

การเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์
ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์บนเอชซีเอสเอ็มไฟว์และกราฟีน
เพื่อใช้สังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรงโดยใช้แก๊ส
สังเคราะห์

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF COPPER
OXIDE-ZINC OXIDE-ALUMINUM OXIDE ON HZSM-5 AND
GRAPHENE CATALYSTS FOR DIRECT DIMETHYL ETHER
SYNTHESIS FROM SYNGAS

พัชรี กิ่งเงิน
สหรัฐ ลายลักษณ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2561 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF COPPER
OXIDE-ZINC OXIDE-ALUMINUM OXIDE ON HZSM-5 AND
GRAPHENE CATALYSTS FOR DIRECT DIMETHYL ETHER
SYNTHESIS FROM SYNGAS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนเอชซีเอสเอ็มไฟว์และกราฟีนเพื่อใช้สังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรงโดยใช้แก๊สสังเคราะห์
Preparation and Characterization of Copper Oxide-Zinc Oxide-Aluminium Oxide on HZSM-5 and Graphene Catalysts for Direct Dimethyl Ether Synthesis from syngas

ชื่อนักศึกษา

นางสาวพัชรี กิ่งเงิน

รหัสนักศึกษา 58050511

นายสหรัฐ ลายลักษณ์

รหัสนักศึกษา 58050554

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2561

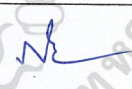


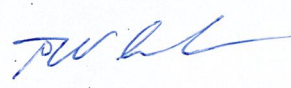
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ประธานกรรมการ	
ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตของทางสถาบันฯ

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนเอชซีเอสเอ็มไฟว์และกราฟีนเพื่อใช้สังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรงโดยใช้แก๊สสังเคราะห์	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพัชรี กิ่งเงิน	รหัสนักศึกษา 58050511
	นายสหรัฐ ลายลักษณ์	รหัสนักศึกษา 58050554
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
ปีการศึกษา	2561	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$) บนตัวรองรับที่ต่างกันทั้งหมด 2 ตัว ได้แก่ เอชซีเอสเอ็มไฟว์ (HZSM-5) และกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO) โดยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์ : ซิงค์ออกไซด์ : อะลูมิเนียมออกไซด์เท่ากับ 6 : 3 : 1 และอัตราส่วนโดยมวลระหว่างโลหะออกไซด์ : ตัวรองรับเท่ากับ 2 : 1 ซึ่งทำการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-Precipitation Method) เพื่อศึกษาผลกระทบในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl Ether, DME) จากแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) แล้วนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ขนาดผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD), วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยวิธี BET พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับเอชซีเอสเอ็มไฟว์ ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$) มีค่าพื้นที่ผิวสูงสุดคือ $180.40 \text{ m}^2/\text{g}$ และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองไปใช้ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับเอชซีเอสเอ็มไฟว์ ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$) ให้ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Yield) สูงที่สุดคือ 14.744 %

คำสำคัญ : กราฟีน การตกตะกอนร่วม คอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารได้เมทิลอีเทอร์ เอชซีเอสเอ็มไฟว์ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Preparation and Characterization of Copper Oxide-Zinc Oxide-Aluminium Oxide on HZSM-5 and Graphene Catalysts for Direct Dimethyl Ether Synthesis from Syngas	
Students	Miss Patcharee Kingngoen	Student ID 58050511
	Mr. Saharat Lailuck	Student ID 58050554
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2018	
Advisor	Asst. Prof. Dr. Montree Thongkam	
Co-advisor	Assoc. Prof. Dr. Somsak Woramongchai	

Abstract

This special project was studied preparation of copper oxide-zinc oxide-aluminium oxide ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$) catalyst on different supported sites between HZSM-5 and graphene oxide (GO). The mole ratio of copper oxide : zinc oxide : aluminium oxide was 6 : 3 : 1 and the mass ratio of this metal oxide : supported site was 2 : 1. This metal oxide was synthesized by co-precipitation method to study the effect of dimethyl ether (DME) synthesis from syngas. The crystalline size of catalysts were identified by X-ray Diffraction technique (XRD), morphology by Scanning Electron Microscope (SEM) and surface area by BET method which analyzed that copper oxide-zinc oxide-aluminium oxide on HZSM-5 supported catalyst ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$) dominated the most surface area of $180.40 \text{ m}^2/\text{g}$. When both catalysts were used in direct dimethyl ether synthesis, the results were shown that copper oxide-zinc oxide-aluminium oxide on HZSM-5 ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$) revealed the most %DME yield of 14.744 %

Keywords : Graphene, Co-precipitation, $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$, Dimethyl ether, HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องตลอดระยะเวลาที่ทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร และ ดร.ชาวลย์ ศรีวงษ์ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่สนับสนุนด้านการศึกษาตลอดเวลาที่ทำการศึกษา ตลอดจน เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน เป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

พัชรี กิ่งเงิน
สหรัฐ ลายลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl Ether).....	5
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของไดเมทิลอีเทอร์.....	5
2.1.2 กระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์.....	6
2.1.3 การนำไดเมทิลอีเทอร์ไปใช้ประโยชน์.....	7
2.1.4 การเผาไหม้ของไดเมทิลอีเทอร์.....	9
2.1.5 ข้อดีและข้อเสียของไดเมทิลอีเทอร์ในการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงใน เครื่องยนต์ดีเซล.....	10
2.1.6 ผลกระทบของไดเมทิลอีเทอร์ต่อสิ่งแวดล้อม.....	10
2.2 เมทานอล.....	11
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของเมทานอล.....	11
2.2.2 กระบวนการผลิตเมทานอล.....	12
2.2.3 พิษของเมทานอล.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 คอปเปอร์ออกไซด์.....	14
2.3.1 ลักษณะทั่วไปของคอปเปอร์ออกไซด์.....	14
2.4 ซิงค์ออกไซด์.....	14
2.4.1 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์.....	14
2.5 อะลูมิเนียมออกไซด์.....	15
2.5.1 สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมออกไซด์.....	15
2.6 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5.....	15
2.6.1 ลักษณะของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5.....	15
2.7 กราฟีน.....	16
2.7.1 ลักษณะของกราฟีน.....	16
2.8 เทคนิคสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	17
2.8.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD).....	17
2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	18
2.8.3 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุน โดยใช้ BET (The Brunauer-Emmett-Teller).....	20
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.9.1 Direct synthesis of dimethyl ether from syngas on CuO-ZnO- MnO/SAPO-18 Bifunctional catalyst.....	20
2.9.2 Low-Temperature methanol dehydration to dimethyl ether over various small-pore zeolites	21
2.9.3 Direct synthesis of dimethyl ether from synthesis gas: Experimental study and mathematical modeling.....	21
2.9.4 Effect of Metal Precursor on Cu/ZnO/Al ₂ O ₃ Synthesized by Flame Spray Pyrolysis for Direct DME Production.....	21

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีใดๆ
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 23
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	23
3.1.1 อุปกรณ์การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
3.1.2 ชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์กราฟีนตามวิธีของฮูมเมอร์.....	23
3.1.3 ชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์โคเมทัลลีโอเทอร์.....	24
3.2 เครื่องมือใช้ในการตรวจสอบเอกลักษณ์.....	24
3.3 แก๊สและสารเคมี.....	24
3.4 วิธีการทดลอง.....	25
3.4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃	25
3.4.2 การเตรียม HZSM-5.....	25
3.4.3 การสังเคราะห์กราฟีนตามวิธีของฮูมเมอร์.....	25
3.4.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์บน HZSM-5.....	26
3.4.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์บนกราฟีน.....	26
3.4.6 การสังเคราะห์โคเมทัลลีโอเทอร์แบบทางตรง.....	27
3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	28
3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน.....	28
3.5.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค.....	28
3.5.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว.....	29
3.5.4 การวิเคราะห์การแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม.....	29
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	30
4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	30
4.1.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	30
4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา ในระดับจุลภาค (SEM).....	32
4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธี BET.....	33
4.2 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์โคเมทัลลีโอเทอร์แบบทางตรง.....	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น
 5.1 สรุปผลการวิจัย..... 40 คำ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	41
เอกสารอ้างอิง.....	42
ภาคผนวก.....	44
ภาคผนวก ก.....	45
ภาคผนวก ข.....	48
ภาคผนวก ค.....	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพ และทางเชื้อเพลิงของไดเมทิลอีเทอร์และเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	5
2.2 ค่าความสามารถของสารที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน.....	10
2.3 สมบัติทางกายภาพของเมทานอล.....	11
4.1 ตารางแสดงขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ , CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5, CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene โดยใช้สมการของ Scherrer.....	31
4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ คอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อลูมิเนียมออกไซด์ (CuO-ZnO-Al ₂ O ₃), คอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับ HZSM-5 (CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5) และคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับกราฟีน (CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene).....	34
ข.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	48
ข.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	50
ข.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	52
ค.1 แสดง %CO Conversion ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6.....	55
ค.2 แสดง %DME Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6.....	57
ค.3 แสดง %CH ₃ OH Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6.....	58
ค.4 แสดง %Hydrocarbon Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6.....	59
ค.5 แสดง %DME Yield ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6.....	61
ค.6 แสดง %CO Conversion ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene	

เอกสารนี้เป็นชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 63 รค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.7 แสดง %DME Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6.....	65
ค.8 แสดง %CH ₃ OH Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6.....	66
ค.9 แสดง %Hydrocarbon Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ / Graphene ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6.....	67
ค.10 แสดง %DME Yield ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างของไดเมทิลอีเทอร์.....	5
2.2 กระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์แบบทางอ้อม (Indirect DME Synthesis).....	6
2.3 คอปเปอร์ออกไซด์.....	14
2.4 ซิงค์ออกไซด์	15
2.5 อะลูมิเนียมออกไซด์.....	15
2.6 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	16
2.7 กราฟีน.....	17
2.8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)	18
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ Scanning Electron Microscope (SEM)	19
2.10 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุน.....	20
4.1 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ , CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ / HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene เทียบกับกราฟแสดงโครงสร้างผลึก ของสารมาตรฐาน CuO, ZnO และ Al ₂ O ₃	30
4.2 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์- อะลูมิเนียมออกไซด์ (ก) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ข) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า	32
4.3 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์- อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับ HZSM-5 (ก) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ข) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า.....	32
4.4 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์- อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับกราฟีน (ก) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ข) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene.....	36
4.6 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity) ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene.....	36
4.7 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของเมทานอล (%CH ₃ OH Selectivity) ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene.....	37
4.8 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไฮโดรคาร์บอน (%Hydrocarbon Selectivity) ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene	37
4.9 กราฟแสดงร้อยละของผลิตภัณฑ์ไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Yield) ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene.....	38
ข.1 กราฟการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃	49
ข.2 กราฟการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5.....	51
ข.3 กราฟการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene.....	53
ค.1 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5.....	55
ค.2 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์, เมทานอลและ ไฮโดรคาร์บอนในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5	60
ค.3 แสดงผลร้อยละของผลิตภัณฑ์ไดเมทิลอีเทอร์ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5	61
ค.4 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6	

เอกสารนี้เป็นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 63 รค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.5 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์, เอทานอลและไฮโดรคาร์บอนในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene.....	68
ค.6 กราฟแสดงร้อยละของผลิตภัณฑ์ไดเมทิลอีเทอร์ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันพลังงานจากธรรมชาติที่ใช้กันอยู่นั้นมีอยู่อย่างจำกัดใช้แล้วเริ่มหมดไปอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องหาพลังงานทางเลือกที่เข้ามาทดแทนการใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อแก้ไขปัญหาพลังงานจากธรรมชาติที่จะหมดไป และจะต้องอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม นั่นคือไดเมทิลอีเทอร์ หรือ DME (Dimethyl Ether : DME) มีสูตรทางเคมีคือ C_2H_6O เป็นสารประกอบประเภทอีเทอร์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันดีเซลและแก๊สหุงต้มได้ คุณสมบัติเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศมีค่าซีเทน (Cetane number) 55-60 ซึ่งมีค่าซีเทนที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทน 40-55 อุณหภูมิติดไฟอัตโนมัติ (Auto-ignition temperature) เกิดที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเกิดการเผาไหม้จะสร้างมลพิษน้อยกว่าน้ำมันดีเซล และลดเสียงการทำงานของเครื่องยนต์ [1]

ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์มีทั้งการสังเคราะห์ทางตรงและทางอ้อม โดยการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ทางอ้อมจะมีความยุ่งยาก ใช้เวลานาน และต้นทุนการผลิตที่สูง ประกอบกับสารละลายเมทานอลที่ผลิตได้จากขั้นตอนการสังเคราะห์แบบทางอ้อมเป็นสารระเหยที่มีอันตรายต่อร่างกาย จึงมีการวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ด้วยการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรงให้เป็นแบบขั้นตอนเดียว แล้วได้อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไดเมทิลอีเทอร์ที่สูง ในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไบฟังก์ชัน (Bifunctional catalyst) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก คือตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดการสังเคราะห์เมทานอลจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานคอปเปอร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาดีนงน้ำออกจากเมทานอลเพื่อลดการเกิดไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) [1]

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $CuO-ZnO-Al_2O_3$ บนตัวรองรับที่ต่างกันระหว่าง HZSM-5 และกราฟีน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียม $CuO-ZnO-Al_2O_3$ ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $CuO-ZnO-Al_2O_3$ บนตัวรองรับที่ต่างกันระหว่าง HZSM-5 และกราฟีน

1.2.3 เพื่อศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบมีตัวรองรับทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาการเตรียมตัวเร่ง CuO-ZnO-Al₂O₃, CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene มีวิธีการควบคุมสภาวะดังนี้

1.3.1.1 การเตรียม CuO-ZnO-Al₂O₃

- สารตั้งต้นที่ใช้คอปเปอร์ไนเตรต (Cu(NO₃)₂•3H₂O), ซิงค์ไนเตรต (Zn(NO₃)₂ •6H₂O) และ อะลูมิเนียมไนเตรต (Al(NO₃)₃•9H₂O)
- สารตกตะกอนที่ใช้ คือ โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃)
- อัตราส่วนโดยโมลของ CuO:ZnO:Al₂O₃ เท่ากับ 6:3:1
- สภาวะของการตกตะกอนที่ต้องควบคุมคือ อุณหภูมิ 70 °C, ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 7 และอุณหภูมิการเผาเท่ากับ 350 °C

1.3.1.2 การเตรียม CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5

- สารตั้งต้นที่ใช้คือ คอปเปอร์ไนเตรต (Cu(NO₃)₂•3H₂O), ซิงค์ไนเตรต (Zn(NO₃)₂ •6H₂O) และ อะลูมิเนียมไนเตรต (Al(NO₃)₃•9H₂O)
- สารตกตะกอนที่ใช้ คือ โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃)
- อัตราส่วนโดยโมลของ CuO:ZnO:Al₂O₃ เท่ากับ 6:3:1
- สภาวะของการตกตะกอนที่ต้องควบคุมคือ อุณหภูมิ 70 °C, ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 7 และอุณหภูมิการเผาเท่ากับ 350 °C
- นำ CuO-ZnO-Al₂O₃ ที่ผ่านการเผาแล้วมาผสมกับ HZSM-5 ด้วยอัตราส่วน 2:1 โดยมวล

1.3.1.3 การเตรียมตัวเร่ง CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene

- สารตั้งต้นที่ใช้คือ คอปเปอร์ไนเตรต (Cu(NO₃)₂•3H₂O), ซิงค์ไนเตรต (Zn(NO₃)₂ •6H₂O), อะลูมิเนียมไนเตรต (Al(NO₃)₃•9H₂O) และกราฟีน (Graphene)
- เตรียมกราฟีนด้วยวิธีของฮุมเมอร์
- สารตกตะกอนที่ใช้ คือ โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃)
- อัตราส่วนโดยโมลของ CuO:ZnO:Al₂O₃ เท่ากับ 6:3:1
- นำสารตั้งต้นมาตกตะกอนร่วม โดยอัตราส่วนโดยมวลของ CuO-ZnO-Al₂O₃:Graphene เท่ากับ 2:1
- สภาวะของการตกตะกอนที่ต้องควบคุมคือ อุณหภูมิ 70 °C, ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 7 และอุณหภูมิการเผาเท่ากับ 350 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 พิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้

- ตรวจสอบเชิงสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- ตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)
- ตรวจสอบพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเครื่อง BET (The Brunauer-Emmett-Teller)

1.3.3 การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed bed reactor) มีวิธีการควบคุมสภาวะดังนี้

- รีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย 5% H₂ ที่อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คือ 250 °C ความดันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คือ 40 บาร์
- เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คือ 6 ชั่วโมง
- อัตราการไหล คือ 20 มิลลิตรต่อนาที
- ใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้น โดยอัตราส่วน H₂:CO = 1:1
- อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์ (W/F) คือ 10.20 g.h.mol⁻¹

1.3.4 ผลิตภัณฑ์จะถูกตรวจสอบด้วย off-line Gas Chromatography ที่มี Detector แบบ Flame Ionization Detector (FID) และ Thermal Conductivity Detector (TCD)

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์สำหรับใช้กับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์
- 1.4.2 วางแผนการดำเนินงาน จัดเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี
- 1.4.3 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของโลหะ และนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มาบดผสมรวมกับตัวรองรับ HZSM-5 หรือตกตะกอนร่วมกับกราฟีน
- 1.4.4 ตรวจสอบพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 1.4.5 นำตัวเร่งปฏิกิริยาไปสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งตามสภาวะที่กำหนดไว้
- 1.4.6 วิเคราะห์ข้อมูล สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 1.4.7 สรุปผลการทดลองเขียนเป็นรายงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์
- 1.5.2 สามารถสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์โดยเป็นพลังงานทางเลือกที่ทดแทนพลังงานจากธรรมชาติ
- 1.5.3 สามารถนำมาวิจัยและพัฒนาตัวเร่งของปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ให้ได้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

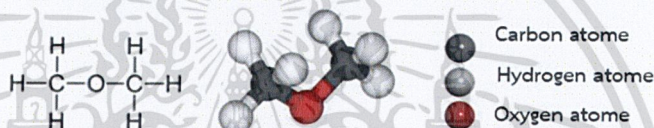
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl Ether)

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของไดเมทิลอีเทอร์ [1]

ไดเมทิลอีเทอร์หรือดีเอ็มอี มีสูตรทางเคมี คือ C_2H_6O เป็นสารออกซิเจนเนตประเภทอีเทอร์ ซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ทั้งนี้ คุณสมบัติของดีเอ็มอี จะคล้ายคลึงกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) กล่าวคือมี จุดเดือด ณ ความดันบรรยากาศที่ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงสามารถทำให้อยู่ในรูปของของเหลวได้ง่าย [1]



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของไดเมทิลอีเทอร์

ที่มา: Dr. Javier Ereña Loizaga (2557)

ไดเมทิลอีเทอร์สามารถลุกติดไฟได้ จึงสามารถใช้ทดแทนแก๊สปิโตรเลียมเหลวได้ในบางกรณี นอกจากนี้ไดเมทิลอีเธอร์ยังมีคุณสมบัติบางอย่างใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลอีกด้วย เช่น ผสมไดเมทิลอีเทอร์ปริมาณ 20wt% ลงในแก๊สปิโตรเลียมเหลว จะพบว่าสามารถนำแก๊สผสมนี้ไปใช้ในครัวเรือนได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก หรือเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าได้ จึงนำไดเมทิลอีเทอร์มาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพกับเชื้อเพลิงชนิดต่างๆที่ใช้ในปัจจุบัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพ และทางเชื้อเพลิงของไดเมทิลอีเทอร์และเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

สมบัติทางกายภาพ	DME	มีเทน	เมทานอล	โพรเพน	น้ำมันดีเซล
สูตรโมเลกุล	CH_3OCH_3	CH_4	CH_3OH	C_3H_8	$C_{14}-C_{19}$
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	-25	-161	64.70	-42	180-370
จุดวาบไฟ ($^{\circ}\text{C}$)	-41.11	-188	11	-104	93
ค่าพลังงานความร้อน (kcal/kg)	6,900	12,000	4,800	11,100	10,000

เอกสารที่มา: บวรชัยและคณะ (2561) การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กระบวนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ [2]

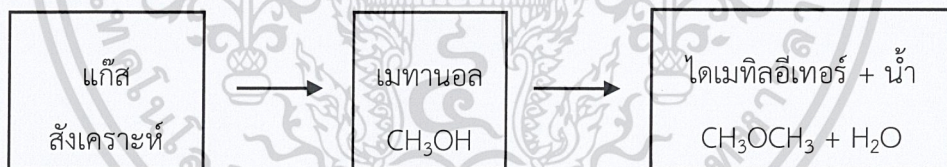
ในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน หรือชีวมวล โดยกระบวนการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

2.1.2.1 การผลิตแบบทางอ้อมโดยผ่านกระบวนการดีไฮเดรชันของเมทานอล

การผลิตวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไป โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน (แก๊สสังเคราะห์) ที่ได้จากกระบวนการ แก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินหรือชีวมวล หรือจากกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สธรรมชาติจะถูกนำมาทำปฏิกิริยากันเพื่อผลิตเมทานอล จากนั้นเมทานอลจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเกิดเป็น ไดเมทิลอีเทอร์ และน้ำ

แต่เดิมไดเมทิลอีเทอร์ ผลิตได้จากแก๊สสังเคราะห์โดยมีกระบวนการผลิตที่ประกอบด้วยสองขั้นตอนคือการเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ไปเป็นเมทานอล (Methanol Synthesis) หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ ด้วยกระบวนการกำจัดน้ำออกจากเมทานอล (Methanol Dehydration)

การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบสองขั้นตอนนั้นมีความยุ่งยาก ใช้เวลานานและต้นทุนในการผลิตสูงประกอบกับเมทานอลที่ผลิตได้จากขั้นตอนแรกนั้นเป็นสารระเหยที่มีอันตรายต่อร่างกาย จึงมีการวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ อย่างต่อเนื่องเพื่อลดต้นทุนและระยะเวลาการผลิตให้น้อยลง



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์แบบทางอ้อม (Indirect DME Synthesis) หรือ กระบวนการดีไฮเดรชันของเมทานอล (Methanol Dehydration)

ที่มา: กลุ่มพัฒนามาตรฐานน้ำมันเชื้อเพลิง สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง (2554)

2.1.2.2 กระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรง

การผลิตไดเมทิลอีเทอร์วิธีนี้เป็นเทคโนโลยีที่คิดค้นขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีการทางอ้อมคือไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนของการสังเคราะห์เมทานอล ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ โดยในกระบวนการผลิตนี้แก๊สสังเคราะห์สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์ได้โดยตรง

สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์ที่แตกต่างกันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ จากแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่าง 'ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น' อีกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจนเป็น 1:2 จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดเมทิลอีเทอร์และน้ำ แต่น้ำจะส่งผลเสียต่อตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบ



ส่วนการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจนเป็น 1:1 จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดเมทิลอีเทอร์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



2.1.3 การนำไดเมทิลอีเทอร์ไปใช้ประโยชน์ [1]

2.1.3.1 เชื้อเพลิงสำหรับกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

ทั้งนี้เริ่มจากการนำแก๊สปิโตรเลียมเหลวมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีคุณสมบัติในการลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ดังนั้นจึงมีความต้องการพลังงานจากเชื้อเพลิงประเภทนี้มากขึ้น แต่การพัฒนาการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวนั้นจำเป็นต้องใช้เวลาและต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงเปลี่ยนมาเป็นการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแทนแต่เกิดปัญหาคือ มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศมากเกินไป และมีเถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินด้วย ด้วยสาเหตุนี้จึงมีการเปลี่ยนเป็นการนำถ่านหินไปทำปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชันเพื่อทำเป็นแก๊สสังเคราะห์ก่อนนำไปผลิตเป็นไดเมทิลอีเทอร์ต่อไป ซึ่งจากการใช้ไดเมทิลอีเทอร์เป็นพลังงานเชื้อเพลิงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลวด้วย

นอกจากค่าใช้จ่ายในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์จะต่ำกว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลวแล้วการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ยังต่ำกว่าการใช้วิธีการเผาถ่านหินโดยตรงเพื่อเป็นพลังงานเชื้อเพลิงอีกด้วย ซึ่งเปรียบเทียบการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศของเชื้อเพลิงทั้งสี่ชนิดคือ ถ่านหิน น้ำมัน แก๊สปิโตรเลียมเหลว และไดเมทิลอีเทอร์

ในปัจจุบันมีโรงผลิตไดเมทิลอีเทอร์ เพื่อใช้ประโยชน์ในทางการค้า โดยใช้กระบวนการการจัดน้ำของเมทานอลหลายแห่ง ตัวอย่างเช่น Mitsubishi chemical (MCC) Mitsubishi gas chemical (MGC) Toyo engineering chemical (TEC) เป็นต้น

2.1.3.2 เชื้อเพลิงสำหรับการขนส่ง

ไดเมทิลอีเทอร์สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยค่าซีเทนของไดเมทิลอีเทอร์มีค่าประมาณ 55-60 ซึ่งมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนประมาณ 40-55 ดังนั้นถ้าหากใช้ไดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิงแทนจะสามารถเผาไหม้ได้ดีกว่าน้ำมันดีเซลนอกจากนี้ไดเมทิลอีเทอร์ยังไม่มีเอคสารนี้เป็นเอคสารที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ จึงไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมในขณะที่เผาไหม้ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณซัลเฟอร์ที่พบในน้ำมันดีเซลซึ่งมีปริมาณมากถึง 250 ส่วนในล้านส่วน

การใช้โดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการขนส่งนั้นลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์อีกทั้งยังไม่เกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์และฝุ่น ดังนั้นจากประโยชน์ดังกล่าวได้มีการศึกษาและใช้จริงในการขนส่งของเครื่องยนต์ที่ใช้้ำมันดีเซลของบริษัท JFE ประเทศญี่ปุ่นพบว่า

1. ขณะเผาไหม้ไม่มีการปล่อยควันดำออกมา เนื่องจากโครงสร้างของโดเมทิลอีเทอร์ไม่มีพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน
2. การเดินเครื่องเรียบไม่มีเสียงรบกวน
3. ลดร้อยละการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ร้อยละ 20-30
4. ลดระยะเวลาในการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์มากขึ้น

เครื่องยนต์ที่ใช้โดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิง ปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตรถยนต์หลายรายได้มีการคิดค้นพัฒนารถบรรทุกขนาดใหญ่ที่ใช้โดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิง ตัวอย่างเช่น นิสสัน ฮีโน่ซูซุมิตซูบิชิ ในประเทศญี่ปุ่น และ วอลโว่ ในประเทศสวีเดน

2.1.3.3 เชื้อเพลิงที่ใช้ภายในบ้าน

เนื่องจากประเทศกำลังพัฒนาหลายประเทศยังมีการใช้ถ่านหินและไม่เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มอยู่ ทำให้มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นมลภาวะที่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ภายหลังจึงมีการพัฒนาใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวแทน แต่ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยพบว่าโดเมทิลอีเทอร์มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับแก๊สปิโตรเลียมเหลวและสามารถทำให้เป็นของเหลวได้ง่ายกว่า เนื่องจากโดเมทิลอีเทอร์มีจุดเดือดสูงกว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลวคือ -25°C ส่วนแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีจุดเดือดคือ -42°C ทำให้โดเมทิลอีเทอร์มีขั้นตอนการผลิตที่ง่ายและด้วยคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันจึงไม่มีความจำเป็นในการสร้างโรงงานผลิตเฉพาะโดเมทิลอีเทอร์ เนื่องจากสามารถใช้โรงงานที่ผลิตแก๊สปิโตรเลียมเหลวได้โดยตรง นอกจากนี้ยังสามารถจัดเก็บและขนส่งได้ง่ายกว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลวอีกด้วย

2.1.3.4 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ทำงานโดยเปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นไฟฟ้าและความร้อนที่สามารถนำไปใช้ได้เลยโดยไม่มีการสันดาป จึงมีประสิทธิภาพมากในการลดไอเสีย หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงคือปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจน แล้วให้กำเนิดไฟฟ้าและความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์นั้นมักใช้มีเทน เมทานอล เอทานอลและแก๊สโซลีน แต่มีเทน เอทานอลและแก๊สโซลีน ต้องใช้ความร้อนสูงในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ร้อยละการแปลงผันเป็นไฮโดรเจนสูง แต่สำหรับโดเมทิลอีเทอร์สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ปริมาณมากแม้จะใช้อุณหภูมิในการผลิตต่ำ โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเมทานอล

2.1.4 การเผาไหม้ของโดเมทิลอีเทอร์ [1]

ในกระบวนการเผาไหม้ ออกซิเจนในอากาศจะเป็นตัวทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง ส่วนประกอบอื่นๆ ในอากาศ เช่น อาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนจะไม่เข้าร่วมทำปฏิกิริยาด้วย ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณปฏิกิริยาการเผาไหม้โดเมทิลอีเทอร์ กับอากาศ จึงจะนิยามไนโตรเจนในบรรยากาศ (atmospheric nitrogen) หรือไนโตรเจนที่ปรากฏขึ้น (apparent nitrogen) ซึ่งจะประกอบด้วยไนโตรเจนและแก๊สอื่นๆ ในอากาศที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้ ดังนั้นในการคำนวณจะพบว่าในปริมาณอากาศประกอบด้วยแก๊ส 2 ส่วนคือ ส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา คือ ออกซิเจน และส่วนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยา คือ ไนโตรเจนบรรยากาศ โดยอัตราส่วนของแก๊สชนิดต่างๆ ที่ผสมในอากาศแห้งได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของดีเซล (มีค่าประมาณ 0.0690-0.0697) และแก๊สโซลีน (มีค่าประมาณ 0.0685) จะเห็นได้ว่า ไม่ต้องใช้ส่วนผสมมากกว่าสำหรับการผสมที่ส่วนผสมพอดี (Stoichiometric Mixture) หรือกล่าวอีกทางหนึ่งได้ว่า ในปริมาณเชื้อเพลิงเดียวกันโดเมทิลอีเทอร์สามารถเผาไหม้ได้ดีในที่ที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า นี่เป็นเหตุผลแรกทีสนับสนุนว่าทำไมโดเมทิลอีเทอร์ จึงเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับค่าส่วนผสมที่จะทำให้โดเมทิลอีเทอร์ ติดไฟได้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.0555 ไปจนถึง 0.294

จากการศึกษาต่อไปพบว่า นอกจากจะสามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์โดยให้ค่าปริมาณเขม่า คาร์บอนและคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ำมากแล้ว การปล่อยมลพิษอื่นๆ ก็น้อยตามไปด้วย เช่น การปล่อยแก๊สกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) อยู่ในปริมาณที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ดีเซล เนื่องจากอุณหภูมิสุดท้ายของการเผาไหม้มีค่าต่ำกว่า และนอกจากนี้ เนื่องจากโดเมทิลอีเทอร์ ไม่มีการเจือปนของธาตุกำมะถัน (sulfur) ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงไม่มีแก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ถูกปลดปล่อยออกมาจาก กระบวนการเผาไหม้ แก๊สมลพิษที่กล่าวถึงทั้งสองกลุ่มนี้เป็นแก๊สที่เมื่อรวมตัวกับไอน้ำในอากาศแล้วจะได้เป็นไอกรด ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดฝนกรดได้ หรือไอของแก๊สมลพิษทั้งสองกลุ่มนี้จะมีผลโดยตรงต่อเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะเนื้อเยื่ออ่อนบริเวณโพรงจมูกและดวงตา ดังนั้นการลดปริมาณแก๊สทั้งสองชนิดจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญมาก เชื้อเพลิงโดเมทิลอีเทอร์ จึงเป็นตัวเลือกที่ดีตัวหนึ่ง เมื่อพิจารณาถึงประเด็นของการเกิดมลภาวะและความเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ข้อดีและข้อเสียของไดเมทิลอีเทอร์ในการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล[1]

ข้อดีของการใช้ไดเมทิลอีเทอร์ แทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล ประกอบไปด้วยการลดลงของ ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในไอเสีย เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของ ไดเมทิลอีเทอร์มีออกซิเจน (O_2) เป็นองค์ประกอบอยู่ระหว่างคาร์บอนด์-คาร์บอนด์จึงไม่ได้จับยึดกันโดยตรง ดังนั้นการเผาไหม้ของไดเมทิลอีเทอร์จะไม่เกิดเขม่า (soot) หรือฝุ่นละออง (particulate matters หรือ PM) นอกจากนี้ไดเมทิลอีเทอร์ ไม่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิด SO_x และไม่มีควันดำ (black smoke)จากการทดสอบกระบวนการเผาไหม้ของไดเมทิลอีเทอร์ พบว่ามีอุณหภูมิต่ำกว่ากระบวนการเผาไหม้ของดีเซล จึงทำให้ NO_x ลดลง ต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ไดเมทิลอีเทอร์กับเครื่องยนต์ดีเซลชนิดฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง จะให้เสียงที่เกิดจากการทำงานที่เงียบกว่าการใช้ conventional diesel

ข้อเสียของการใช้ไดเมทิลอีเทอร์ แทนน้ำมันดีเซลคือ เนื่องจากค่าความร้อนของไดเมทิลอีเทอร์ มีค่าต่ำกว่าของเชื้อเพลิงดีเซล ดังนั้นพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ของไดเมทิลอีเทอร์ ก็จะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองปริมาณเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น และความหนืดของไดเมทิลอีเทอร์ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ก่อให้เกิดการรั่ว (leakage) ที่ปั๊ม (pumps) และหัวฉีด (fuel injectors) ต้องมีการเติมสารหล่อลื่นเข้าไปผสมกับไดเมทิลอีเทอร์ เพื่อป้องกันการสึกกร่อนและการขัดข้องของปั๊ม (pumps) และหัวฉีด (fuel injectors)

2.1.6 ผลกระทบของไดเมทิลอีเทอร์ต่อสิ่งแวดล้อม [1]

ไดเมทิลอีเทอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ แต่เป็นสารที่ปลอดภัย ไม่เป็นพิษ และก่อให้เกิดโรคมะเร็ง อีกทั้งยังมีค่าความสามารถที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) ที่น้อยกว่าสารชนิดอื่นๆ ดังแสดงตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าความสามารถของสารที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน

สาร	ค่าความสามารถของสารที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน		
	20 ปี	30 ปี	500 ปี
DME	1.2	0.3	0.1
CO_2	1	1	1
CH_3OH	56	21	6.5
N_2O	280	310	170

ที่มา: บวรชัยและคณะ (2561)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.2 พบว่า ไดมethylอีเทอร์มีค่าสมรรถนะที่ทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นน้อยกว่า สารพิษชนิดอื่นๆ โดยในช่วงเวลา 20ปีแรกเท่ากับ 1.2 ในเวลา 30 ปีเท่ากับ 0.3 และลดลงเหลือเพียง 0.1 ในช่วงเวลา 500 ปี หมายความว่า ไดมethylอีเทอร์ใช้เวลาในการสลายตัวในชั้นบรรยากาศน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสารที่เป็นพิษชนิดอื่น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไดไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งช่วงเวลา 500 ปี ค่าความสามารถที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนของไดไนโตรเจนออกไซด์เท่ากับ 170 ส่วนไดมethylอีเทอร์สลายตัวในชั้นบรรยากาศได้เร็ว ทำให้ไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น ปรากฏการณ์เรือนกระจก และการทำลายชั้นโอโซน เป็นต้น

2.2 เมทานอล

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของเมทานอล [3]

เมทานอลหรือเมทิลแอลกอฮอล์ มีสูตรโครงสร้างเป็น CH_3OH ซึ่งสามารถผลิตได้จากการกลั่นไม้ หรือการรวมกันของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน ภายใต้ระบบตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังสามารถผลิตได้จากแก๊สมีเทนที่มาจากแก๊สธรรมชาติซึ่งนับได้เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด

เมทานอลเป็นของเหลวใสไม่มีสี สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวได้ในน้ำและสารละลายอินทรีย์ มีกลิ่นเหม็นอ่อนๆ มีฤทธิ์กัดกร่อนรวมถึงฤทธิ์ทำลายประสาท และเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ถ้ารับประทานเข้าไปภายในร่างกาย เช่น การดื่มเครื่องดื่มที่มีเมทานอลผสมอยู่ อาจทำให้เป็นอันตรายต่อชีวิต

เมทานอลมีจุดเดือดที่ประมาณ $64.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่า octane number สูง และเป็นเชื้อเพลิงสะอาดในขณะที่เกิดการเผาไหม้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แทนแก๊สโซลีนในเครื่องยนต์ได้ แต่จะเห็นว่าค่าซีเทน ของเมทานอลมีค่าต่ำ คือมีค่าประมาณ 5 ตามที่แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของเมทานอล

สมบัติ	CH_3OH
สูตรโครงสร้างทางเคมี	CH_3OH
น้ำหนักโมเลกุล (kg/mol)	32.042
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	64.6
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	-97.7
Relative density	0.79
ความหนาแน่นของเหลว (kg/m^3 @20 $^{\circ}\text{C}$)	791
Heat of formation (MJ/kmol)	-201.3
Explosion limit (%)	5.5-30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

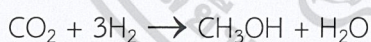
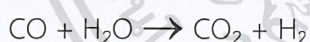
สมบัติ	CH ₃ OH
Gibbs free energy (MJ/kmol)	-162.62
ค่าซีเทน	5

ที่มา: Murat Ciniviz และคณะ (2554)

2.2.2 กระบวนการผลิตเมทานอล [3]

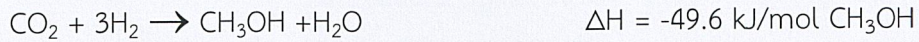
ในอดีตเมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากการกลั่นไม้ (wood spirit) ซึ่งมีปริมาณน้อยมากไม่สามารถผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ หลังจากนั้นการผลิตเมทานอลในอุตสาหกรรมเริ่มต้นในประเทศ เยอรมัน โดยบริษัท บาฟ (BASF) ซึ่งใช้ก๊าซสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 320-380 °C และความดัน 350 bar ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโครเมียมออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อกระบวนการความดันสูง แต่ในปัจจุบันการผลิตในอุตสาหกรรมนั้นจะใช้เทคโนโลยีของบริษัท ไอซีไอ (ICI) ซึ่งเป็นกระบวนการความดันต่ำ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ออกไซด์ ที่ความดัน 50-80 bar และอุณหภูมิ 250-280 °C

เมทานอลสามารถผลิตได้จากกระบวนการเคมีความร้อนโดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อ ก๊าซสังเคราะห์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม (CO:H₂ = 1:2) ดังแสดงในปฏิกิริยา โดยมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อยประมาณร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิประมาณ 250-280 °C และความดัน 60-80 บรรยากาศโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของทองแดงและสังกะสี โดยอาจมีออกไซด์ของโลหะอื่น ๆ ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

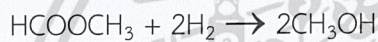
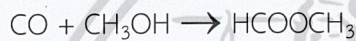


กระบวนการที่ได้รับความนิยมอีกกระบวนการหนึ่งคือการผลิตเมทานอลจากก๊าซผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 260°C ความดัน 80 bar ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถผลภาวะเรือนกระจกที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าการใช้ก๊าซสังเคราะห์ โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้นั้นสามารถหาได้ง่าย เช่น ในบรรยากาศ จากก๊าซที่ปล่อยจากโรงไฟฟ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามจากปฏิกิริยา จะมีน้ำเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยทำให้ผลิตภัณฑ์เมทานอลที่มีความบริสุทธิ์ต่ำกว่าการใช้ก๊าซสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้น และน้ำที่เกิดขึ้นทำให้ความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงอีกด้วย

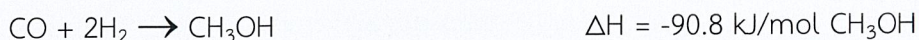
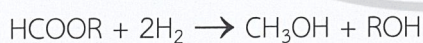
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์เมทานอลด้วยกระบวนการอื่น ๆ อีกหลากหลายกระบวนการ ซึ่งเป็นเพียงการทดลองในห้องปฏิบัติการ เช่น การผลิต เมทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคอกไซด์ (RONa) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของทองแดง ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ ภายใต้ภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 °C และความดัน 10 บรรยากาศ เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมาก เนื่องจากอุณหภูมิและความดันที่ต่ำ มีค่าการเปลี่ยนของก๊าซสังเคราะห์สูงถึงร้อยละ 90 และค่าการเลือกเกิดเมทานอลสูงถึงร้อยละ 99 แต่มีข้อเสียก๊าซสังเคราะห์ที่ใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูง (ทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูงมาก) กล่าวคือต้องไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปนเปื้อน เนื่องจากจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยายังว่องไวต่อน้ำที่อาจเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาไฮโดรเจนแก๊สซิฟ ทำให้กระบวนการนี้ยังไม่สามารถพัฒนาสู่การผลิตในขนาดอุตสาหกรรมได้



กระบวนการที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (ใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของทองแดง) เมทานอลถูกผลิตภายใต้ความดัน 30-50 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 170 °C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีความเสถียรต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ น้ำ ทำให้สามารถนำก๊าซสังเคราะห์ที่มีอยู่ทั่วไปมาใช้ในการผลิตได้มีค่าการเปลี่ยนร้อยละ 50 และค่าการเลือกเกิดเมทานอลร้อยละ 99 โดย เมทานอลเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรเจนแก๊สซิฟ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส ดังแสดงในสมการด้านล่าง



2.2.3 พิษของเมทานอล [4]

เกิดจากกรดฟอร์มิกที่เกิดขึ้นไปลด alkaline reserve ทำให้เกิดภาวะความเป็นกรด (metabolic acidosis) สูงขึ้น จนกระทั่งทำให้เนื้อเยื่อตับอ่อนกลายเป็นเนื้อตาย (necrosis) นอกจากนี้ ฟอร์มัลดีไฮด์ยังมีผลไปทำลายประสาทตาจนอาจเกิดอาการตาบอดชั่วคราวหรือถาวร ในกรณีที่ ผู้ป่วยมีอาการรุนแรงจะได้กลิ่นของฟอร์มัลดีไฮด์ทางลมหายใจและปัสสาวะของผู้ป่วย

หัวใจเต้นช้า (bradycardia) ชัก และเข้าขั้นโคม่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านการแพทย์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้ หากมีเหตุใดที่ผู้เขียนได้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คอปเปอร์ออกไซด์

2.3.1 ลักษณะทั่วไปของคอปเปอร์ออกไซด์ [5]

สารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์ สูตรโครงสร้างคือ CuO มีสีดำ พบได้ในธรรมชาติ โครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก (Monoclinic) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) สามารถสังเคราะห์ให้เป็นวัสดุนาโนได้

คอปเปอร์ออกไซด์มีชื่อทั่วไปคือ Copper Oxide, Cupric oxide มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 79.55 กรัมต่อโมล มีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นผงสีดำ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 6.40 มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ $1,326\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2.3 คอปเปอร์ออกไซด์

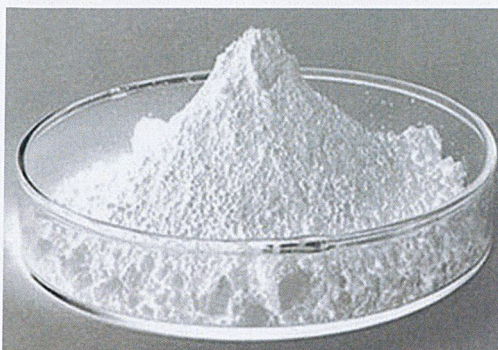
ที่มา: Bangkok Chemicals Supply (2555)

2.4 ซิงค์ออกไซด์

2.4.1 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ [6]

ZnO หรือ ซิงค์ออกไซด์เป็นที่รู้จักในนามคาลาไมล์ ซึ่งเป็นภาษาอียิปต์โบราณ เป็นธาตุธรรมชาติจากสินแร่ สมิธโซไนต์ (Smithsonite) มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาว ซิงค์ออกไซด์มีชื่อทั่วไปคือ Zinc oxide, Calamine มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 81.38 กรัมต่อโมล มีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นผงสีขาว มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 5.61 มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ $1,975\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ซิงค์ออกไซด์

ที่มา: Azo Materials (2554)

2.5 อะลูมิเนียมออกไซด์

2.5.1 สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมออกไซด์ [7]

อะลูมินามีชื่อทางเคมีว่า อะลูมิเนียมออกไซด์ สูตรทางเคมีคือ Al_2O_3 พบในธรรมชาติในรูปของแร่คอร์ันดัม (corundum) โดยปกติจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่หากมีสิ่งเจือปนในโครงสร้างของอะลูมินาเล็กน้อย จะทำให้เกิดสีต่าง ๆ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 101.96 กรัมต่อโมล มีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นผงสีขาว มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 4.00 มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 2,072 °C



รูปที่ 2.5 อะลูมิเนียมออกไซด์

ที่มา: Indiamart (2548)

2.6 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

2.6.1 ลักษณะของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 [8]

ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มเพนทาซิล (Pentasil group) เนื่องจากมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยโซ่ของวงแหวนที่มีออกซิเจนจำนวน 5 อะตอม ต่อกันเป็นหน่วยโครงสร้างทติยภูมิ การประกอบตัวของหน่วยโครงสร้างทติยภูมิจำนวน 10 วง ซึ่งช่องว่างขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายแผ่นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

บาง ๆ และเกิดการก่อตัวขึ้นเป็นชั้นที่ใหญ่ จนเกิดเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะทำให้สารโมเลกุลขนาดใหญ่ผ่านไปได้ดังรูปที่ 2.10 โดยโพรงที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแถวของช่องว่าง และมีรูปร่างเป็นแท่งกลม สำหรับโครงสร้างของโพรงมีลักษณะเป็น 2 มิติ 2 แบบ ได้แก่ แบบ Straight channel มีลักษณะเป็นแถวตรง และลักษณะของรูเปิดเป็นรูปวงรีเล็กน้อยขนาดเท่ากับ 0.51x0.55 มิลลิเมตร และแบบ Sinusoidal channel ซึ่งโพรงหรือช่องว่างมีลักษณะเป็นแถวสลับและมีรูเปิดเป็นรูปวงกลมขนาดเท่ากับ 0.54x0.56 มิลลิเมตร โดยขนาดโพรงที่เกิดขึ้นจะมีขนาดปานกลางและเป็นระเบียบ



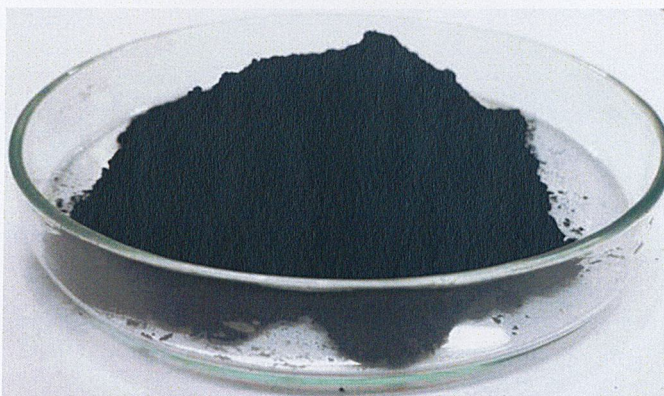
รูปที่ 2.6 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

2.7 กราฟีน

2.7.1 ลักษณะของกราฟีน [9]

กราฟีน เป็นรูปแบบหนึ่งของผลึกคาร์บอน ข้างเคียงกับเพชร, กราไฟท์ , ท่อนาโนคาร์บอน และฟูลเลอร์ีน โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยมรังผึ้งทั่วไปกราฟีนมีลักษณะเป็นชั้นหนาเพียงอะตอมเดียวของแร่แกรไฟต์ที่เป็นชั้นๆ กราฟีนที่มีคุณภาพสูง มีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา เกือบโปร่งใส และเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กราฟีน

ที่มา: Chem G (2562)

2.8 เทคนิคสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

2.8.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) [10]

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาลำดับขององค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

ที่มา: serc media (2550)

2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [11]

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะ สัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้อง จุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และ กำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุด ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบ รายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยใน การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยาย มากกว่า 3000 เท่า จน ถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่ง ขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการ วิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่ นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถ หลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเป็นเจ้าของโดยบุคคลอื่น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้ถือลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับความพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ Scanning Electron Microscope (SEM)

ที่มา: JEOL (2562)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุน โดยใช้ BET (The Brunauer-Emmett-Teller) [12]

เป็นเครื่องมือศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Pore size diameter) พื้นที่ผิวของผงดตัวอย่าง (Surface area) ปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) ในแบบต่างๆ (Micropore, mesopore and macropore) ค่าการดูดซับหรือคายก๊าซ (adsorption / desorption isotherm) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) โดยใช้หลักการ Vacuum Volumetric Technique



รูปที่ 2.10 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุน
ที่มา: Alibaba.com (2562)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 Direct synthesis of dimethyl ether from syngas on CuO-ZnO-MnO/SAPO-18 Bifunctional catalyst. [13]

Ainara Ateka และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl ether : DME) โดยตรงจาก syngas ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบชั้นตอนเดียว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทวิภาค (Bifunctional Catalyst) CuO-ZnO-MnO/SAPO-18 (CZMn/S) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งความดันสูง (high-pressure fixed-bed reactor) เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ ในช่วง 250-350 °C, space time ในช่วง 2.5-20 g cat h(mol c)⁻¹, ความดันปฏิกิริยาในช่วง 20-40 บาร์ และ time on stream จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือในช่วงอุณหภูมิ 275-300 °C, ความดัน 30 บาร์, space time 5 g cat h(mol c)⁻¹ โดยทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของไดเมทิลอีเทอร์และค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์สูงที่สุดเท่ากับ 39%, 36% และ 95% ตามลำดับ

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเทียม ก่อนที่จะป้อน syngas เข้าเครื่องปฏิกรณ์จำเป็นต้องทำให้สะอาด (ปราศจากโอเลฟินและพาราฟิน) ก่อนเพื่อหลีกเลี่ยง การรวมตัวของไฮโดรคาร์บอน ซึ่งอาจรบกวนการตรวจวัดได้ การยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาของ CZMn/S (Deactivation of CZMn/S) มีสาเหตุหลักมาจาก การเกิด coke ในระบบ โดยจำแนกได้เป็น 3 ประเภทตามที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยา คือ บริเวณพื้นผิวโลหะ ระหว่างพื้นผิวโลหะกับ MnO และ บริเวณ acid function

2.9.2 Low-Temperature methanol dehydration to dimethyl ether over various small-pore zeolites. [14]

Dilshad Masiha และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาการดึงน้ำออก (Dehydration) เพื่อเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ที่อุณหภูมิต่ำผ่านซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนเล็กๆ โดยการทดลองนี้มีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมาสองชนิด คือ ซีโอไลต์ Rho และซีโอไลต์ KFI และมีการนำมาเปรียบเทียบซีโอไลต์ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ZSM-5 เกรดการค้า แกรมมาอะลูมินาเกรดการค้า และแกรมมาอะลูมินาที่เตรียมจากแลป พบว่าซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีโครงสร้างสามมิติสามารถให้ผลิตภัณฑ์เป็นไดเมทิลอีเทอร์ที่มากที่สุด

2.9.3 Direct synthesis of dimethyl ether from synthesis gas: Experimental study and mathematical modeling. [15]

I.A. Kurzina และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการและการคำนวณในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ทางตรงจากแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ ในการสังเคราะห์เมทานอล และใช้แกรมมาอะลูมินาในการเกิดปฏิกิริยาดึงน้ำออกจากเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ งานวิจัยนี้มีการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ทางตรงในสภาวะที่ต่างกัน คือการเปรียบเทียบความดันจะอยู่ที่ 10-100 bar การเปรียบเทียบอุณหภูมิจะอยู่ที่ 220-280 °C เปรียบเทียบอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของแก๊สสังเคราะห์ที่ 1-6 โมลาร์ เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาเพื่อสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ ได้ผลว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือความดัน 30 bar อุณหภูมิ 280 °C และอัตราส่วน $\text{H}_2:\text{CO}$ เป็น 2:1 โดยค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 63% และให้ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของไดเมทิลอีเทอร์เท่ากับ 25%

2.9.4 Effect of Metal Precursor on $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ Synthesized by Flame Spray Pyrolysis for Direct DME Production. [16]

S.C. Lee และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะออกไซด์ ($\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$) เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ โดยเปรียบเทียบสารตั้งต้น 2 ชนิดคือสารประกอบไนเตรต และสารประกอบ organometallics และใช้อัตราส่วนของโลหะออกไซด์ที่แตกต่างกัน พบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่อัตราส่วนคอปเปอร์

เอกสารนี้เป็นของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ มีลิขสิทธิ์สงวนโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ต่อซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่ 6:3:1 และใช้สารตั้งต้นเป็นสารประกอบไนเตรต ให้ผล BET surface area เท่ากับ $41.04 \text{ m}^2/\text{gcat}$ และ Cu surface area เท่ากับ $18.6 \text{ m}^2/\text{gcat}$ ซึ่งจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวของคอปเปอร์ในการทำปฏิกิริยาที่สูงกว่าอัตราส่วนอื่น โดยคาร์บอนละลายการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 90% และให้คาร์บอนละลายความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์เท่ากับ 65% ที่ อุณหภูมิ 260°C ความดันปฏิกิริยา 40 บาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบการสังเคราะห์โดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ บนตัวรองรับที่ต่างกันระหว่าง HZSM-5 และกราฟีน ซึ่งทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) และเทคนิคการผสมแบบกายภาพ (physical mixing) โดยอุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. Water bath MEMERT รุ่น WNB 14
2. ปีกเกอร์ แท่งแก้ว ขวดน้ำกลั่น ซ้อนตักสาร
3. มอเตอร์และใบพัดกวน
4. เครื่องวัด pH DENVER INSTRUMENT รุ่น UB-10 UltraBasic
5. ชุดอุปกรณ์การกรองแบบลดความดัน
6. กระดาษกรองเบอร์ 4 Whatman
7. เตาอบ (Oven) MEMERT, UNB 300
8. เตาเผา (Furnace) ซวโซติ, L9/12P
9. โถดูดความชื้น (Desiccator)
10. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง Mettler Toledo, ME-204
11. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve) Misumi Vona, 5-3294-33
12. เครื่องอัดเม็ด Chavachote
13. โกร่งบดสาร (Mortar and Pestle)

3.1.2 ชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์กราฟีนตามวิธีของฮูมเมอร์

1. ปีกเกอร์ ขวดกันกลม แท่งแก้ว ขวดน้ำกลั่น ซ้อนตักสาร
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง Mettler Toledo, ME-204
3. อ่างสำหรับใส่น้ำแข็ง
4. มอเตอร์และใบพัดกวน
5. ชุดอุปกรณ์การกรองแบบลดความดัน
6. เตาอบ (Oven) MEMERT, UNB 300
7. โกร่งบดสาร (Mortar and Pestle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของเจ้าของลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของลิขสิทธิ์

9. เครื่องหมุนเหวี่ยงสาร (Centrifuge)

3.1.3 ชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์

1. ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed-bed reactor)
2. ฉนวนใยแก้ว (Glass wool)
3. ถุงเก็บแก๊ส (Gas Sampling Bag)

3.2 เครื่องมือใช้ในการตรวจสอบเอกลักษณ์

1. เครื่องวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC), Varian CP-3800
2. เครื่องวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอัสฐาน (X-ray Diffractometer, XRD), Bruker AXS D8 Advance
3. เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค (Scanning Electron Microscope, SEM), LEO 1455 VP
4. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface Area and Porosity Analyzer, BET)

3.3 แก๊สและสารเคมี

1. คอปเปอร์ไนเตรต ไตรไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ความบริสุทธิ์ 99.50 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba chemie Pvt,Ltd. ประเทศอินเดีย
2. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.50 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma Aldrich Pte,Ltd ประเทศสิงคโปร์
3. ซิงค์ไนเตรต เฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ความบริสุทธิ์ 98.00 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba chemie Pvt,Ltd. ประเทศอินเดีย
4. อะลูมิเนียมไนเตรตไนนะไฮเดรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ความบริสุทธิ์ 98.00 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba chemie Pvt,Ltd. ประเทศอินเดีย
5. เอซซีเอสเอ็มไฟว์ (HZSM-5) เกรดการค้า
6. แกรไฟต์ (Graphite) เกรดการค้า
7. โซเดียมไนเตรต (NaNO_3) เกรดการค้า
8. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) เกรดการค้า
9. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) เกรดการค้า
10. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เกรดการค้า
11. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดการค้า
12. Quartz Sand บริษัท Wako Pure Chemical Industries,Ltd. ประเทศญี่ปุ่น
13. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
14. แก๊สไนโตรเจน (N_2) ความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Praxair (Thailand),Ltd. ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ความบริสุทธิ์ 5.00 เปอร์เซ็นต์ในแก๊สไนโตรเจน (N_2) บริษัท Praxair (Thailand),Ltd. ประเทศไทย
16. แก๊สสังเคราะห์ ($H_2:CO = 1:1$) บริษัท United industrial gases Co.,Ltd.

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา $CuO-ZnO-Al_2O_3$

1. นำคอปเปอร์ไนเตรต, ซิงค์ไนเตรต, อะลูมิเนียมไนเตรต ไปละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) $CuO:ZnO:Al_2O_3$ อัตราส่วน 6:3:1 โดยโมล
2. เตรียมโซเดียมคาร์บอเนตนำไปละลายน้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
3. นำสารละลายไนเตรตกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตใส่ในกรวยแยกคนละอัน
4. ทำการหยดสารละลายลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำปราศจากไอออน พร้อมปรับอัตราการหยดของสารละลายทั้งสองให้มี pH เท่ากับ 7 โดยการหยดสารละลายลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ผสมกันภายใต้ความเร็วการหมุน 600 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}C$
5. หลังจากทำการตกตะกอนเสร็จสิ้นให้ทำการแขวนลอยที่อุณหภูมิเดิม โดยใช้เวลานานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. ทิ้งให้ตกตะกอนไว้ประมาณ 1 คืน แล้วทำการล้างตะกอนที่ได้พร้อมกับบอบแห้งที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}C$ เป็น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. จากนั้นทำการเผาตะกอนที่อบเสร็จภายใต้ความดันบรรยากาศอุณหภูมิ $350\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีอัตราเพิ่มอุณหภูมิที่ $3\text{ }^{\circ}C$ ต่อนาที

3.4.2 การเตรียม HZSM-5

นำ HZSM-5 ไปเผาที่อุณหภูมิ $550\text{ }^{\circ}C$ โดยมีอัตราเพิ่มอุณหภูมิที่ $3\text{ }^{\circ}C$ ต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.4.3 การสังเคราะห์กราฟีนตามวิธีของฮูมเมอร์

1. ชั่งแกรไฟต์มา 2 กรัม, $NaNO_3$ 1 กรัม และ $KMnO_4$ 6 กรัม
2. ผสมแกรไฟต์และ $NaNO_3$ ลงในบีกเกอร์ ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเทลงขวดก้นกลม แล้ววางขวดก้นกลมลงบนอ่างน้ำแข็ง
3. เติม conc. H_2SO_4 ปริมาตร 46 มิลลิลิตร ปั่นกวนให้เข้ากัน ค่อยๆเติม $KMnO_4$ จากนั้นปั่นกวนให้เข้ากันแล้วปั่นต่อเป็นเวลา 15 นาที
4. ให้ความร้อนที่ $40\text{ }^{\circ}C$ ในอ่างร้อนเป็นเวลา 30 นาที พร้อมปั่นกวน
5. ค่อยๆเติมน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร ภายใต้การหล่อเย็น ปั่นกวนต่อที่ $90\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 90 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร และ H_2O_2 6 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่ออีกเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติม HCl ความเข้มข้น 10% v/v ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
7. ทำการล้างตะกอนโดยเทของผสมในบีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1500 มิลลิลิตร รอให้ตกตะกอน จากนั้นเทน้ำออก ทำซ้ำ 10 ครั้ง
8. กรองแบบลดความดัน
9. อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
10. นำสารที่ได้ไปทำการเขย่าด้วยเครื่องโซนิเคเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
11. นำไปแยกชั้นด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็ว 7000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จะได้กราฟีนออกมา

3.4.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $CuO-ZnO-Al_2O_3/HZSM-5$ อัตราส่วน 2:1 โดยมวล

1. นำโลหะออกไซด์และ HZSM-5 ที่ผ่านการเผาแล้วมาทำการผสมทางกายภาพด้วยอัตราส่วนโลหะออกไซด์:HZSM-5 เท่ากับ 2:1 โดยน้ำหนัก
2. อัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ด โดยใช้ความดัน 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 1 นาที
3. เมื่อตัวอย่างสารถูกอัดเป็นเม็ดแล้ว ให้นำมาบดด้วยโกร่งบดสาร
4. นำตัวอย่างสารมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานที่มีขนาด 500 ไมโครเมตร
5. นำสารที่เหลือจากการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานมาทำการอัดเม็ดแล้วบดซ้ำจนกระทั่งได้สารขนาด 500 ไมโครเมตร ที่มีน้ำหนักตามที่ต้องการ

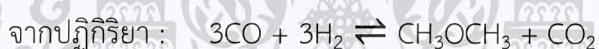
3.4.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $CuO-ZnO-Al_2O_3/Graphene$ อัตราส่วน 2:1 โดยมวล

1. นำคอปเปอร์ไนเตรต, ซิงค์ไนเตรต, อะลูมิเนียมไนเตรต ไปละลายในน้ำปราศจากไอออน โดยอัตราส่วน $CuO:ZnO:Al_2O_3$ เท่ากับ 6:3:1 โดยโมล
2. นำสารละลายไนเตรตกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตใส่ในกรวยแยกคนละอัน
3. ทำการชั่งกราฟีนที่มีปริมาตร 1 มิลลิลิตร จดบันทึกค่าที่ได้
4. ทำการหยดสารละลายลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำปราศจากไอออนและกราฟีน โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง $CuO-ZnO-Al_2O_3:Graphene$ เท่ากับ 2:1 โดยมวล พร้อมปรับอัตราการหยดของสารละลายทั้งสองในมี pH เท่ากับ 7 โดยการหยดสารละลายลงใน บีกเกอร์ที่บรรจุน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ผสมกันภายใต้ความเร็วการหมุน 600 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 70 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หลังจากทำการตกตะกอนเสร็จสิ้นให้ทำการแขวนลอยที่อุณหภูมิเดิม โดยใช้เวลากวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. ทิ้งให้ตกตะกอนไว้ประมาณ 1 คืน แล้วทำการล้างตะกอนที่ได้พร้อมกับบอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. จากนั้นทำการเผาตะกอนที่อบเสร็จภายใต้ความดันบรรยากาศอุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีอัตราเพิ่มอุณหภูมิที่ 3 °C ต่อนาที
8. นำตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์บนกราฟีน ที่ผ่านการเผาแล้วมาอัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ด โดยใช้ความดัน 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 1 นาที
9. เมื่อตัวอย่างสารถูกอัดเป็นเม็ดแล้ว จะนำมาบดด้วยโกร่งบดสาร
10. นำตัวอย่างสารมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานที่มีขนาด 500 ไมโครเมตร
11. นำสารที่เหลือจากการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานมาทำการอัดเม็ดแล้วบดซ้ำจนกระทั่งได้สารขนาด 500 ไมโครเมตร ที่มีน้ำหนักตามที่ต้องการ

3.4.6 การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรง



มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บน HZSM-5 หรือ กราฟีน ด้วยอัตราส่วน 2:1 โดยมวล ประมาณ 0.50 กรัม ผสมกับ Quartz Sand ประมาณ 0.5 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาแพ็คลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
2. ก่อนเริ่มทำปฏิกิริยา เก็บตัวอย่างแก๊สสังเคราะห์ไปตรวจวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นสารผสมของ แก๊สสังเคราะห์
3. บ้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ เพื่อขับไล่แก๊สออกซิเจน อากาศ และสารตกค้างอื่นออก
4. เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 5 °C ต่อนาที เป็นเวลาทั้งหมด 24 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 150 °C และคงอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 30 นาที
5. ลดอัตราการให้ความร้อนลงเหลือ 3 °C ต่อนาที เป็นเวลา 34 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิลดถึง 250 °C
6. ทำการเปลี่ยนแก๊สที่บ้อนจากแก๊สไนโตรเจนไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สไนโตรเจน เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนของการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาในส่วนของ Cu จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส CuO เป็น Cu เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. บ่อนแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้อัตราส่วน $H_2 : CO$ เป็น 1:1 ที่มีอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อเริ่มทำการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ประมาณ 6 ชั่วโมงและควบคุมความดันด้วย Back pressure valve ที่มีความดัน 40 บาร์ อุณหภูมิ $250\text{ }^{\circ}\text{C}$
8. เก็บตัวอย่างแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีทุกๆ 1 ชั่วโมง

3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอัญฐาน

เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอัญฐาน เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์ มาใช้วิเคราะห์ สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสาร ตัวอย่าง เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของ รังสีที่มุมต่างๆกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ในศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยใช้ $Cu\ K\alpha$ (ความยาวคลื่น 1.54 \AA) เป็นตัว X-ray source ศึกษา intensity ที่ 2θ ในช่วง $10^{\circ} - 80^{\circ}$ (step เป็น 0.040° และ counting time เป็น 1 วินาทีต่อ step) การหาขนาดผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์สามารถคำนวณได้จากค่าความสูงกึ่งกลาง (Full Width of Half Maximum, FWHM) โดยใช้สมการของ Scherrer ดังสมการ 3.1

$$\text{Crystalline Size} = \frac{k\lambda}{\beta_{1/2} \cos \Theta_B} \quad (3.1)$$

เมื่อ k คือ Unit Cell Geometry Dependent Constant

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

$\beta_{1/2}$ คือ ค่าความสูงกึ่งกลาง (Full Width of Half Maximum, FWHM)

Θ_B คือ Bragg Angle

3.5.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ การนำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้กำลังขยายเท่ากับ 1,000 เท่า และ 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว

Brunauer-Emmett-Teller surface area, BET เป็นวิธีศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิวสัมผัสรูพรุน โดยอาศัยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2 Adsorption) โดยใช้ Quanta Chrome Instruments ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ 100 มิลลิกรัม ซึ่งจะถูกนำมาให้ความร้อนก่อนทดสอบ (Out Gas) ที่อุณหภูมิ $350\text{ }^{\circ}C$ หาพื้นที่ ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้การคำนวณด้วยวิธี BET (BET calculation method)

3.5.4 การวิเคราะห์การแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม

เทคนิคสำหรับการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม โดยสารผสมตัวอย่างถูกป้อนเข้าที่ sample injection port จึงทำให้ถูกความร้อนจนกลายเป็นไอเข้าไปในคอลัมน์และถูกตรวจวัดสัญญาณด้วย Detector หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกบันทึกและแสดงผลออกมาในรูปของ Chromatogram ซึ่งแก๊สที่เป็นไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon gas), แก๊สเมทานอล (Methanol, CH_3OH) และไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl ether, CH_3OCH_3 หรือ DME) จะถูกตรวจวัดโดย FID (Flame Ionization Detector) ในขณะที่แก๊สอาร์กอน (Ar), แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) จะถูกตรวจวัดโดย TCD (Thermal Conductivity Detector)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

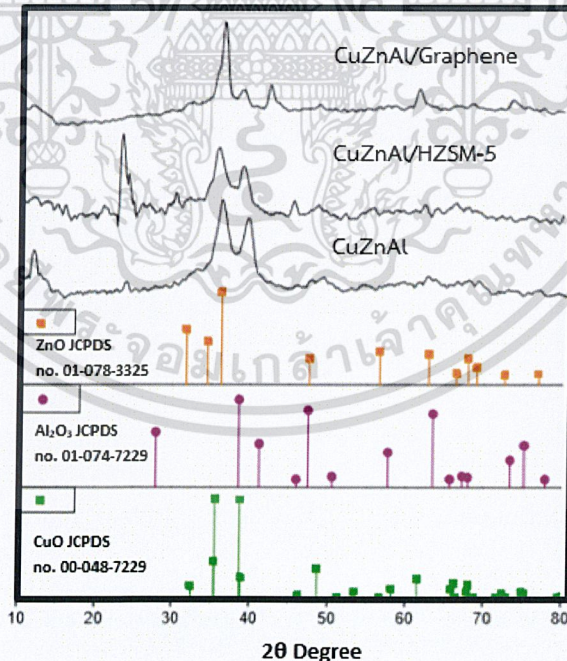
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 แบบ คือ CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 ในอัตราส่วน 6:3:1 CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene โดยทำการวิเคราะห์วิเคราะห์ 3 เทคนิค คือ การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน (XRD) การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับจุลภาค (SEM) และการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (BET)

4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างและความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สารประกอบในสารตัวอย่าง และศึกษารายละเอียดโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer นอกจากนี้ XRD ยังสามารถยืนยันโครงสร้างของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้โดยเทียบกับโครงสร้างมาตรฐานของสารนั้นๆ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง CuO-ZnO-Al₂O₃, CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5

และ CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene เทียบกับกราฟแสดงโครงสร้างผลึกของสารมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสาร CuO, ZnO, และ Al₂O₃ งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด มาวิเคราะห์โครงสร้างพบว่า CuO-ZnO-Al₂O₃ พบพีคของ CuO ปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 32.51° และ 38.71° ในระนาบ (110) และ (111) ตามลำดับ พบพีค ZnO ปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 36.27° ในระนาบ (101) และพบพีค Al₂O₃ ปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 38.59° ในระนาบ (104) ในขณะที่ CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 พบพีคของ CuO ปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 35.42° และ 38.71° ในระนาบ (002) และ (111) ตามลำดับ พบพีค ZnO ปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 36.27° ในระนาบ (101) พบพีค Al₂O₃ ปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 38.59° ในระนาบ (104) และเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างของ CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene พบพีคของ CuO ปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 35.42° และ 38.71° ในระนาบ (002) และ (111) ตามลำดับ พบพีค ZnO ปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 36.27° ในระนาบ (101) พบพีค Al₂O₃ ปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 38.59° ในระนาบ (104)

เมื่อนำกราฟของสารตัวอย่างทั้งหมดมาเทียบกับสารมาตรฐาน CuO (JCPDS on.00-048-1548), ZnO (JCPDS on.01-078-3325), Al₂O₃ (JCPDS on.01-074-7229) พบว่าพีคของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานข้างต้นส่วนใหญ่มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสารตัวอย่างมีสารข้างต้นเป็นองค์ประกอบ

นอกจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารตัวอย่างจากการเทียบกับสารมาตรฐานแล้ว เทคนิคดังกล่าวยังสามารถใช้ในการหาขนาดและความเป็นผลึกจากสมการของ Scherrer ได้เช่นกัน

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃, CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5, CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene โดยใช้สมการของ Scherrer

Catalysts	Crystalline Size (nm) ^a
CuO-ZnO-Al ₂ O ₃	13.2
CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /HZSM-5	10.7
CuO-ZnO-Al ₂ O ₃ /Graphene	21.2

a คำนวณได้โดยใช้สมการของ Scherrer โดยใช้โปรแกรม X'Pert Plus version 1.0.0.0

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃ มีขนาดผลึกเท่ากับ 13.2 nm ในขณะที่เมื่อทำการเติมตัวรองรับ HZSM-5 ส่งผลให้ขนาดผลึกเล็กลงเล็กน้อย เนื่องจากการเติม HZSM-5 ลงไปทำด้วยวิธีการผสมทางกายภาพ ซึ่งทำให้ผลึกมีการแตกตัวมากขึ้นแต่ไม่มาก ทำให้ผลึกมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย ในขณะที่การเติมกราฟีนลงไปส่งผลให้ผลึกมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากกราฟีนที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นแผ่นซึ่งมีผลทำให้ผลึกเกิดการกระจายตัวมากขึ้น แต่เนื่องจากผลึกมีปริมาณที่มากจนอาจส่งผลให้ผลึกเกิดการรวมตัวกันเอง ทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

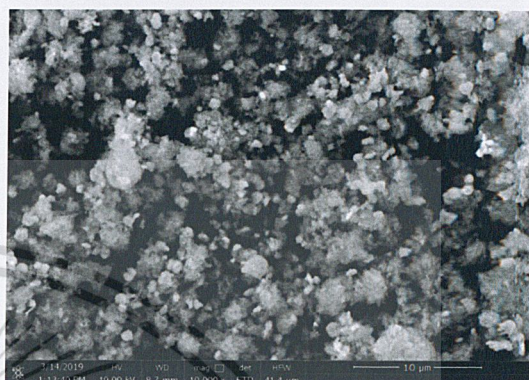
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับจุลภาค (SEM)

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถอธิบายลักษณะพื้นที่ผิว ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา



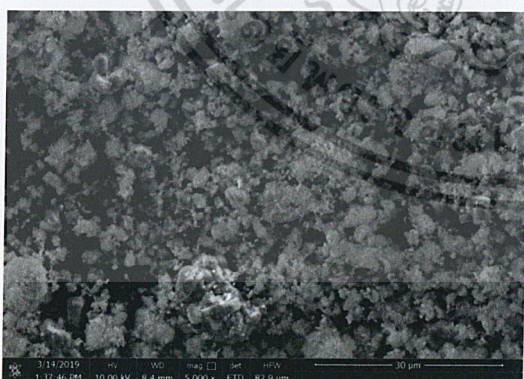
(ก)



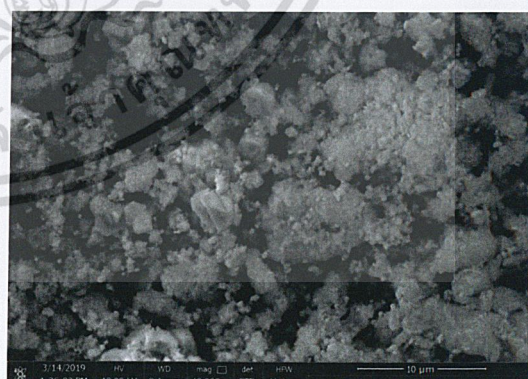
(ข)

รูปที่ 4.2 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์ (ก) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ (ข) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

จากรูปที่ 4.2 พบว่า สัณฐานวิทยาของคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$) มีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กที่มีหลายขนาดซึ่งกระจัดกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบและรวมตัวกันเป็นก้อน



(ก)



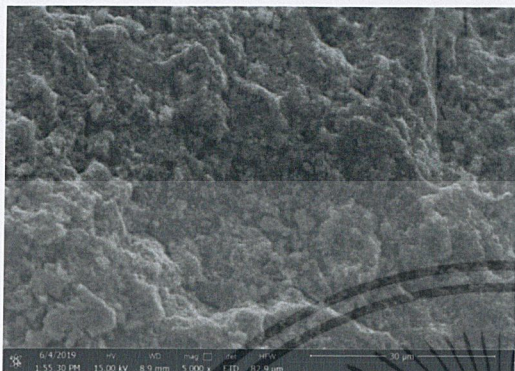
(ข)

รูปที่ 4.3 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียม

ออกไซด์บนตัวรองรับ HZSM-5 (ก) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ (ข) ที่กำลังขยาย 10,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบว่า สัณฐานวิทยาของคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับ HZSM-5 ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$) มีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กที่มีหลายขนาดซึ่งกระจายกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบและมีบางส่วนเป็นแท่งผลึกยาวออกมาชัดเจน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 รูปร่างสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับกราฟีน (ก) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ (ข) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

จากรูปที่ 4.4 พบว่า สัณฐานวิทยาของคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับกราฟีน ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$) มีลักษณะเป็นก้อนที่มีหลายขนาด ซึ่งกระจายตัวน้อยและเป็นแผ่นมากกว่า $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$

จากรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 พบว่าเมื่อเติมตัวรองรับ HZSM-5 ลงในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ จะส่งผลให้พบผลึกที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวที่เล็กกว่าผลึกของ $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งผลึกดังกล่าวเป็นผลึกของ HZSM-5 ในขณะที่เมื่อเติมตัวรองรับกราฟีนลงในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ จะส่งผลให้ผลึกเกิดการกระจายตัวและผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นแผ่นมากขึ้น แต่จะพบการจับตัวเป็นก้อนของผลึก เนื่องจากผลึกมีปริมาณที่มากจนอาจเกิดการรวมตัวกันเอง

4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธี BET

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยวิธี BET จะทำให้ทราบพื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนได้ ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการเร่งปฏิกิริยาที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยถ้าตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวมาก จะทำให้สารตั้งต้นสามารถมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาได้มาก ผลผลิตที่ได้ก็จะจะมีมากตามเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ คอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$), คอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับ HZSM-5 ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$) และคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับกราฟีน ($\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$)

Catalysts	Surface area (m^2/g)	Pore volume (cm^3/g)	Pore size (\AA)
$\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$	72.38	0.41	223.90
$\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$	180.40	0.47	103.60
$\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$	68.92	0.37	212.20

จากตารางที่ 4.2 พบว่า $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ มีพื้นที่ผิวมากที่สุดคือ $180.40 \text{ m}^2/\text{g}$ ในขณะที่ $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 72.38 และ $68.92 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ เนื่องจาก HZSM-5 มีพื้นที่ผิวที่สูงเมื่อเทียบกับกราฟีน ส่งผลให้การเติม HZSM-5 ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ มีผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวที่สูงตามไปด้วย ในขณะที่การเติมกราฟีนลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ ส่งผลให้อนุภาคกระจุกกระจายมากขึ้นแต่เนื่องจากอนุภาคมีปริมาณที่มากจึงเกิดการรวมตัวกันเองทำให้พื้นที่ผิวลดลงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาปริมาตรรูพรุนจะพบว่า $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$, $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ และ $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$ มีปริมาตรรูพรุนใกล้เคียงกันคือ 0.41, 0.47 และ $0.37 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ โดยที่ $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ มีปริมาตรรูพรุนมากที่สุด เนื่องจากการเตรียม $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ เตรียมได้จากวิธีการผสมทางกายภาพ ซึ่งส่งผลให้ผลึก $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ เกิดการแตกตัวของอนุภาคและเกิดรอยแตกมากขึ้น ทำให้รูพรุนมีปริมาตรมากขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่การเติมกราฟีนลงไป อาจทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ มีลักษณะเป็นแผ่นมากขึ้น ส่งผลให้รูพรุนมีปริมาตรลดลงเล็กน้อย

ในขณะที่เมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนจะพบว่า $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$ มีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกันคือ 223.90 และ 212.20 \AA ตามลำดับ ซึ่ง $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ มีขนาดรูพรุนน้อยที่สุดคือ 103.60 \AA เนื่องจาก HZSM-5 มีรูพรุน 3 แบบ ได้แก่ micro pore, meso pore และ macro pore ซึ่งขนาดผลึกที่วิเคราะห์ได้เป็นค่าเฉลี่ยของรูพรุนทั้ง 3 เอกสารนี้แบบ ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กกว่า $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ ในขณะที่กราฟีนมีลักษณะเป็นแผ่น ส่งผลให้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟีนไปลดขนาดรูพรุนให้เล็กลง ทำให้ขนาดรูพรุนของ CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene มีค่าน้อยกว่า CuO-ZnO-Al₂O₃ อยู่เล็กน้อย

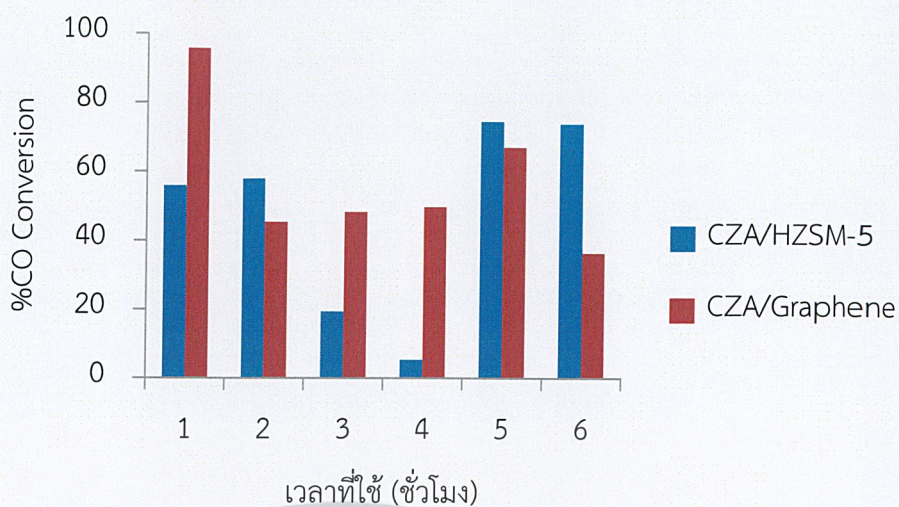
4.2 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรง

ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรงด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed-bed reactor) โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมและ Quartz Sand 0.5 กรัม ซึ่งก่อนการทำปฏิกิริยาได้ทำการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดสารตกค้างที่ไม่ต้องการภายในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นจึงทำการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแก๊สไฮโดรเจน 5% ที่อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจนกระทั่งตัวเร่งปฏิกิริยาในส่วนของ CuO ถูกรีดิวซ์เป็น Cu จากนั้นจึงนำมาเร่งปฏิกิริยากับแก๊สสังเคราะห์ซึ่งเป็นสารตั้งต้น โดยใช้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่าง CO:H₂ = 1:1 อัตราการไหลเท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่ออนาที ความดัน 40 บาร์ อุณหภูมิ 250 °C ปล่อยให้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ไปตรวจวัดทุกๆ 1 ชั่วโมง

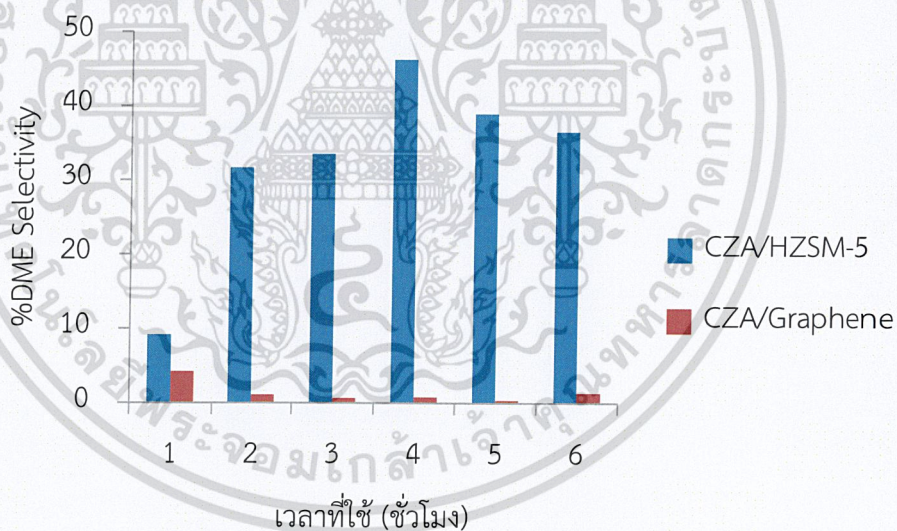
แก๊สที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) รุ่น CP-3800 ยี่ห้อ VARIAN โดยใช้คอลัมน์ GC-7538 ต่อกับ Thermal Conductivity Detector (TCD) เพื่อตรวจวิเคราะห์แก๊สอาร์กอน (Ar), แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และคอลัมน์ HP-PLOT/Q ต่อกับ Flame Ionization Detector (FID) เพื่อตรวจวิเคราะห์แก๊สไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon gas), แก๊สเมทานอล (CH₃OH) และแก๊สไดเมทิลอีเทอร์ (CH₃OCH₃)

ผลที่ได้จะศึกษาเฉพาะความสามารถในการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion) และความจำเพาะเจาะจงในการเกิดปฏิกิริยา (%Selectivity) ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ไดเมทิลอีเทอร์, เมทานอลและสารผลิตภัณฑ์รองอื่นๆ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะมีโลหะเหมือนกันคือ CuO-ZnO-Al₂O₃ แต่มีตัวรองรับที่ต่างกัน ได้แก่ HZSM-5 และกราฟีน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

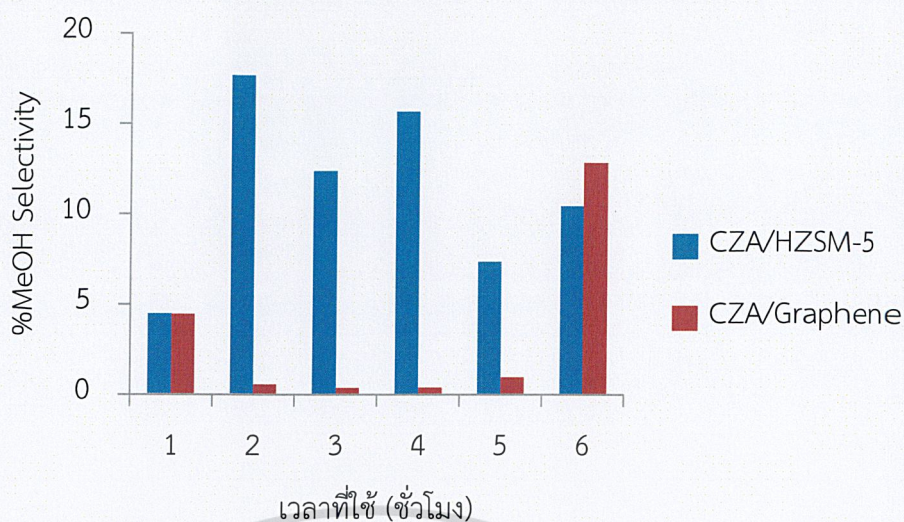


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (%CO Conversion) ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene

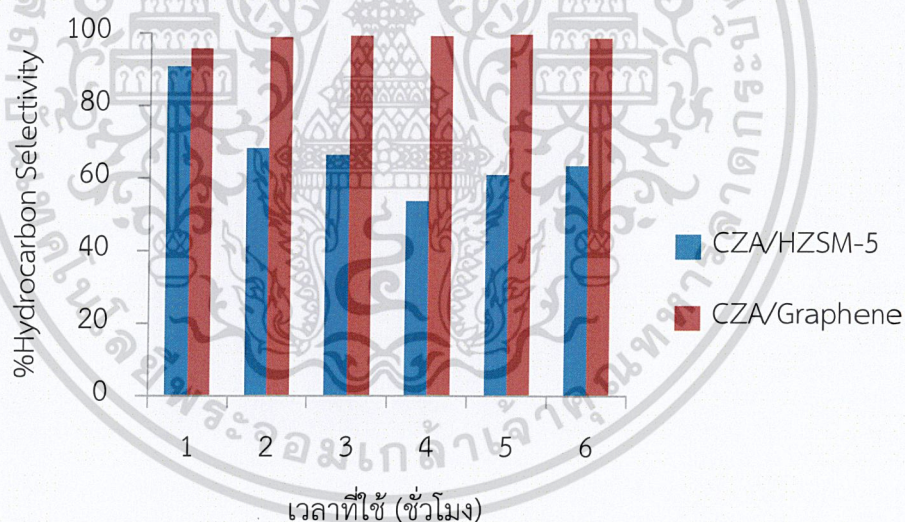


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity) ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

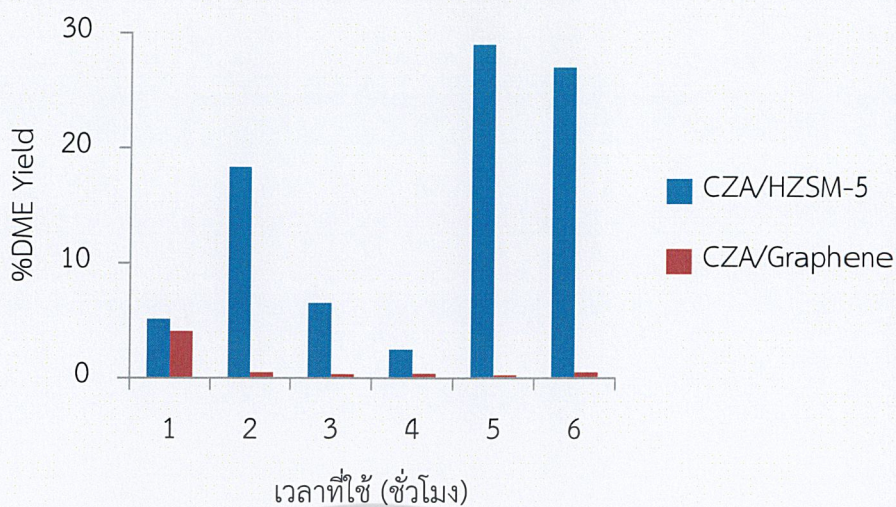


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของเมทานอล (%CH₃OH Selectivity) ใน ชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไฮโดรคาร์บอน (%Hydrocarbon Selectivity) ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงร้อยละของผลิตภัณฑ์ไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Yield) ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ และ $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$

จากกราฟร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในชั่วโมงที่ 2, 5 และ 6 สูงกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$ แต่จะน้อยกว่าในชั่วโมงที่ 1, 4 และ 5 ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองจะมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยในชั่วโมงที่ 3 และ 4 เมื่อเทียบกับในชั่วโมงอื่นๆ

จากกราฟร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ จะทำให้ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$ อย่างเห็นได้ชัดในทุกๆ ชั่วโมง สาเหตุเกิดจาก HZSM-5 มีความสามารถในการเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ได้มากกว่าเนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่สูงกว่าค่อนข้างมาก ทำให้ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ (Methanol Dehydration to DME) สามารถเกิดได้มาก

จากกราฟร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของเมทานอลพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ จะทำให้ค่าความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของเมทานอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์รองมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$ อย่างเห็นได้ชัดในชั่วโมงที่ 2, 3, 4 และ 5 แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันในชั่วโมงที่ 1 และ 6 สาเหตุที่ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองให้ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นเมทานอลที่ใกล้เคียงกันเพราะว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ฝั่งโลหะออกไซด์เหมือนกันคือ $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นเมทานอล (Methanol Synthesis from Syngas) นอกจากนี้ยังพบว่าเมทานอลที่เกิดขึ้นนี้มีความจำเพาะต่อการเลือกเกิดที่น้อยมากเมื่อเทียบกับไดเมทิลอีเทอร์เนื่องจากเมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์รองในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์

จากกราฟร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไฮโดรคาร์บอนพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$ จะทำให้ได้ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์รองน้อยกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$ เนื่องจากการใช้ HZSM-5 ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่ากราฟีน จะทำให้ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์มีค่าที่มากกว่า ทำให้ผลิตภัณฑ์รองเกิดน้อยกว่าตามไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์ บนตัวรองรับที่ต่างกันระหว่าง HZSM-5 และกราฟีน ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ไดมethylเอเทอร์แบบทางตรง โดยใช้อัตราส่วน Cu:Zn:Al = 6:3:1 โดยโมล และอัตราส่วน CuO-ZnO-Al₂O₃:HZSM-5หรือกราฟีนเท่ากับ 2:1 โดยมวล ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃ เตรียมได้ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-Precipitation Method) เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาตรวจวิเคราะห์ ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 มีขนาดผลึกมากที่สุดคือ 21.2 nm และสารตัวอย่างทั้งหมด ปรากฏพีคที่คล้ายกับพีคของสารมาตรฐาน CuO, ZnO และ Al₂O₃ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างมีสารดังกล่าวเป็นองค์ประกอบ ในขณะที่เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาตรวจสอบสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่า เมื่อเพิ่มตัวรองรับ HZSM-5 ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃ จะปรากฏแท่งผลึกยาวมาบางส่วน ซึ่งเป็นของ HZSM-5 ในขณะที่เมื่อเพิ่มตัวรองรับกราฟีนลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃ จะทำให้การกระจายตัวของผลึกลดลงอย่างเห็นได้ชัดและมีลักษณะเป็นแผ่นมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃ แบบไม่มีตัวรองรับ และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากที่สุดคือ 180.40 m²/g และ 0.47 cm³/g ในขณะที่ CuO-ZnO-Al₂O₃ แบบไม่มีตัวรองรับมีขนาดรูพรุนมากที่สุดคือ 223.90 Å

จากการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ไดเมทิลเอเทอร์แบบทางตรงของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO-ZnO-Al₂O₃) บนตัวรองรับที่ต่างกันระหว่าง HZSM-5 และกราฟีนพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใกล้เคียงกันคือ 47.797% และ 57.035% ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของ DME, CH₃OH และ Hydrocarbon เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 มีค่า 32.705 %, 11.338 % และ 67.295 % ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของ DME,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CH₃OH และ Hydrocarbon เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene มีค่า 1.425 %, 3.267 % และ 98.575 % ตามลำดับ และร้อยละผลิตภัณฑ์ของไดเมทิลอีเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 และ CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene มีค่าเท่ากับ 14.744 % และ 1.005 % ตามลำดับ

จึงสรุปได้ว่าการตรวจสอบเอกลักษณ์และจากการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับ HZSM-5 ให้ผลที่ดีที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด ซึ่งส่งผลให้แก๊สสังเคราะห์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษทำการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับที่ต่างกันระหว่าง HZSM-5 และกราฟีน เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรงจากแก๊สสังเคราะห์ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ซึ่งทำการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ศึกษาการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง CuO-ZnO-Al₂O₃:HZSM-5 และอัตราส่วนระหว่าง CuO-ZnO-Al₂O₃:Graphene ว่ามีผลต่อการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรงหรือไม่
2. เปลี่ยนแก๊สที่ใช้ในการเผาตัวรองรับก่อนการผสมกับตัวเร่งฝังโลหะจากการเผาด้วยบรรยากาศปกติเป็นการเผาด้วยแก๊สอื่นๆ เช่น แก๊สไนโตรเจน เพื่อศึกษาผลต่อการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรง
3. เปลี่ยนตัวรองรับเป็นสารตัวอื่นที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากขึ้น เพื่อศึกษาผลต่อการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. 2554. “ความรู้เกี่ยวกับไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl Ether)”. [Online]. Available : http://www.doeb.go.th/knowledge/data/1Dimethyl_Ether
- [2] T.A. Semelsberger, R.L. Borup, H.L. Greene. 2006. “Dimethyl Ether (DME) as an Alternative Fuel”. *Journal of Power Sources*. (156) : 497-511.
- [3] ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ. 2551. “เทคโนโลยีGTL - สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)” [Online]. Available : www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/p95-104.pdf
- [4] ดร. ชูสิทธิ์ บรรจงลิขิตกุล. 2550. “เมทานอล หรือเมทิล แอลกอฮอล์”. [Online]. Available http://elib.fda.moph.go.th/library/default.asp?page2=subdetail&id_L1=27&id_L2=15672&id_L3=1131
- [5] Science Lab. 2013. “Material Safety Data Sheet Copper oxide MSDS”. [Online]. Available : <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9923595>
- [6] Science Lab. 2013. “Material Safety Data Sheet Zinc oxide MSDS”. [Online]. Available : <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9927329>
- [7] Science Lab. 2013. “Material Safety Data Sheet Aluminum oxide MSDS”. [Online]. Available : <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9922858>
- [8] Cejka, Avelino Corma and Stacey Zones. 2011. “Zeolites and Catalysis. Synthesis, Reactions and Applications”. *Angewandte Chemie International* (24): p. 5425-5426.
- [9] นิตยา สอาด. 2556 “การสังเคราะห์กราฟีน/โคบอลต์ออกไซด์เพื่อตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2558. “X-ray Diffractometer XRD”. [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-เครื่องวิเคราะห์ทดสอบทางรังสีเอกซ-xrd.html>.
- [11] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2559. “Scanning Electro Microscope”. [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/microanalysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscop.html>.
- [12] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่. 2560. “Surface area and porosity analyzer (BET)”. [Online]. Available : <http://u8.psu.ac.th/blog/utai1/43425?locale=th>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Ainara Ateka, Paula Perez-Urriarte. 2016. "Direct synthesis of dimethyl ether from syngas on CuO-ZnO- MnO/SAPO-18 Bifunctional catalyst". International Journal of Hydrogen Energy. (41): 18015-18026
- [14] Dilshad Masiha, Sohrab Rohani. 2017. "Low-Temperature methanol dehydration to dimethyl ether over various small-pore zeolites". Catalysis B. (217): 247-255
- [15] I.A. Kurzina , S.I. Reshetnikov. 2017. "Direct synthesis of dimethyl ether from synthesis gas: Experimental study and mathematical modeling". Chemical Engineering Journal. (329) : 135-141
- [16] S.C. Lee, K. Schneider, J. Schumann, A.K. Mogakicherla. 2015. "Effect of Metal Precursor on Cu/ZnO/Al₂O₃ Synthesized by Flame Spray Pyrolysis for Direct DME Production." Chemical Engineering Science. (138) : 194-202



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

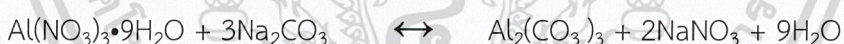
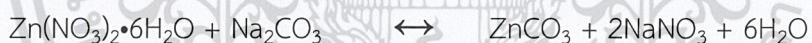
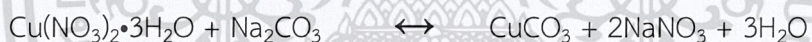
1. มวลโมเลกุลของสารต่างๆ

มวลโมเลกุลของ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ	241.60	กรัมต่อโมล
มวลโมเลกุลของ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ	297.48	กรัมต่อโมล
มวลโมเลกุลของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ	374.98	กรัมต่อโมล
มวลโมเลกุลของ CuO เท่ากับ	79.55	กรัมต่อโมล
มวลโมเลกุลของ ZnO เท่ากับ	81.39	กรัมต่อโมล
มวลโมเลกุลของ Al_2O_3 เท่ากับ	101.96	กรัมต่อโมล
มวลโมเลกุลของ $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ	262.90	กรัมต่อโมล
มวลโมเลกุลของ Na_2CO_3 เท่ากับ	105.99	กรัมต่อโมล

2. วิธีการคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียม

ออกไซด์อัตราส่วน 6:3:1 โดยโมล

2.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังนี้



2.2 ขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

2.2.1 ต้องการ CuO 6 กรัม

$$\begin{aligned} \text{mol CuO} &= \frac{\text{g CuO}}{\text{Mw CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3} \\ &= \frac{6 \text{ g}}{262.90 \text{ g/mol}} \\ \text{mol CuO} &= 0.0228 \text{ mol} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{mol Cu(NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} &= \text{mol CuO} \\
 \text{g Cu(NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} &= \text{mol CuO} \times \text{Mw Cu(NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} \\
 &= 0.0228 \text{ mol} \times 241.60 \text{ g/mol} \\
 &= 5.5085 \text{ g}
 \end{aligned}$$

2.2.2 ต้องการ ZnO 3 กรัม

$$\begin{aligned}
 \text{mol ZnO} &= \frac{\text{g ZnO}}{\text{Mw CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3} \\
 &= \frac{3 \text{ g}}{262.90 \text{ g/mol}}
 \end{aligned}$$

$$\text{mol ZnO} = 0.0114 \text{ mol}$$

คำนวณหามวลของ $\text{Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่ต้องใช้

$$\begin{aligned}
 \text{mol Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= \text{mol ZnO} \\
 \text{g Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= \text{mol ZnO} \times \text{Mw Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \\
 &= 0.0114 \text{ mol} \times 297.48 \text{ g/mol} \\
 &= 3.3912 \text{ g}
 \end{aligned}$$

2.2.3 ต้องการ Al_2O_3 1 กรัม

$$\begin{aligned}
 \text{mol Al}_2\text{O}_3 &= \frac{\text{g Al}_2\text{O}_3}{\text{Mw CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3} \\
 &= \frac{1 \text{ g}}{262.90 \text{ g/mol}}
 \end{aligned}$$

$$\text{mol Al}_2\text{O}_3 = 0.0038 \text{ mol}$$

คำนวณหามวลของ $\text{Al(NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ที่ต้องใช้

$$\begin{aligned}
 \text{mol Al(NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} &= \text{mol Al}_2\text{O}_3 \\
 \text{g Al(NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} &= \text{mol Al}_2\text{O}_3 \times \text{Mw Al(NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} \\
 &= 0.0038 \text{ mol} \times 374.98 \text{ g/mol} \\
 &= 1.4250 \text{ g}
 \end{aligned}$$

2.2.4 คำนวณหามวลของ Na_2CO_3 ที่ต้องใช้

$$\begin{aligned}
 \text{mol Na}_2\text{CO}_3 &= \text{mol CuO} + \text{mol ZnO} + \text{mol Al}_2\text{O}_3 \\
 &= 0.0228 \text{ mol} + 0.0114 \text{ mol} + 0.0038 \text{ mol} \\
 &= 0.038 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{g Na}_2\text{CO}_3 = \text{mol Na}_2\text{CO}_3 \times \text{Mw Na}_2\text{CO}_3$$

$$= 0.038 \text{ mol} \times 105.99 \text{ g/mol}$$

$$= 4.0276 \text{ g}$$

3. วิธีการคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับ HZSM-5

3.1 อัตราส่วนโดยมวลของ CuO-ZnO-Al₂O₃:HZSM-5 เท่ากับ 2:1

3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃ ที่เตรียมได้มีมวลเท่ากับ 10 กรัม

3.3 ดังนั้นจะต้องชั่ง HZSM-5 มา $10 \times 0.5 = 5$ กรัม

4. วิธีการคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับกราฟีน

4.1 อัตราส่วนโดยมวลของ CuO-ZnO-Al₂O₃:Graphene เท่ากับ 2:1

4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃ ที่เตรียมได้มีมวลเท่ากับ 10 กรัม

4.3 ดังนั้นจะต้องใช้กราฟีนเท่ากับ $10 \times 0.5 = 5$ กรัม

4.4 หากความหนาแน่นของกราฟีนในหน่วย กรัม/มิลลิลิตร กำหนดให้เป็น x กรัม/

มิลลิลิตร

4.5 ปริมาตรของกราฟีนที่ต้องใช้เท่ากับ $5/x$ มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองในการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนด้วยวิธี BET ของตัวเร่งปฏิกิริยา
คอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์ (CuO-ZnO-Al₂O₃)

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

P/P ₀	Volume (cm ³ /g) STP	1/(W((P ₀ /P) ⁻¹))
0.056534	15.3441	3.125
0.083174	15.9594	4.548
0.108300	16.3784	5.933
0.133330	16.9941	7.243
0.158000	17.7231	8.417
0.182760	18.2511	9.804
0.206910	19.1420	10.900
0.232570	20.1086	12.060
0.256470	21.5435	12.810
0.281470	22.6077	13.860
0.307190	23.5928	15.040

$$\text{Area} = 72.38 \text{ m}^2/\text{g}$$

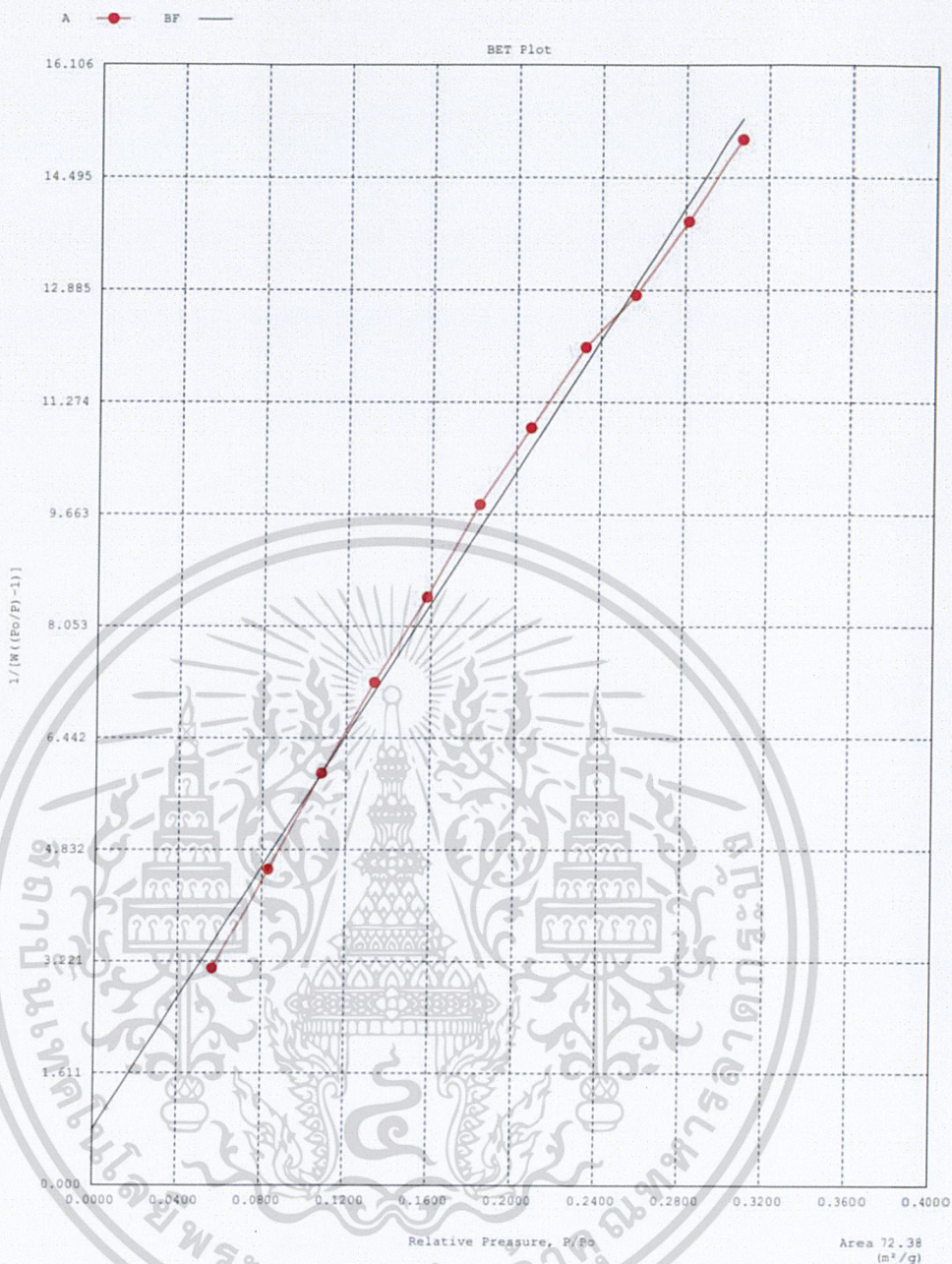
$$\text{Slope} = 47.31$$

$$\text{Y - Intercept} = 0.8054$$

$$\text{Correlation Coefficient} = 0.997801$$

$$\text{C} = 59.74$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 กราฟการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃

SURFACE AREA DATA Multipoint BET	72.38 m ² /g
PORE VOLUME DATA Total Pore Volume for pores	0.4051 cm ³ /g
PORE SIZE DATA Average Pore Diameter	223.90 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนด้วยวิธี BET ของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับ HZSM-5 (CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5)

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

P/P ₀	Volume (cm ³ /g) STP	1/(W((P ₀ /P) ⁻¹))
0.053693	48.0492	0.9448
0.081149	49.7538	1.420
0.106510	51.1083	1.866
0.131890	52.2132	2.328
0.157380	53.1681	2.811
0.182370	54.1268	3.297
0.207600	54.8975	3.818
0.231420	56.2979	4.279
0.257230	57.4506	4.823
0.281600	58.9192	5.323
0.306100	60.2972	5.853

Area = 180.40 m²/g

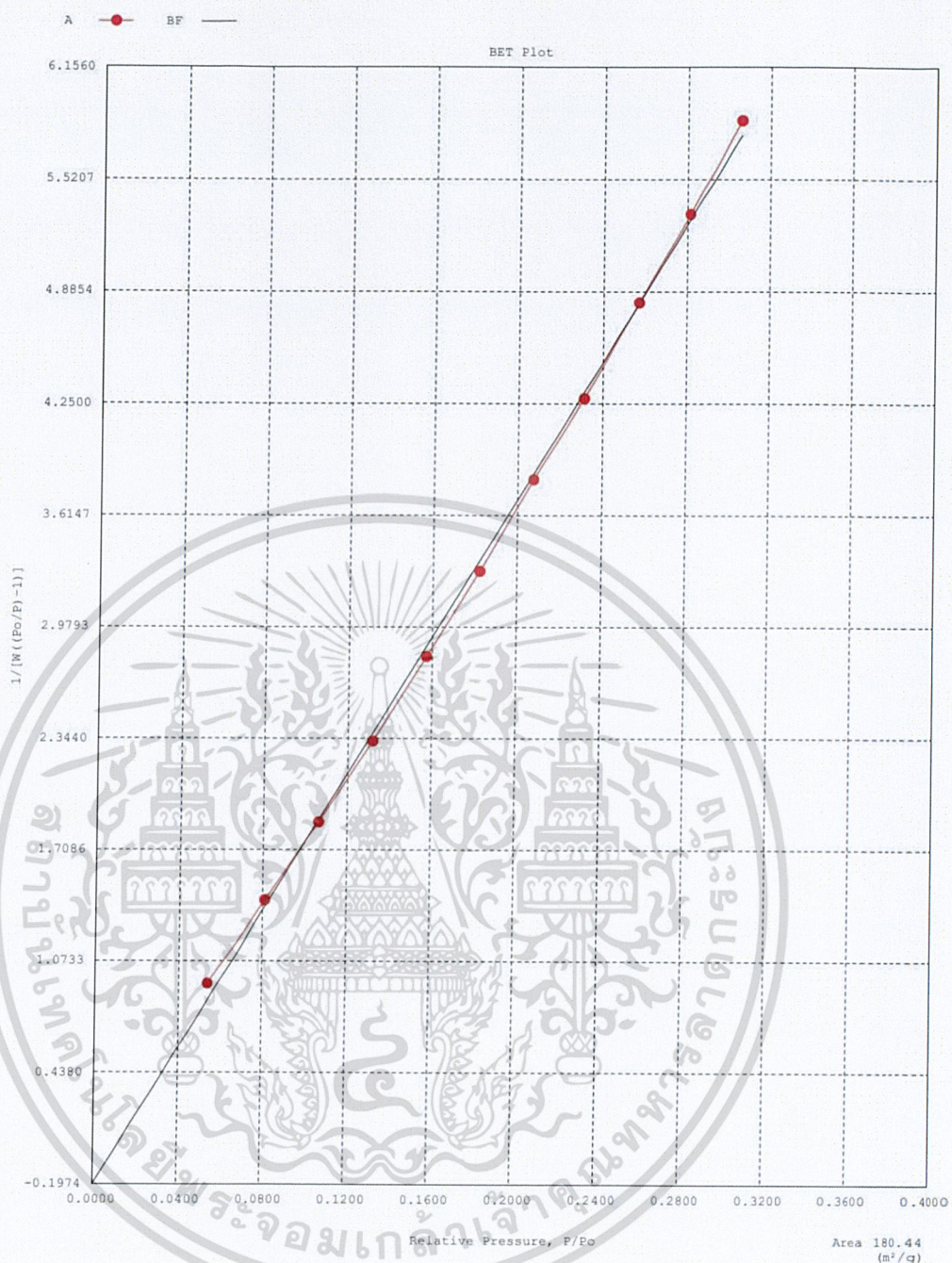
Slope = 19.50

Y - Intercept = -0.1974

Correlation Coefficient = 0.999432

C = -97.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 กราฟการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5

SURFACE AREA DATA Multipoint BET 180.40 m²/g

PORE VOLUME DATA Total Pore Volume for pores 0.4675 cm³/g

PORE SIZE DATA Average Pore Diameter 103.60 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนด้วยวิธี BET ของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับกราฟีน (CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene)

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

P/P ₀	Volume (cm ³ /g) STP	1/(W((P ₀ /P) ⁻¹))
0.055782	13.1881	3.584
0.081754	14.0628	5.066
0.107740	14.6192	6.609
0.131870	15.4675	7.857
0.157180	16.2405	9.188
0.182140	17.0255	10.47
0.206270	17.9102	11.61
0.231760	18.9145	12.76
0.256900	19.9235	13.88
0.280790	21.1556	14.77
0.306820	21.9814	16.11

Area = 68.92 m²/g

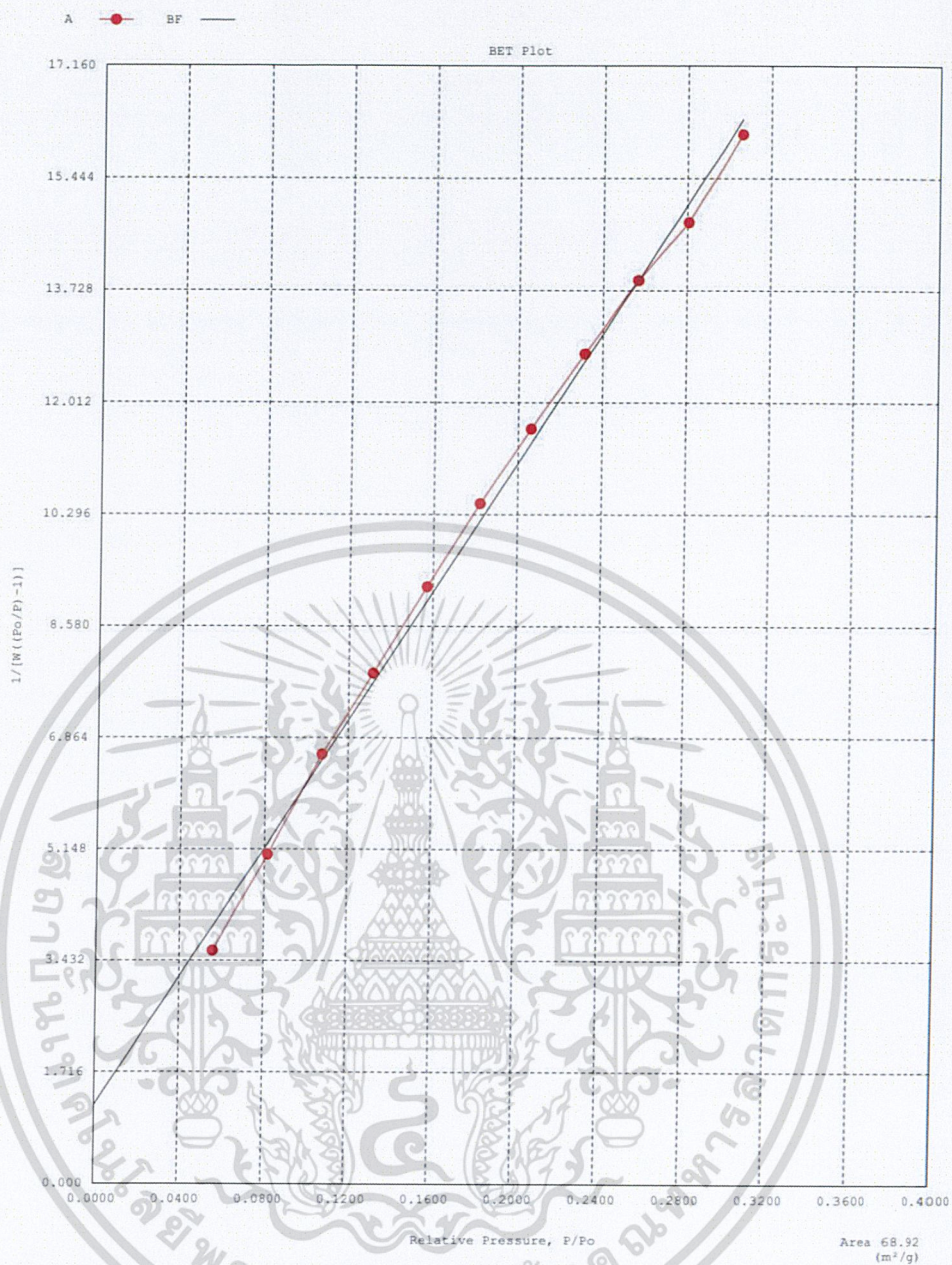
Slope = 49.32

Y - Intercept = 1.210

Correlation Coefficient = 0.998412

C = 41.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 กราฟการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene

SURFACE AREA DATA Multipoint BET	68.92 m ² /g
PORE VOLUME DATA Total Pore Volume for pores	0.3656 cm ³ /g
PORE SIZE DATA Average Pore Diameter	212.20 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์

1. การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับ HZSM-5 (CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5)

1.1 การคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

จากสูตร

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

ตัวอย่างการคำนวณ %CO Conversion ในชั่วโมงที่ 1

จากสูตร

$$\text{mole syngas} = \frac{PV}{RT}$$

กำหนดให้

$$P = 1.003 \text{ atm}$$

$$V = 20 \text{ mL/min}$$

$$R = 82.06 \text{ mL}\cdot\text{atm/mol}\cdot\text{K}$$

$$T = 301 \text{ K}$$

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \text{mole syngas} &= \frac{(1.003 \text{ atm})(20 \text{ mL/min})}{(82.06 \text{ mL}\cdot\text{atm/mol}\cdot\text{K})(301 \text{ K})} \\ &= 0.000812144 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

CO mole (Initial) คำนวณจาก

$$\begin{aligned} \text{CO mole (Initial)} &= \text{Syngas's Standard Peak Area (GC-TCD)} \times \text{mole syngas} \\ &= 1.5675 \times 0.000812144 \text{ mol/min} \\ &= 0.00127 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

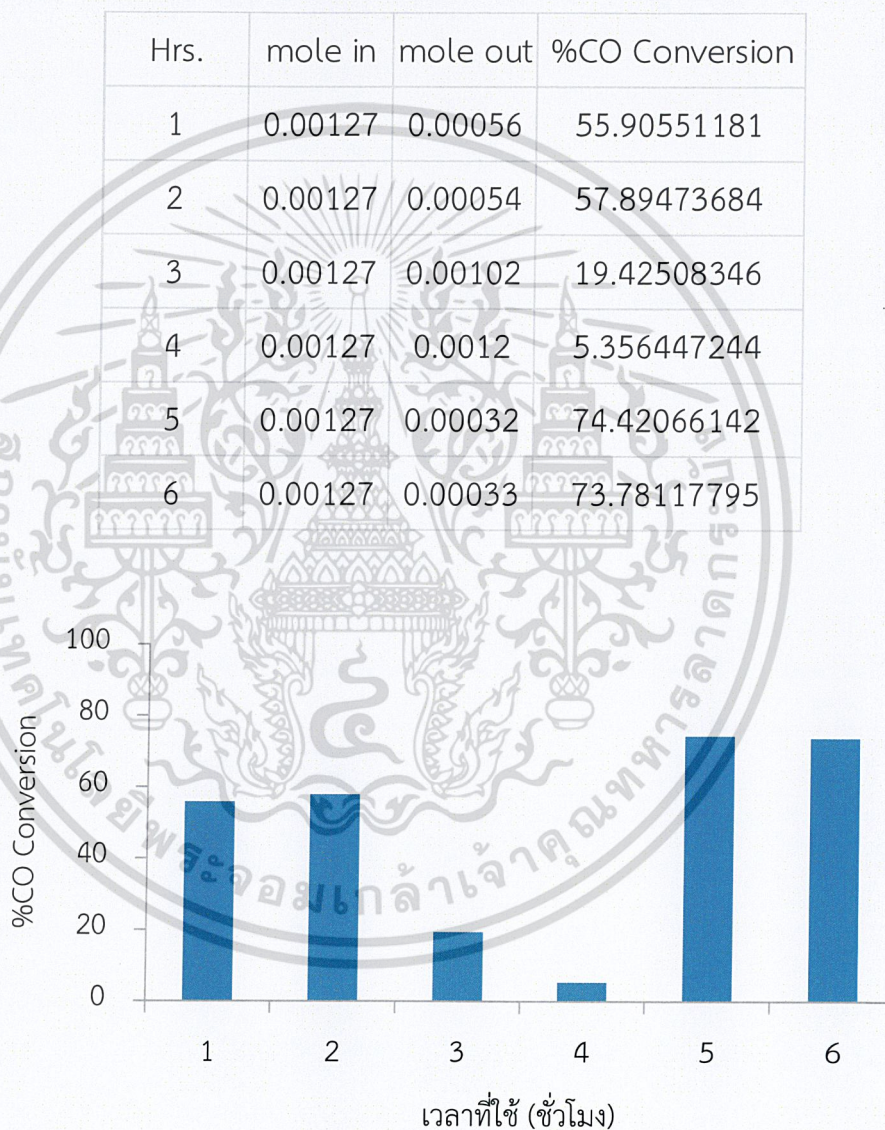
$$\begin{aligned} \text{CO mole (Final)} &= \text{Syngas's Standard Peak Area (GC-TCD)} \times \text{mole syngas} \\ &= 0.685 \times 0.000812144 \text{ mol/min} \\ &= 0.00056 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \%CO \text{ Conversion} &= \frac{0.00127 \text{ mol/min} - 0.00056 \text{ mol/min}}{0.00127 \text{ mol/min}} \times 100 \\ &= 55.9055 \% \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.1 แสดง %CO Conversion ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6



รูปที่ ค.1 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การคำนวณหาค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity)

1.2.1 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity)

จากสูตร

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

ตัวอย่างการคำนวณ %DME Selectivity ในชั่วโมงที่ 1

$$\text{mole DME Produced} = \frac{\text{mole syngas} \times \frac{\text{DME's Area Peak}}{\text{Standard Peak}}}{\text{All Products' Area Peak}}$$

$$\text{mole All Products} = \sum_{i=1}^n (\text{mol } C_n) + \text{mol } CO_2 + 2\text{mol DME}$$

$$C_n = \frac{\text{mole syngas} \times \frac{C_n \text{'s Area Peak}}{\text{Standard Peak}}}{\text{All Products' Area Peak}} \times n$$

เมื่อ n คือจำนวนคาร์บอน (C) ในสารประกอบ

$$DME = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 29066}{503418}$$

$$= 4.689 \times 10^{-5} \text{ mol/min}$$

$$C_1 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 330595}{503418} \times 1$$

$$= 5.333 \times 10^{-4} \text{ mol/min}$$

$$C_2 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 106362}{503418} \times 2$$

$$= 3.432 \times 10^{-4} \text{ mol/min}$$

$$C_3 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 161}{503418} \times 3$$

$$= 7.792 \times 10^{-7} \text{ mol/min}$$

$$C_4 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 5798}{503418} \times 4$$

$$= 3.741 \times 10^{-5} \text{ mol/min}$$

$$C_5 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 1453}{503418} \times 5$$

$$= 1.172 \times 10^{-5} \text{ mol/min}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{CO}_2 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 346}{503418} \times 1$$

$$= 5.582 \times 10^{-7} \text{ mol/min}$$

ดังนั้นจะได้

$$\text{mol All Products} = \{2(4.689 \times 10^{-5}) + (5.333 \times 10^{-4}) + (3.432 \times 10^{-4}) + (7.792 \times 10^{-7}) + (3.741 \times 10^{-5}) + (1.172 \times 10^{-5}) + (5.582 \times 10^{-7})\} \text{ mol/min}$$

$$= 0.00102 \text{ mol/min}$$

$$\% \text{DME Selectivity} = \frac{2 \times (4.689 \times 10^{-5}) \text{ mol/min}}{0.00102 \text{ mol/min}} \times 100$$

$$= 9.187 \%$$

ตารางที่ ค.2 แสดง %DME Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6

Hours	%DME Selectivity
1	9.187
2	31.695
3	33.541
4	46.265
5	38.977
6	36.564

1.2.2 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของเมทานอล (%CH₃OH Selectivity)

จากสูตร

$$\% \text{CH}_3\text{OH Selectivity} = \frac{\text{mole CH}_3\text{OH produced}}{\text{mole All Products}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ %DME Selectivity ในชั่วโมงที่ 1

$$\text{mole CH}_3\text{OH Produced} = \frac{\text{mole syngas} \times \frac{\text{CH}_3\text{OH's Area Peak}}{\text{Standard Peak}}}{\text{All Products' Area Peak}}$$

$$\text{mole All Products} = \sum_{i=1}^n (\text{mol C}_i) + \text{mol CO}_2 + 2\text{mol DME} + \text{mol CH}_3\text{OH}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_n = \frac{\text{mole syngas} \times \frac{C_n \text{ 's Area Peak}}{\text{Standard Peak}}}{\text{All Products' Area Peak}} \times n$$

เมื่อ n คือจำนวนคาร์บอน (C) ในสารประกอบ

$$\begin{aligned} \text{mole CH}_3\text{OH Produced} &= \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 29637}{503418} \\ &= 4.781 \times 10^{-5} \text{ mol/min} \end{aligned}$$

จากการคำนวณหา mol DME, mol C₁, mol C₂, mol C₃, mol C₄, mol C₅ และ mol CO₂ ในการคำนวณหา %DME Selectivity ก่อนหน้านี้อาจได้

$$\text{mole All Products สำหรับการหา \%DME Selectivity} = 0.00102 \text{ mol/min}$$

ดังนั้นจะได้

$$\text{mole All Products สำหรับการหา \%CH}_3\text{OH Selectivity} = \{0.00102 + (4.781 \times 10^{-5})\} \text{ mol/min} = 0.00107 \text{ mol/min}$$

$$\begin{aligned} \% \text{CH}_3\text{OH Selectivity} &= \frac{(4.781 \times 10^{-5}) \text{ mol/min}}{0.00107 \text{ mol/min}} \times 100 \\ &= 4.474 \% \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.3 แสดง %CH₃OH Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 ในช่วงเวลาที่ 1 ถึง 6

Hours	%CH ₃ OH Selectivity
1	4.474
2	17.686
3	12.395
4	15.679
5	7.357
6	10.437

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไฮโดรคาร์บอน

(%Hydrocarbon Selectivity)

$$\% \text{Hydrocarbon Selectivity} = \frac{\text{mole Hydrocarbon produced}}{\text{mole All Products}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ %Hydrocarbon Selectivity ในชั่วโมงที่ 1

$$\text{mole Hydrocarbon Produced} = \text{mole } C_1 + \text{mole } C_2 + \text{mole } C_3 + \text{mole } C_4 + \text{mole } C_5 + \text{mole } CO_2$$

$$\text{mole All Products} = \sum_{i=1}^n (\text{mol } C_n) + \text{mol } CO_2 + 2\text{mol DME}$$

$$C_n = \frac{\text{mole syngas} \times \frac{C_n \text{ 's Area Peak}}{\text{Standard Peak}}}{\text{All Products' Area Peak}} \times n$$

เมื่อ n คือจำนวนคาร์บอน (C) ในสารประกอบ

$$\text{mole Hydrocarbon Produced} = 9.270 \times 10^{-4} \text{ mol/min}$$

จากการคำนวณหา mol DME, mol C_1 , mol C_2 , mol C_3 , mol C_4 , mol C_5 และ mol CO_2 ในการคำนวณหา %DME Selectivity ก่อนหน้านี้จะได้mole All Products สำหรับการหา %DME Selectivity = 0.00102 mol/min
ดังนั้นจะได้

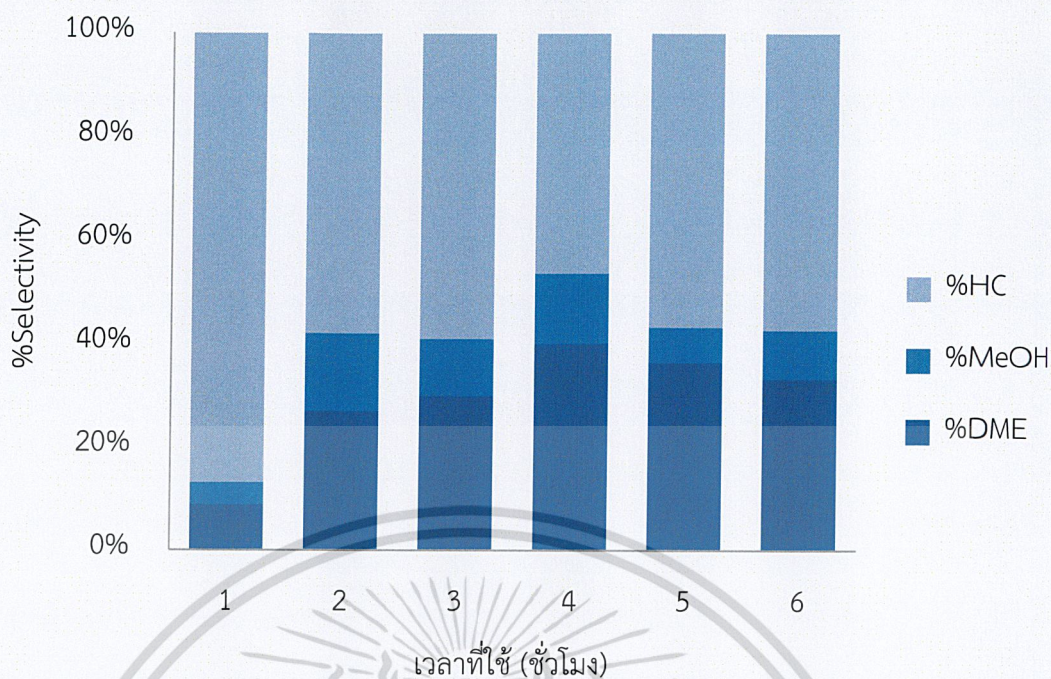
mole All Products สำหรับการหา %Hydrocarbon Selectivity = 0.00102 mol/min

$$\begin{aligned} \% \text{Hydrocarbon Selectivity} &= \frac{9.270 \times 10^{-4} \text{ mol/min}}{0.00102 \text{ mol/min}} \times 100 \\ &= 90.813 \% \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.4 แสดง %Hydrocarbon Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO- Al_2O_3 /HZSM-5 ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6

Hours	%HC Selectivity
1	90.813
2	68.305
3	66.459
4	53.735
5	61.023
6	63.436

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์, เอทานอลและไฮโดรคาร์บอนในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5

1.3 การคำนวณหาค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Yield)

จากสูตร

$$\%DME \text{ Yield} = \frac{\%CO \text{ Conversion} \times \%DME \text{ Selectivity}}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณ %DME Yield ในชั่วโมงที่ 1

จากภาคผนวก ค. ตอนที่ 1.1 และ 1.2.1 จะได้

%CO Conversion = 55.906 % และ %DME Selectivity = 32.705 %

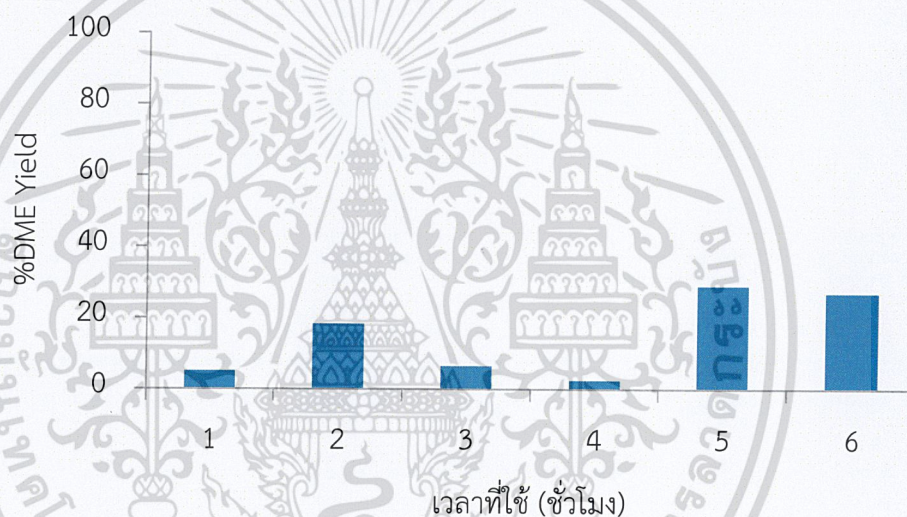
ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \%DME \text{ Yield} &= \frac{55.906 \% \times 9.187 \%}{100} \\ &= 5.136 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 แสดง %DME Yield ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5 ใน ชั่วโมงที่ 1 ถึง 6

Hours	%DME Yield
1	5.136
2	18.350
3	6.515
4	2.478
5	29.007
6	26.977



รูปที่ ค.3 แสดงผลร้อยละของผลิตภัณฑ์ไดเมทิลอีเทอร์ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/HZSM-5

2. การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์-ซิงค์ออกไซด์-อะลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับกราฟีน (CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene)

2.1 การคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

จากสูตร

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

ตัวอย่างการคำนวณ %CO Conversion ในชั่วโมงที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร

$$\text{mole syngas} = \frac{PV}{RT}$$

กำหนดให้

$$P = 1.003 \text{ atm}$$

$$V = 20 \text{ mL/min}$$

$$R = 82.06 \text{ mL}\cdot\text{atm/mol}\cdot\text{K}$$

$$T = 301 \text{ K}$$

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \text{mole syngas} &= \frac{(1.003 \text{ atm})(20 \text{ mL/min})}{(82.06 \text{ mL}\cdot\text{atm/mol}\cdot\text{K})(301 \text{ K})} \\ &= 0.000812144 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

CO mole (Initial) คำนวณจาก

$$\begin{aligned} \text{CO mole (Initial)} &= \text{Syngas's Standard Peak Area (GC-TCD)} \times \text{mole syngas} \\ &= 9.803 \times 0.000812144 \text{ mol/min} \\ &= 0.00796 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CO mole (Final)} &= \text{Syngas's Standard Peak Area (GC-TCD)} \times \text{mole syngas} \\ &= 0.410 \times 0.000812144 \text{ mol/min} \\ &= 0.00034 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

ดังนั้น

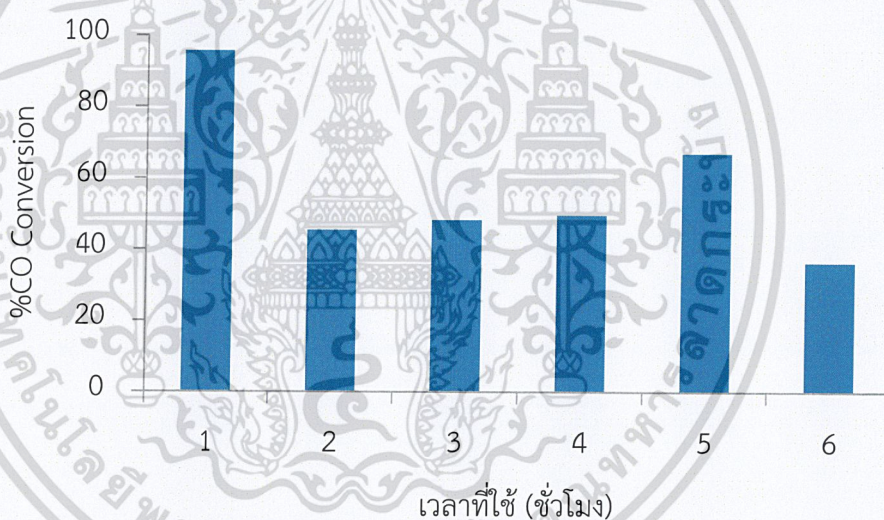
$$\begin{aligned} \% \text{CO Conversion} &= \frac{0.00796 \text{ mol/min} - 0.00034 \text{ mol/min}}{0.00127 \text{ mol/min}} \times 100 \\ &= 95.729 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 แสดง %CO Conversion ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6

Hrs.	mole in	mole out	%CO Conversion
1	0.00796	0.00034	95.72864322
2	0.00796	0.00435	45.35175879
3	0.00796	0.00412	48.24120603
4	0.00796	0.00401	49.62311558
5	0.00796	0.00263	66.95979899
6	0.00796	0.00507	36.30653266



รูปที่ ค.4 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene

2.2 การคำนวณค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิด (%Selectivity)

2.2.1 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Selectivity)

จากสูตร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{mole DME Produced} = \frac{\text{mole syngas} \times \frac{\text{DME's Area Peak}}{\text{Standard Peak}}}{\text{All Products' Area Peak}}$$

$$\text{mole All Products} = \sum_{i=1}^n (\text{mol } C_n) + \text{mol CO}_2 + 2\text{mol DME}$$

$$C_n = \frac{\text{mole syngas} \times \frac{C_n \text{'s Area Peak}}{\text{Standard Peak}}}{\text{All Products' Area Peak}} \times n$$

เมื่อ n คือจำนวนคาร์บอน (C) ในสารประกอบ

$$\text{DME} = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 14245}{434306}$$

$$= 2.664 \times 10^{-5} \text{ mol/min}$$

$$C_1 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 201979}{434306} \times 1$$

$$= 3.777 \times 10^{-4} \text{ mol/min}$$

$$C_2 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 69624}{434306} \times 2$$

$$= 2.604 \times 10^{-4} \text{ mol/min}$$

$$C_3 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 82296}{434306} \times 3$$

$$= 4.617 \times 10^{-4} \text{ mol/min}$$

$$C_4 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 1765}{434306} \times 4$$

$$= 1.320 \times 10^{-5} \text{ mol/min}$$

$$C_5 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 5079}{434306} \times 5$$

$$= 4.749 \times 10^{-5} \text{ mol/min}$$

$$\text{CO}_2 = \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 20040}{434306} \times 1$$

$$= 3.747 \times 10^{-5} \text{ mol/min}$$

ดังนั้นจะได้

$$\text{mol All Products} = \{2(2.664 \times 10^{-5}) + (3.777 \times 10^{-4}) + (2.604 \times 10^{-4}) + (4.617 \times 10^{-4}) + (1.320 \times 10^{-5}) + (4.749 \times 10^{-5}) + (3.747 \times 10^{-5})\}$$

$$= 0.00125 \text{ mol/min}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \%DME \text{ Selectivity} &= \frac{2 \times (2.664 \times 10^{-5}) \text{ mol/min}}{0.00125 \text{ mol/min}} \times 100 \\ &= 4.258 \% \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.7 แสดง %DME Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6

Hours	%DME Selectivity
1	4.258
2	1.093
3	0.682
4	0.781
5	0.364
6	1.373

2.2.2 คำนวณความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของเมทานอล (%CH₃OH Selectivity)

จากสูตร

$$\%CH_3OH \text{ Selectivity} = \frac{\text{mole } CH_3OH \text{ produced}}{\text{mole All Products}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ %DME Selectivity ในชั่วโมงที่ 1

$$\text{mole } CH_3OH \text{ Produced} = \frac{\text{mole syngas} \times \frac{CH_3OH's \text{ Area Peak}}{\text{Standard Peak}}}{\text{All Products' Area Peak}}$$

$$\text{mole All Products} = \sum_{i=1}^n (\text{mol } C_n) + \text{mol } CO_2 + 2\text{mol } DME + \text{mol } CH_3OH$$

$$C_n = \frac{\text{mole syngas} \times \frac{C_n \text{ 's Area Peak}}{\text{Standard Peak}}}{\text{All Products' Area Peak}} \times n$$

เมื่อ n คือจำนวนคาร์บอน (C) ในสารประกอบ

$$\begin{aligned} \text{mole } CH_3OH \text{ Produced} &= \frac{0.000812144 \text{ mol/min} \times 31278}{434306} \\ &= 5.849 \times 10^{-5} \text{ mol/min} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณหา mol DME, mol C₁, mol C₂, mol C₃, mol C₄, mol C₅ และ mol CO₂ ในการคำนวณหา %DME Selectivity ก่อนหน้านี้นี้จะได้

mole All Products สำหรับการหา %DME Selectivity = 0.00125 mol/min
ดังนั้นจะได้

mole All Products สำหรับการหา %CH₃OH Selectivity = {0.00125 + (5.849 x 10⁻⁵)} mol/min = 0.00131 mol/min

$$\begin{aligned} \%CH_3OH \text{ Selectivity} &= \frac{5.849 \times 10^{-5} \text{ mol/min}}{0.00131 \text{ mol/min}} \times 100 \\ &= 4.466 \% \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.8 แสดง %CH₃OH Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene ในช่วงเวลาที่ 1 ถึง 6

Hours	%CH ₃ OH Selectivity
1	4.466
2	0.562
3	0.380
4	0.395
5	0.966
6	12.836

2.2.3 ค่าร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไฮโดรคาร์บอน (%Hydrocarbon Selectivity)

$$\%Hydrocarbon \text{ Selectivity} = \frac{\text{mole Hydrocarbon produced}}{\text{mole All Products}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ %DME Selectivity ในช่วงเวลาที่ 1

$$\text{mole Hydrocarbon Produced} = \frac{\text{mole syngas} \times \frac{\text{Hydrocarbon's Area Peak}}{\text{Standard Peak}}}{\text{All Products' Area Peak}}$$

$$\text{mole All Products} = \sum_{i=1}^n (\text{mol } C_n) + \text{mol } CO_2 + 2\text{mol } DME$$

$$\text{mole syngas} \times \frac{C_n \text{ 's Area Peak}}{\text{Standard Peak}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ C_n ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าในชั้นเรียนเท่านั้น ไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n คือจำนวนคาร์บอน (C) ในสารประกอบ

$$\text{mole Hydrocarbon Produced} = 1.198 \times 10^{-3} \text{ mol/min}$$

จากการคำนวณหา mol DME, mol C₁, mol C₂, mol C₃, mol C₄, mol C₅ และ mol CO₂ ในการคำนวณหา %DME Selectivity ก่อนหน้านี้จะได้

mole All Products สำหรับการหา %DME Selectivity = 0.00125 mol/min
ดังนั้นจะได้

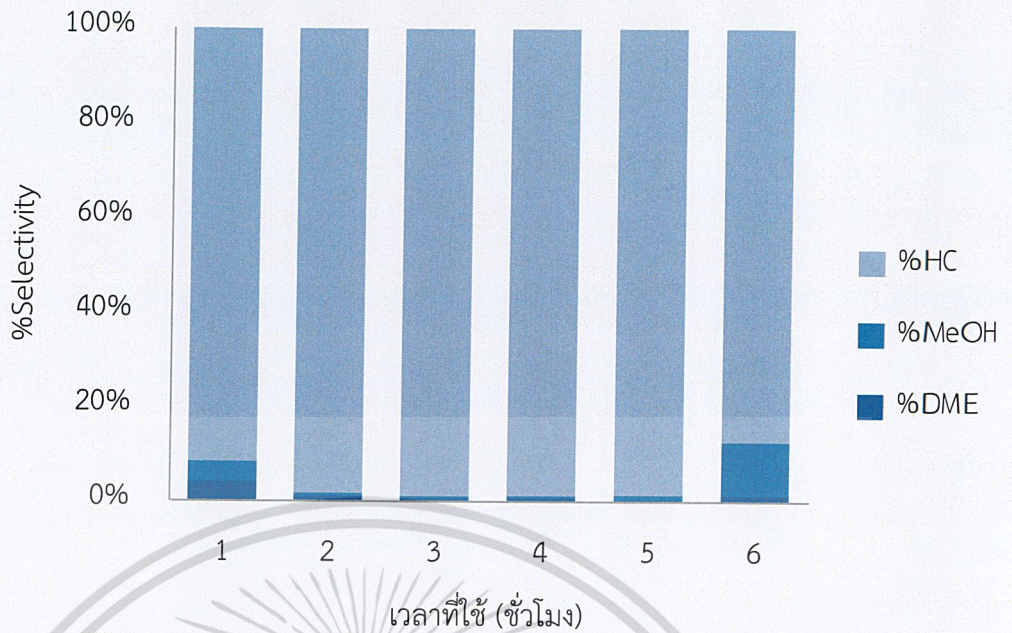
mole All Products สำหรับการหา %Hydrocarbon Selectivity = 0.00125 mol/min

$$\begin{aligned} \text{\%Hydrocarbon Selectivity} &= \frac{1.198 \times 10^{-3} \text{ mol/min}}{0.00125 \text{ mol/min}} \times 100 \\ &= 95.742 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.9 แสดง %Hydrocarbon Selectivity ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene ในช่วงเวลาที่ 1 ถึง 6

Hours	%HC Selectivity
1	95.742
2	98.907
3	99.318
4	99.219
5	99.636
6	98.627

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.5 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะต่อการเลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์, เอทานอล และไฮโดรคาร์บอนในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO/Al₂O₃/Graphene

2.3 การคำนวณหาค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ไดเมทิลอีเทอร์ (%DME Yield)

จากสูตร

$$\%DME \text{ Yield} = \frac{\%CO \text{ Conversion} \times \%DME \text{ Selectivity}}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณ %DME Yield ในชั่วโมงที่ 1

จากภาคผนวก ค. ตอนที่ 2.1 และ 2.2.1 จะได้

%CO Conversion = 95.789 % และ %DME Selectivity = 4.258 %

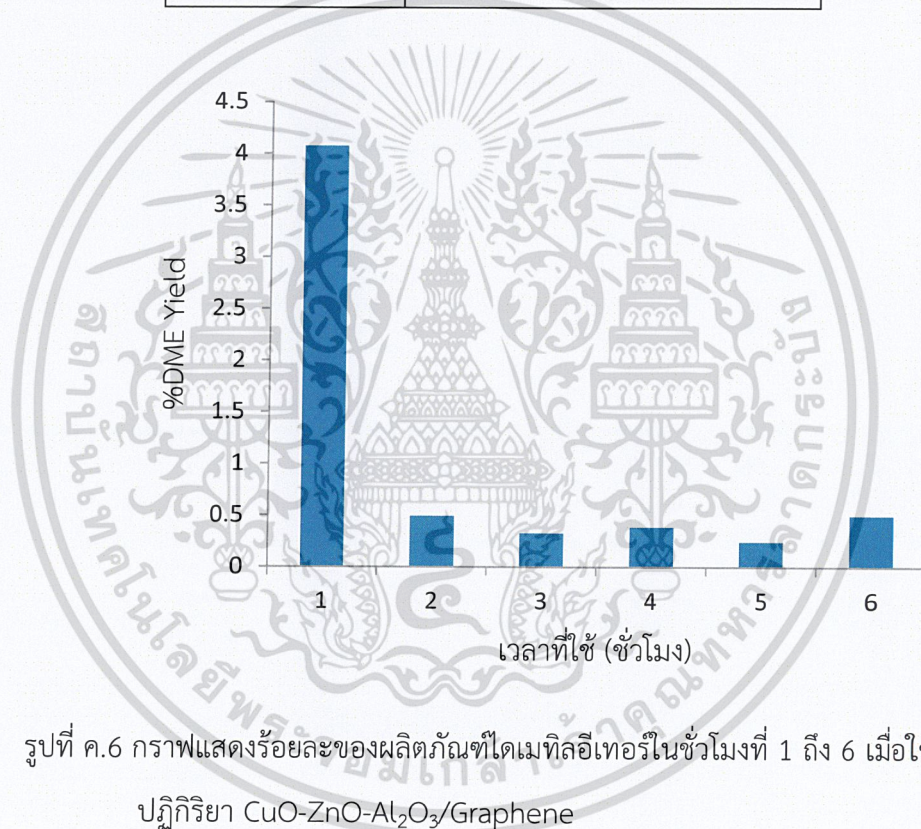
ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \%DME \text{ Yield} &= \frac{95.789 \% \times 4.258 \%}{100} \\ &= 4.076 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 แสดง %DME Yield ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6

Hours	%DME Yield
1	4.076
2	0.496
3	0.329
4	0.388
5	0.244
6	0.498



รูปที่ ค.6 กราฟแสดงร้อยละของผลิตภัณฑ์ไดเมทิลอีเทอร์ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 6 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-ZnO-Al₂O₃/Graphene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้