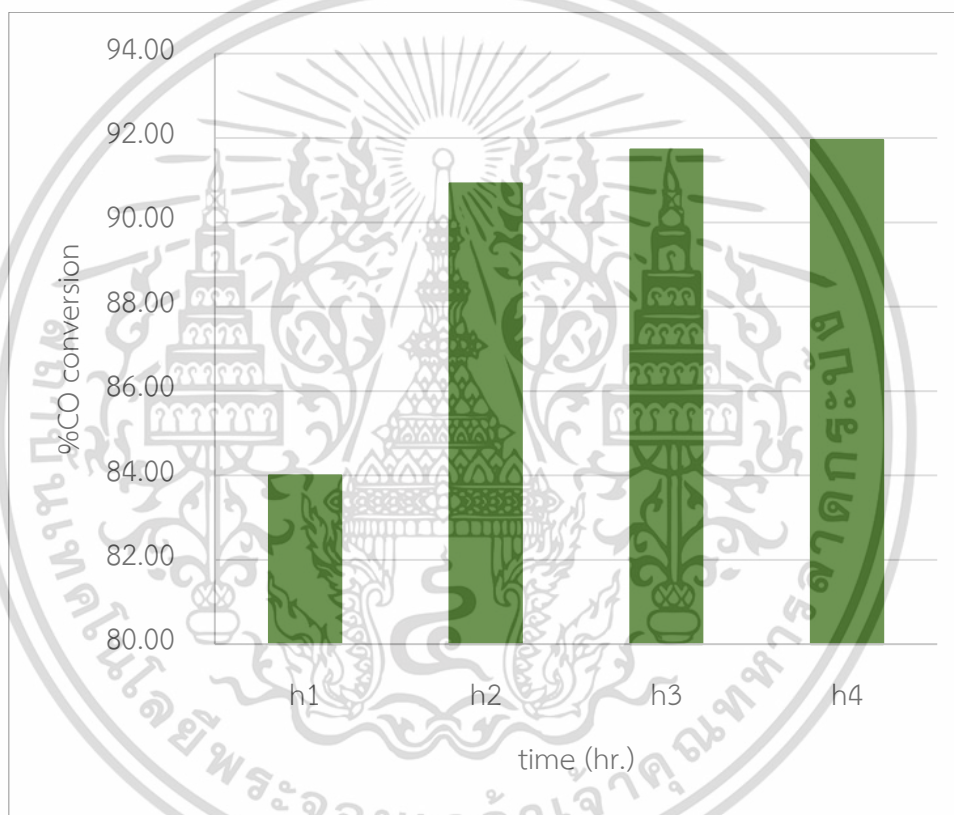


รูปที่ ค.3 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO₄-HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO₄-HZSM-5

ชั่วโมงที่	%CO conversion
1	84.00
2	90.92
3	91.73
4	91.95



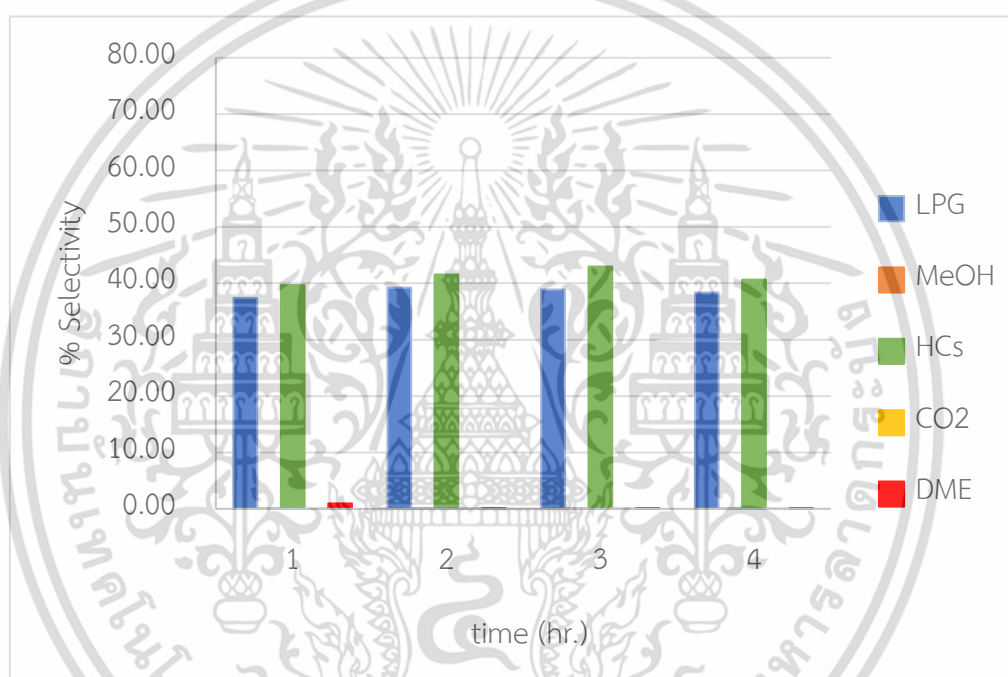
รูปที่ ค.4 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO₄-HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity)

ตารางที่ ค.5 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5

ชั่วโมงที่	%Selectivity					
	LPG	Hydrocarbon	C1	DME	MeOH	CO ₂
1	37.39	39.66	21.90	0.97	0.03	0.05
2	39.21	41.56	18.81	0.14	0.02	0.02
3	38.89	42.96	17.84	0.11	0.02	0.02
4	38.37	40.64	20.73	0.09	0.01	0.02

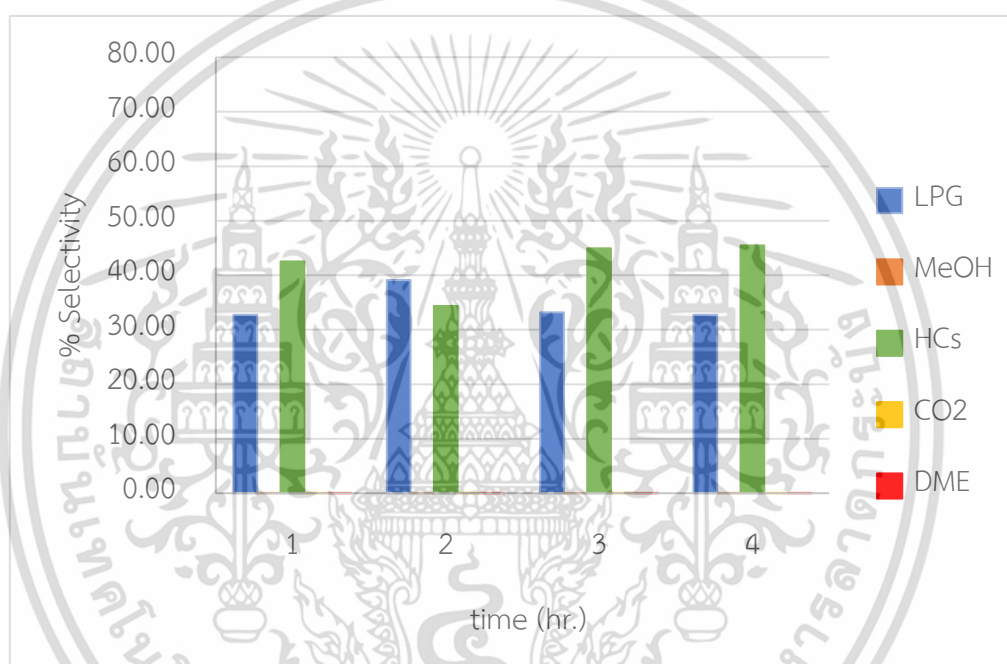


รูปที่ ค.5 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO₄-HZSM-5

ชั่วโมงที่	%Selectivity				
	LPG	Hydrocarbon	DME	MeOH	CO ₂
1	32.73	42.54	0.028	0.04	0.05
2	39.10	34.39	0.006	0.04	0.02
3	33.17	44.92	0.002	0.04	0.02
4	32.73	45.49	0.001	0.04	0.02

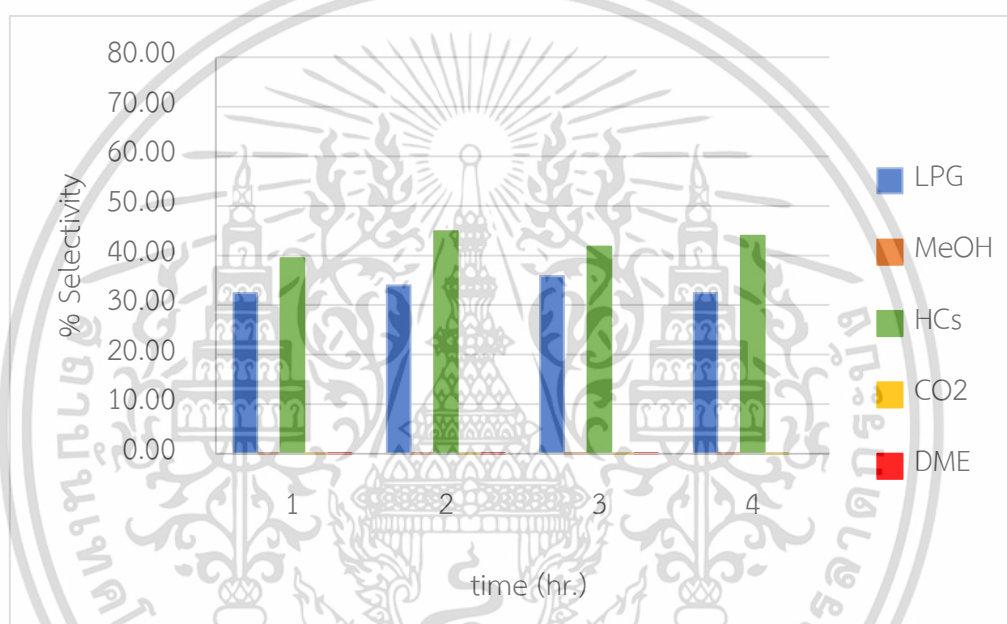


รูปที่ ค.6 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO₄-HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO₄-HZSM-5

ชั่วโมงที่	%Selectivity				
	LPG	Hydrocarbon	DME	MeOH	CO ₂
1	29.72	42.71	0.013	0.07	0.009
2	34.22	43.96	0.001	0.04	0.003
3	36.14	40.65	0.0004	0.04	0.003
4	31.25	45.78	0.007	0.91	0.003

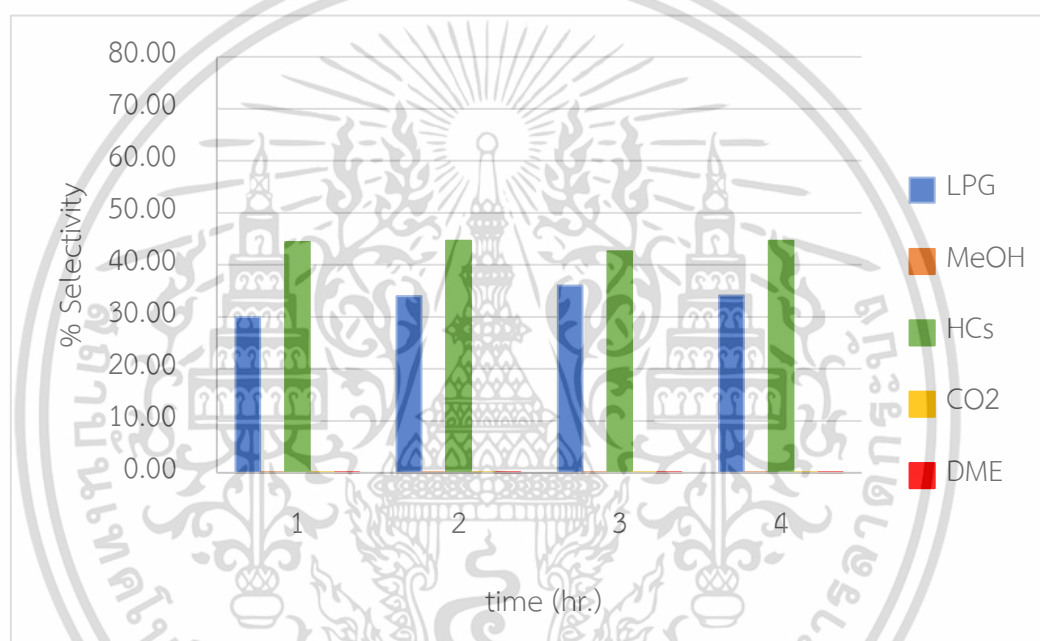


รูปที่ ค.7 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO₄-HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO₄-HZSM-5

ชั่วโมงที่	%Selectivity				
	LPG	Hydrocarbon	DME	MeOH	CO ₂
1	29.98	44.42	0.020	0.07	0.05
2	34.00	44.63	0.003	0.05	0.03
3	36.01	42.60	0.002	0.05	0.02
4	34.11	44.64	0.001	0.06	0.02



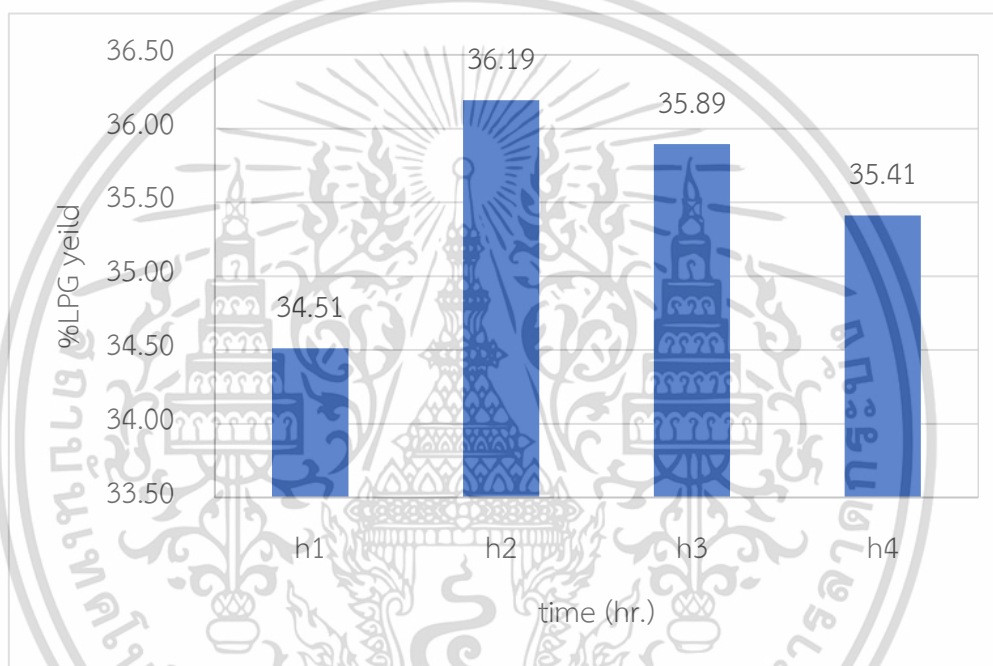
รูปที่ ค.8 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO₄-HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าร้อยละผลิตภัณฑ (%LPG Yield)

ตารางที่ ค.9 ค่าร้อยละผลิตภัณฑของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5

ชั่วโมงที่	%LPG Yield
1	34.51
2	36.19
3	35.89
4	35.41

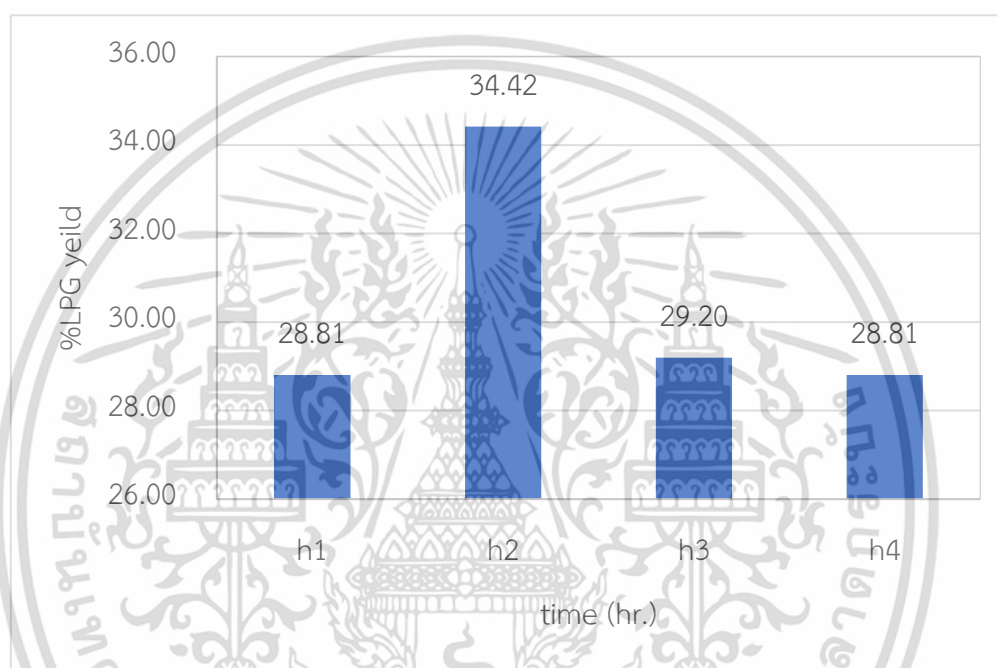


รูปที่ ค.9 ค่าร้อยละผลิตภัณฑของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO₄-HZSM-5

ชั่วโมงที่	%LPG Yield
1	28.81
2	34.42
3	29.20
4	28.81

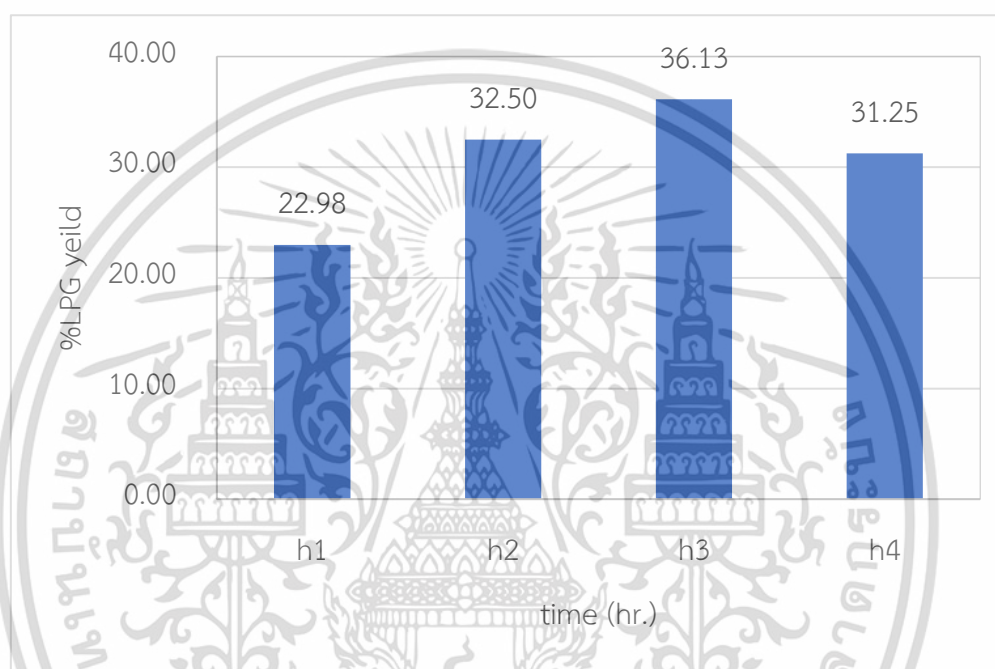


รูปที่ ค.10 ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/10%KMnO₄-HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.11 ค่าร้อยละผลิตภัณฑของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO₄-HZSM-5

ชั่วโมงที่	%LPG Yield
1	22.98
2	32.50
3	36.13
4	31.25

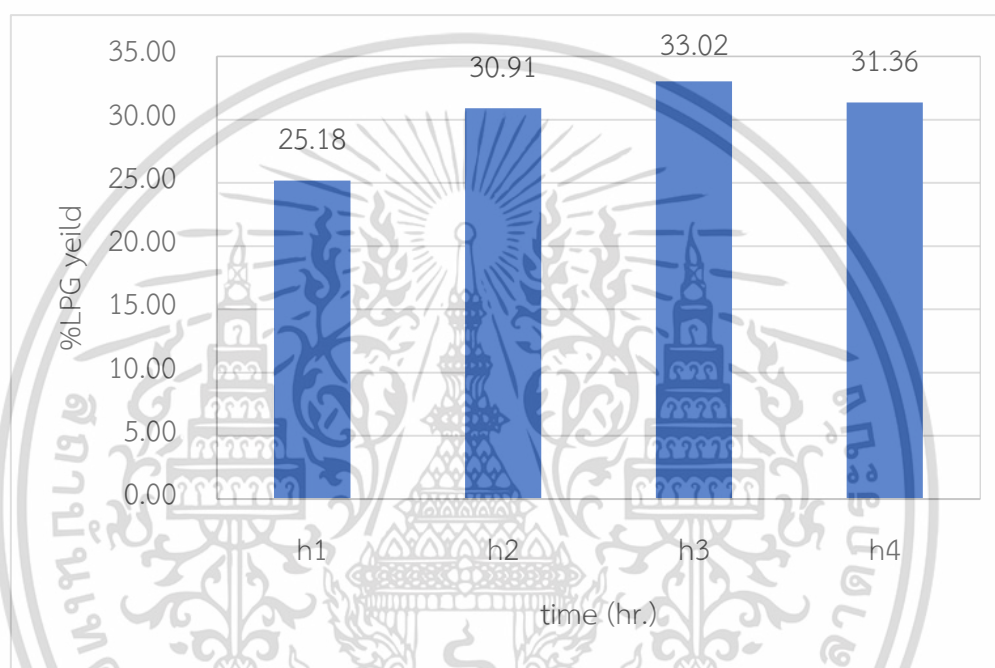


รูปที่ ค.11 ค่าร้อยละผลิตภัณฑของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/20%KMnO₄-HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO₄-HZSM-5

ชั่วโมงที่	%LPG Yield
1	25.18
2	30.91
3	33.02
4	31.36



รูปที่ ค.12 ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/30%KMnO₄-HZSM-5

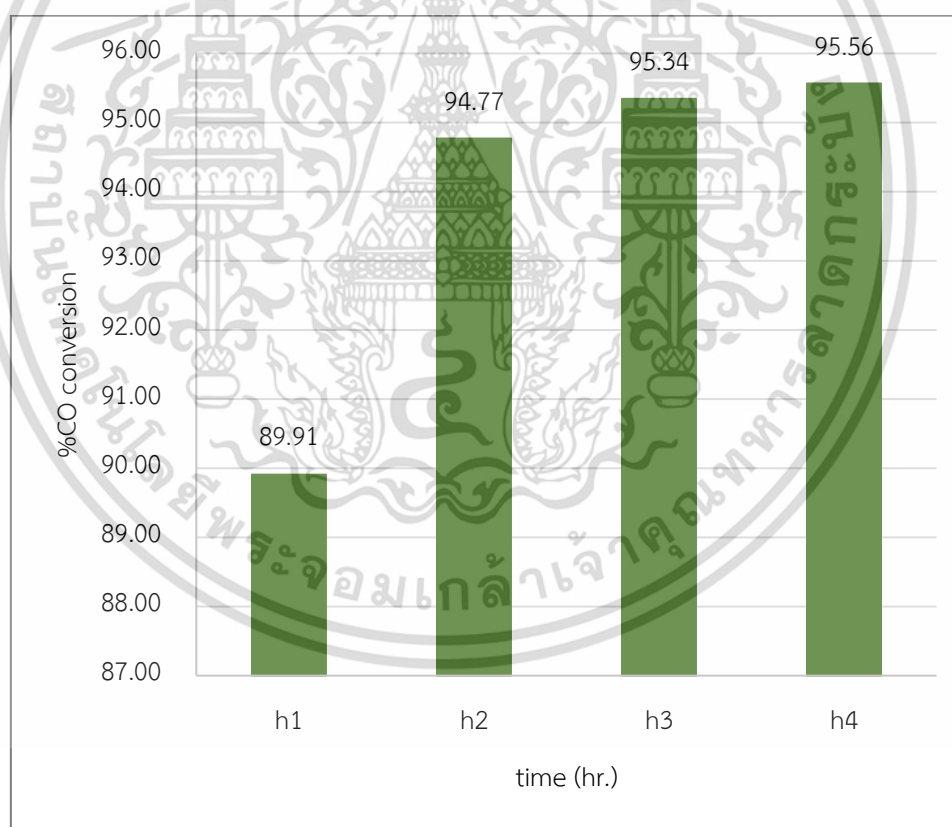
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ ออกไซด์ซึ่งค้อออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ (CZA) กับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่แตกต่างกัน

ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion)

ตารางที่ ค.13 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม)

ชั่วโมงที่	%CO conversion
1	89.91
2	94.77
3	95.34
4	95.56

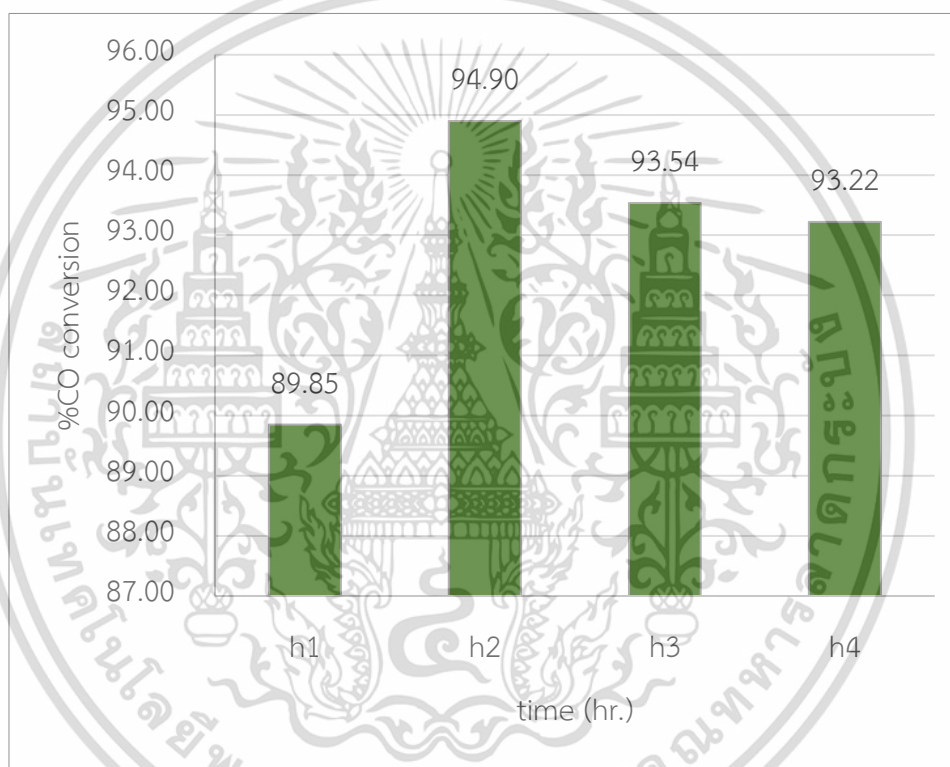


รูปที่ ค.13 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.14 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม)

ชั่วโมงที่	%CO conversion
1	89.85
2	94.90
3	93.54
4	93.22

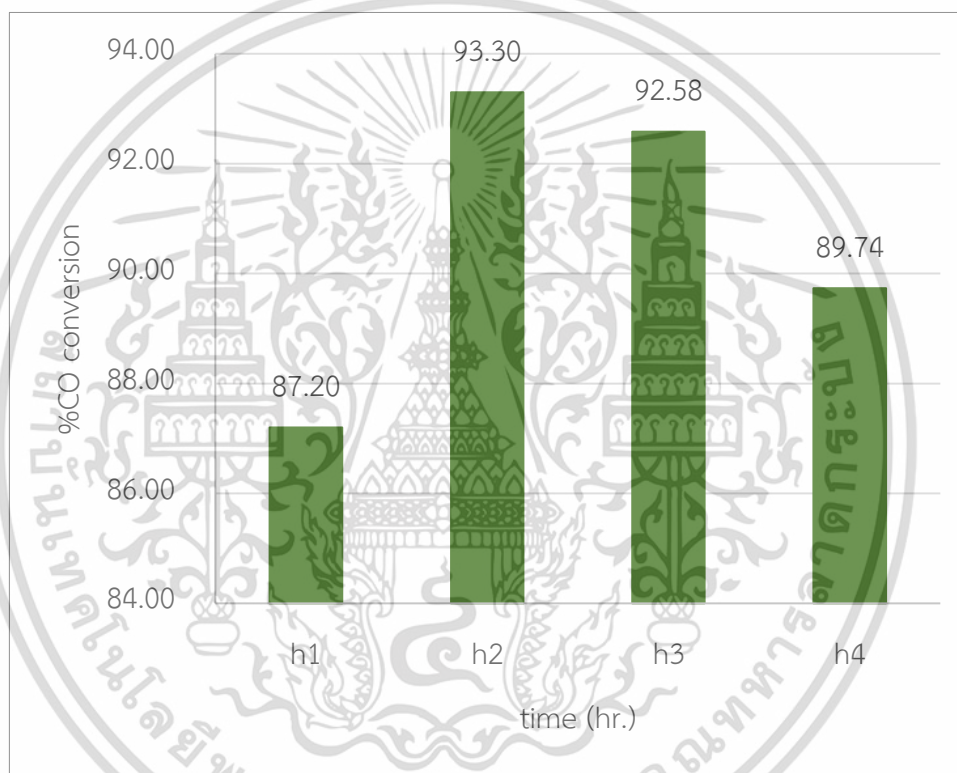


รูปที่ ค.14 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.15 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

ชั่วโมงที่	%CO conversion
1	87.20
2	93.30
3	92.58
4	89.74



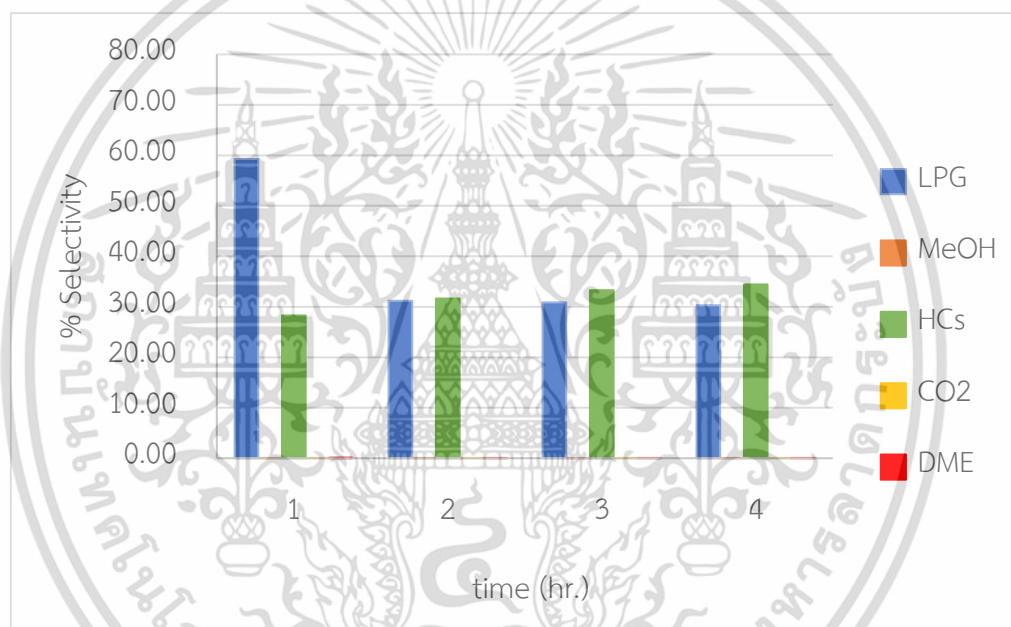
รูปที่ ค.15 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity)

ตารางที่ ค.16 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม)

ชั่วโมงที่	%Selectivity					
	LPG	Hydrocarbon	C1	DME	MeOH	CO ₂
1	59.30	28.28	12.23	0.16	0.03	0.004
2	31.17	31.63	10.53	0.04	0.03	0.001
3	30.88	33.31	10.52	0.02	0.02	0.002
4	30.29	34.41	10.73	0.02	0.03	0.001

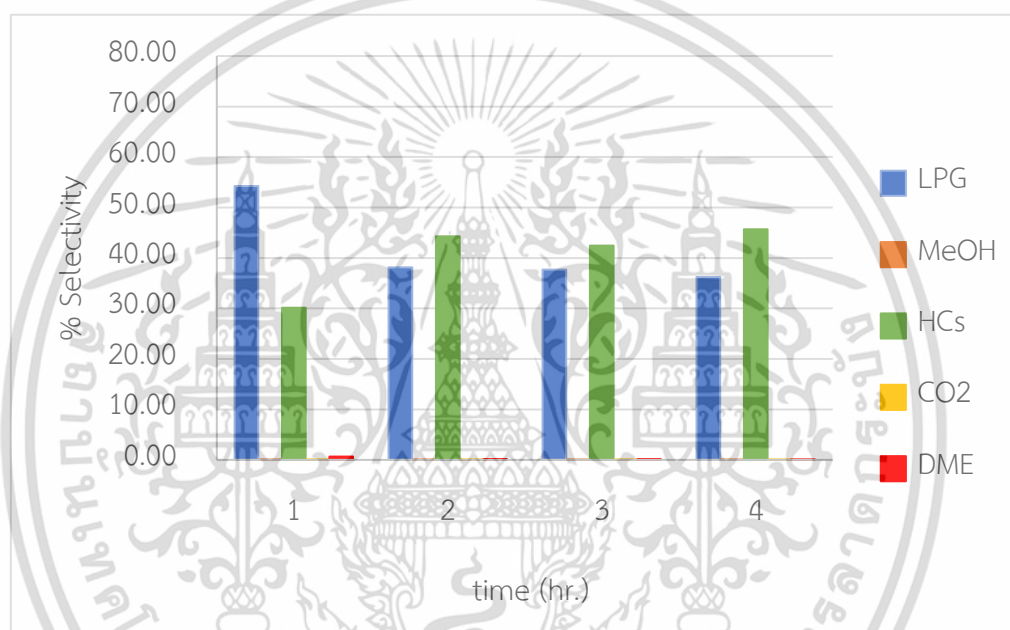


รูปที่ ค.16 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.17 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม)

ชั่วโมงที่	%Selectivity				
	LPG	Hydrocarbon	DME	MeOH	CO ₂
1	54.26	30.17	0.67	0.03	0.05
2	38.11	44.30	0.18	0.03	0.01
3	37.70	42.46	0.11	0.02	0.01
4	36.23	45.70	0.09	0.03	0.01

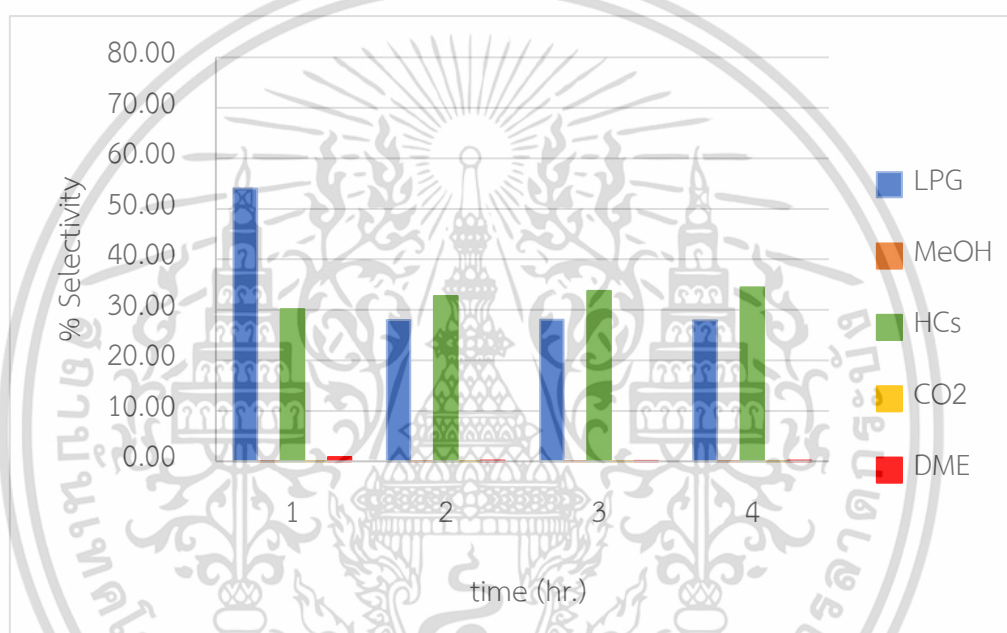


รูปที่ ค.17 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.18 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

ชั่วโมงที่	%Selectivity				
	LPG	Hydrocarbon	DME	MeOH	CO ₂
1	54.03	30.14	0.86	0.03	0.01
2	27.98	32.73	0.16	0.03	0.01
3	28.03	33.75	0.10	0.03	0.01
4	27.90	34.46	0.16	0.03	0.02



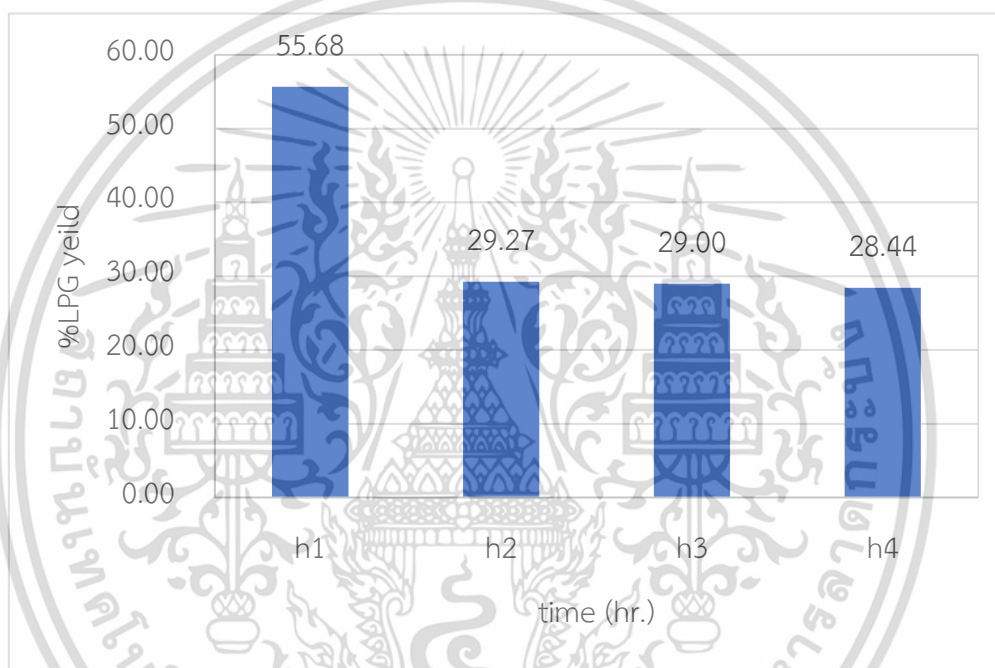
รูปที่ ค.18 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าร้อยละผลิตภัณฑ (%LPG Yield)

ตารางที่ ค.19 ค่าร้อยละผลิตภัณฑของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม)

ชั่วโมงที่	%LPG Yield
1	55.68
2	29.27
3	29.00
4	28.44

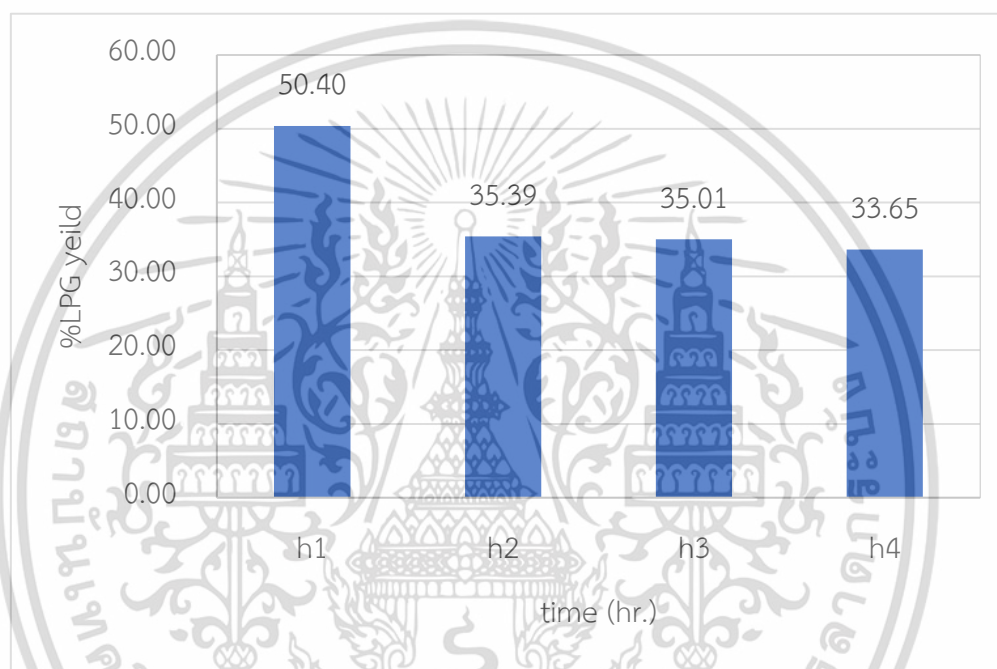


รูปที่ ค.19 ค่าร้อยละผลิตภัณฑของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 CZA/HZSM-5 (0.2500:0.2500 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.20 ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม)

ชั่วโมงที่	%LPG Yield
1	50.40
2	35.39
3	35.01
4	33.65

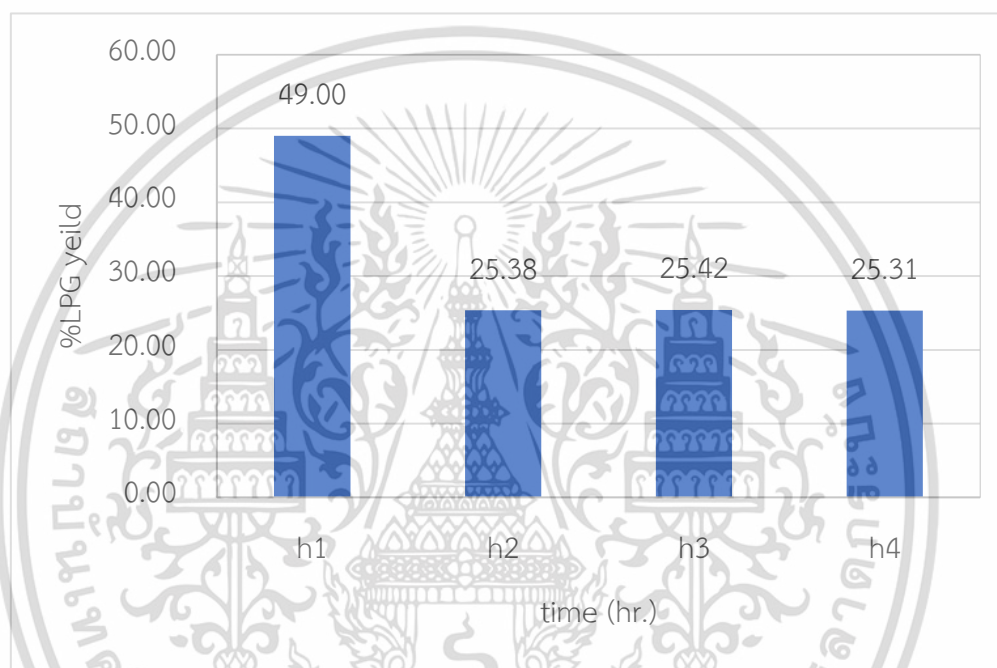


รูปที่ ค.20 ค่าร้อยละผลผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 CZA/HZSM-5 (0.3300:0.1700 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.21 ค่าร้อยละผลิตภัณฑของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

ชั่วโมงที่	%LPG Yield
1	49.00
2	25.38
3	25.42
4	25.31



รูปที่ ค.21 ค่าร้อยละผลิตภัณฑของตัวเร่งปฏิกิริยา 3:1 CZA/HZSM-5 (0.3750:0.1250 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%selectivity)

1. ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG selectivity)

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

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 ในการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวชั่วโมงที่ 1

ภายใต้สภาวะ

$$P = 0.9958 \text{ atm}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$R = 82.6 \text{ mLatm/kmol}$$

$$V_{in} = 20 \text{ mL/min}$$

จากสูตร

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

$$\begin{aligned} n(\text{syngas}) &= \frac{(0.9958 \text{ atm})(20 \text{ mL/min})}{(82.6 \text{ mLatm/kmol})(300 \text{ K})} \\ &= 0.00080371 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

จาก

$$C_n = \left[\frac{n(\text{syngas}) \times \left(\frac{\text{Area peak}}{\text{Standard peak}} \right)}{All \text{ products}} \right] \times n ; n = \text{numbers of carbon}$$

และ

$$All \text{ products} = \frac{\text{Total hydrocarbon area peak}}{\text{Standard peak}}$$

จะได้

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

$$C_1 = \left[\frac{0.00080371 \times 54067600}{117386274} \right] \times 1 = 0.000370185 \text{ mol/min}$$

$$C_2 = \left[\frac{0.00080371 \times 31940440}{117386274} \right] \times 2 = 0.0004403 \text{ mol/min}$$

$$C_3 = \left[\frac{0.00080371 \times 401241}{117386274} \right] \times 3 = 0.00008296 \text{ mol/min}$$

$$C_4 = \left[\frac{0.00080371 \times 22776649}{117386274} \right] \times 4 = 0.0006279 \text{ mol/min}$$

$$C_5 = \left[\frac{0.00080371 \times 6808849}{117386274} \right] \times 5 = 0.0002346 \text{ mol/min}$$

$$CO_2 = \left[\frac{0.00080371 \times 123790}{117386274} \right] \times 1 = 0.000008531 \text{ mol/min}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$MeOH = \left[\frac{0.00080371 \times 71119}{117386274} \right] \times 1 = 0.0000004901 \text{ mol/min}$$

$$2DME = \left[\frac{0.00080371 \times 1196586}{117386274} \right] \times 2 = 0.00001649 \text{ mol/min}$$

จากสูตร $\%LPG \text{ Selectivity} = \frac{LPG}{All \ products} \times 100$

$$= \frac{(829.6+627.9) \times 10^{-6} \text{ mol/min}}{(440.3+370.185+82.96+627.9+234.6+0.8531+0.4901+16.49) \times 10^{-6} \text{ mol/min}} \times 100$$

$$= 37.3891 \%$$

ชั่วโมง ที่	Area peak (x 10 ⁻⁶)								%LPG Selectivity
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	CO ₂	MeOH	2DME	
1	372.62	440.25	8.30	627.89	234.63	0.09	0.49	0.002	37.39
2	347.89	408.30	4.44	725.26	360.39	0.04	0.04	2.55	39.21
3	338.74	398.59	3.25	738.59	417.32	0.04	0.04	2.01	38.89
4	367.12	419.48	2.71	679.48	300.26	0.03	0.02	1.53	38.37
Average									38.46

2. ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นเมทานอล (%MeOH Selectivity)

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

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 ในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวชั่วโมงที่ 1

ภายใต้สภาวะ

$$P = 0.9958 \text{ atm} \quad T = 300 \text{ K}$$

$$R = 82.6 \text{ mLatm/kmol} \quad V_{in} = 20 \text{ mL/min}$$

จาก $C_n = \left[\frac{n \text{ (syngas)} \times \left(\frac{Area \ peak}{Standard \ peak} \right)}{All \ products} \right] \times n$; n = numbers of carbon

และ $All \ products = \frac{Total \ hydrocarbon \ area \ peak}{Standard \ peak}$

จะได้ $C_n = \left[\frac{n \text{ (syngas)} \times (Area \ peak)}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + CO_2 + MeOH + 2DME} \right] \times n$

จากสูตร $MeOH = \left[\frac{n \text{ (syngas)} \times \left(\frac{Area \ peak}{Standard \ peak} \right)}{All \ products} \right]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโท ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_1 = \left[\frac{0.00080371 \times 54067600}{117386274} \right] \times 1 = 0.000370185 \text{ mol/min}$$

$$C_2 = \left[\frac{0.00080371 \times 31940440}{117386274} \right] \times 2 = 0.0004403 \text{ mol/min}$$

$$C_3 = \left[\frac{0.00080371 \times 401241}{117386274} \right] \times 3 = 0.00008296 \text{ mol/min}$$

$$C_4 = \left[\frac{0.00080371 \times 22776649}{117386274} \right] \times 4 = 0.0006279 \text{ mol/min}$$

$$C_5 = \left[\frac{0.00080371 \times 6808849}{117386274} \right] \times 5 = 0.0002346 \text{ mol/min}$$

$$CO_2 = \left[\frac{0.00080371 \times 123790}{117386274} \right] \times 1 = 0.0000008531 \text{ mol/min}$$

$$MeOH = \left[\frac{0.00080371 \times 71119}{117386274} \right] \times 1 = 0.0000004901 \text{ mol/min}$$

$$2DME = \left[\frac{0.00080371 \times 1196586}{117386274} \right] \times 2 = 0.00001649 \text{ mol/min}$$

จากสูตร $\%MeOH \text{ Selectivity} = \frac{MeOH}{All \ products} \times 100$

$$= \frac{0.4901 \times 10^{-6} \text{ mol/min}}{(440.3+370.185+82.96+627.9+234.6+0.8531+0.4901+16.49) \times 10^{-6} \text{ mol/min}} \times 100$$

$$= 0.0288058 \%$$

ชั่วโมง ที่	Area peak ($\times 10^{-6}$)								%MeOH Selectivity
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	CO ₂	MeOH	2DME	
1	372.62	440.25	8.30	627.89	234.63	0.09	0.49	0.002	0.03
2	347.89	408.30	4.44	725.26	360.39	0.04	0.03	2.57	0.02
3	338.74	398.59	3.25	738.59	417.32	0.04	0.04	2.01	0.02
4	367.12	419.48	2.71	679.48	300.26	0.03	0.02	1.53	0.01
Average									0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity)

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

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 ในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวชั่วโมงที่ 1

ภายใต้สภาวะ $P = 0.9958 \text{ atm}$ $T = 300 \text{ K}$

$R = 82.6 \text{ mLatm/kmol}$ $V_{in} = 20 \text{ mL/min}$

จาก $C_n = \left[\frac{n(\text{syngas}) \times \left(\frac{\text{Area peak}}{\text{Standard peak}} \right)}{\text{All products}} \right] \times n$; $n = \text{numbers of carbon}$

และ $\text{All products} = \frac{\text{Total hydrocarbon area peak}}{\text{Standard peak}}$

จะได้ $C_n = \left[\frac{n(\text{syngas}) \times (\text{Area peak})}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + CO_2 + MeOH + 2DME} \right] \times n$

จากสูตร $DME = \left[\frac{n(\text{syngas}) \times \left(\frac{\text{Area peak}}{\text{Standard peak}} \right)}{\text{All products}} \right]$

$$C_1 = \left[\frac{0.00080371 \times 54067600}{117386274} \right] \times 1 = 0.000370185 \text{ mol/min}$$

$$C_2 = \left[\frac{0.00080371 \times 31940440}{117386274} \right] \times 2 = 0.0004403 \text{ mol/min}$$

$$C_3 = \left[\frac{0.00080371 \times 401241}{117386274} \right] \times 3 = 0.00008296 \text{ mol/min}$$

$$C_4 = \left[\frac{0.00080371 \times 22776649}{117386274} \right] \times 4 = 0.0006279 \text{ mol/min}$$

$$C_5 = \left[\frac{0.00080371 \times 6808849}{117386274} \right] \times 5 = 0.0002346 \text{ mol/min}$$

$$CO_2 = \left[\frac{0.00080371 \times 123790}{117386274} \right] \times 1 = 0.0000008531 \text{ mol/min}$$

$$MeOH = \left[\frac{0.00080371 \times 71119}{117386274} \right] \times 1 = 0.0000004901 \text{ mol/min}$$

$$2DME = \left[\frac{0.00080371 \times 1196586}{117386274} \right] \times 2 = 0.00001649 \text{ mol/min}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{0.016493 \times 10^{-6} \text{ mol/min}}{(440.3+370.185+82.96+627.9+234.6+0.8531+0.4901+16.49) \times 10^{-6} \text{ mol/min}} \times 100$$

$$= 0.9693 \%$$

ชั่วโมง ที่	Area peak ($\times 10^{-6}$)								%DME Selectivity
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	CO ₂	MeOH	2DME	
1	372.62	440.25	8.30	627.89	234.63	0.09	0.49	0.001	0.97
2	347.89	408.30	4.44	725.26	360.39	0.04	0.04	2.57	0.14
3	338.74	398.59	3.25	738.59	417.32	0.04	0.04	2.01	0.11
4	367.12	419.48	2.71	679.48	300.26	0.03	0.02	1.53	0.09
Average									0.33

4. ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอน (%HC Selectivity)

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

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 ในการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวชั่วโมงที่ 1

ภายใต้สภาวะ P = 0.9958 atm T = 300 K

R = 82.6 mLatm/kmol V_{in} = 20 ml/min

จาก $C_n = \left[\frac{n(\text{syngas}) \times \left(\frac{\text{Area peak}}{\text{Standard peak}} \right)}{\text{All products}} \right] \times n$; n = numbers of carbon

และ $\text{All products} = \frac{\text{Total hydrocarbon area peak}}{\text{Standard peak}}$

จะได้ $C_n = \left[\frac{n(\text{syngas}) \times (\text{Area peak})}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + \text{CO}_2 + \text{MeOH} + 2\text{DME}} \right] \times n$

$$C_1 = \left[\frac{0.00080371 \times 54067600}{117386274} \right] \times 1 = 0.000370185 \text{ mol/min}$$

$$C_2 = \left[\frac{0.00080371 \times 31940440}{117386274} \right] \times 2 = 0.0004403 \text{ mol/min}$$

$$C_3 = \left[\frac{0.00080371 \times 401241}{117386274} \right] \times 3 = 0.00008296 \text{ mol/min}$$

$$C_4 = \left[\frac{0.00080371 \times 22776649}{117386274} \right] \times 4 = 0.0006279 \text{ mol/min}$$

$$C_5 = \left[\frac{0.00080371 \times 6808849}{117386274} \right] \times 5 = 0.0002346 \text{ mol/min}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$CO_2 = \left[\frac{0.00080371 \times 123790}{117386274} \right] \times 1 = 0.0000008531 \text{ mol/min}$$

$$MeOH = \left[\frac{0.00080371 \times 71119}{117386274} \right] \times 1 = 0.0000004901 \text{ mol/min}$$

$$2DME = \left[\frac{0.00080371 \times 1196586}{117386274} \right] \times 2 = 0.00001649 \text{ mol/min}$$

จากสูตร $\%HC \text{ Selectivity} = \frac{\text{All Hydrocarbons}}{\text{All products}} \times 100$

$$= \frac{(370.185+82.96+627.9+234.6) \times 10^{-6} \text{ mol/min}}{(440.3+370.185+82.96+627.9+234.6+0.8531+0.4901+16.49) \times 10^{-6} \text{ mol/min}} \times 100$$

$$= 39.6633 \%$$

ชั่วโมง ที่	Area peak ($\times 10^6$)								%HC Selectivity
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	CO ₂	MeOH	2DME	
1	368.95	333.42	549.98	297.93	51.62	0.001	0.002	1.02	39.66
2	363.29	325.05	537.07	331.77	82.21	0.001	0.035	0.10	41.56
3	483.83	250.78	519.12	75.53	15.51	0.003	0.013	0.04	42.96
4	435.53	342.66	461.43	160.33	17.64	0.001	0.008	0.03	40.64
Average									41.21

5. ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นมีเทน (%C1 Selectivity)

$$\%HC \text{ Selectivity} = \frac{C1 \text{ moles produced}}{\text{All products (moles)}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปีโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 ในการสังเคราะห์แก๊สปีโตรเลียมเหลวชั่วโมงที่ 1

ภายใต้สภาวะ $P = 0.9958 \text{ atm}$ $T = 300 \text{ K}$

$R = 82.6 \text{ mLatm/kmol}$ $V_{in} = 20 \text{ mL/min}$

จาก $C_n = \left[\frac{n(\text{syngas}) \times \left(\frac{\text{Area peak}}{\text{Standard peak}} \right)}{\text{All products}} \right] \times n$; $n = \text{numbers of carbon}$

และ $\text{All products} = \frac{\text{Total hydrocarbon area peak}}{\text{Standard peak}}$

จะได้ $C_n = \left[\frac{n(\text{syngas}) \times (\text{Area peak})}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + CO_2 + MeOH + 2DME} \right] \times n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร

$$C_1 = \left[\frac{0.00080371 \times 54067600}{117386274} \right] \times 1 = 0.000370185 \text{ mol/min}$$

$$C_2 = \left[\frac{0.00080371 \times 31940440}{117386274} \right] \times 2 = 0.0004403 \text{ mol/min}$$

$$C_3 = \left[\frac{0.00080371 \times 401241}{117386274} \right] \times 3 = 0.00008296 \text{ mol/min}$$

$$C_4 = \left[\frac{0.00080371 \times 22776649}{117386274} \right] \times 4 = 0.0006279 \text{ mol/min}$$

$$C_5 = \left[\frac{0.00080371 \times 6808849}{117386274} \right] \times 5 = 0.0002346 \text{ mol/min}$$

$$CO_2 = \left[\frac{0.00080371 \times 123790}{117386274} \right] \times 1 = 0.0000008531 \text{ mol/min}$$

$$MeOH = \left[\frac{0.00080371 \times 71119}{117386274} \right] \times 1 = 0.0000004901 \text{ mol/min}$$

$$2DME = \left[\frac{0.00080371 \times 1196586}{117386274} \right] \times 2 = 0.00001649 \text{ mol/min}$$

จากสูตร

$$\%C1 \text{ Selectivity} = \frac{C_1}{\text{All products}} \times 100$$

$$= \frac{440.3 \times 10^{-6} \text{ mol/min}}{(440.3 + 370.185 + 82.96 + 627.9 + 234.6 + 0.8531 + 0.4901 + 16.49) \times 10^{-6} \text{ mol/min}} \times 100$$

$$= 21.8994 \%$$

ชั่วโมง ที่	Area peak ($\times 10^{-6}$)								%HC Selectivity
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	CO ₂	MeOH	2DME	
1	368.95	333.42	549.98	297.93	51.62	0.001	0.002	1.022	21.90
2	363.29	325.05	537.07	331.77	82.21	0.001	0.035	0.103	18.81
3	483.83	250.78	519.12	75.53	15.51	0.003	0.013	0.038	17.84
4	435.53	342.66	461.43	160.33	17.64	0.001	0.008	0.034	20.73
Average									18.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ (%yield)

1. ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (%LPG yield)

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

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวของตัวเร่งปฏิกิริยา CZA/HZSM-5 ในการสังเคราะห์แก๊สปิโตรเลียมเหลวชั่วโมงที่ 1

ภายใต้สภาวะ $P = 0.9958 \text{ atm}$ $T = 300 \text{ K}$
 $R = 82.6 \text{ mLatm/kmol}$ $V_{in} = 20 \text{ mL/min}$

จากภาคผนวก ง %CO conversion = 92.3023 %

จากภาคผนวก จ %LPG selectivity = 37.3891 %

จากสูตร

$$\begin{aligned} \%LPG \text{ Yield} &= \frac{\%CO \text{ conversion} \times \%LPG \text{ selectivity}}{100} \\ &= \frac{92.3023 \times 38.4633}{100} \\ &= 32.8651 \% \end{aligned}$$

ชั่วโมงที่	%CO conversion	%LPG selectivity	%LPG yield
1	87.90	37.39	32.87
2	93.94	39.21	36.83
3	93.75	38.89	36.46
4	93.63	38.37	35.92
Average			35.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 21 เดือน มิถุนายน พ.ศ 2566

ข้าพเจ้า นางสาวจันจิรา จันทอน รหัสประจำตัว 62050262

นายพรมรินทร์ ทุยหล่อ รหัสประจำตัว 62050311

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี ขอรับรองว่าโครงการพิเศษเรื่อง ชื่อภาษาไทย ผลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตต่อการสังเคราะห์แก๊สหุงต้ม โดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่ง

ปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$

ชื่อภาษาอังกฤษ Effect of Potassium permanganate on synthesis of LPG directly from synthesis gas over $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ catalysts

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มิได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักษรวิสุทธิ 11.70 %

ลงชื่อ.....จันจิรา จันทอน.....

ลงชื่อ.....พรมรินทร์ ทุยหล่อ.....

(นางสาวจันจิรา จันทอน)

(นายพรมรินทร์ ทุยหล่อ)

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร. มนตรี ทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....
.....

ลงชื่อ.....-.....

ลงชื่อ.....-.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้