



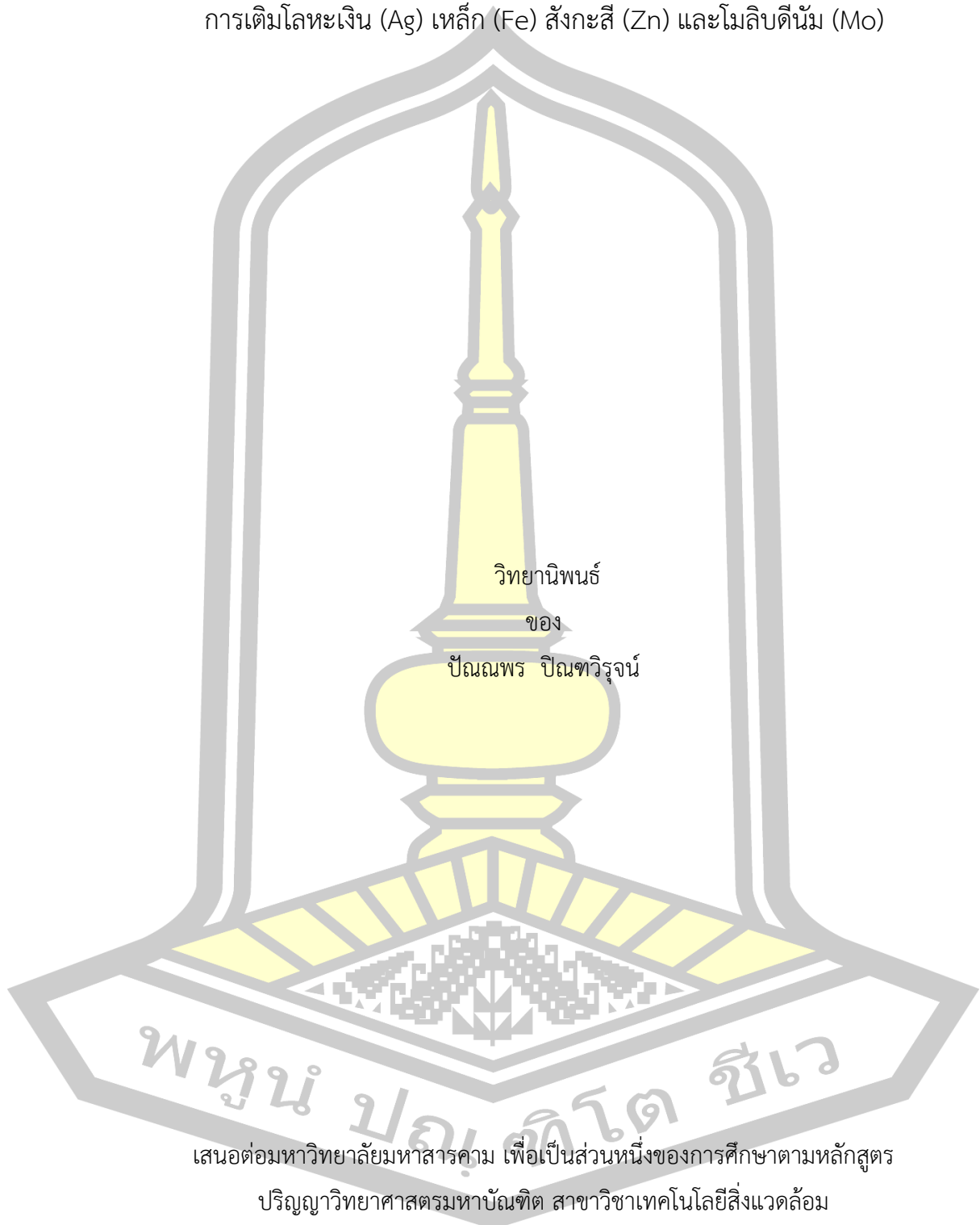
การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 ด้วยการเติมโลหะ  
เงิน (Ag) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) และโมลิบดีนัม (Mo)

วิทยานิพนธ์  
ของ  
ปณณพร ปิณฑิวิรุจน์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2560

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 ด้วย  
การเติมโลหะเงิน (Ag) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) และโมลิบดีนัม (Mo)

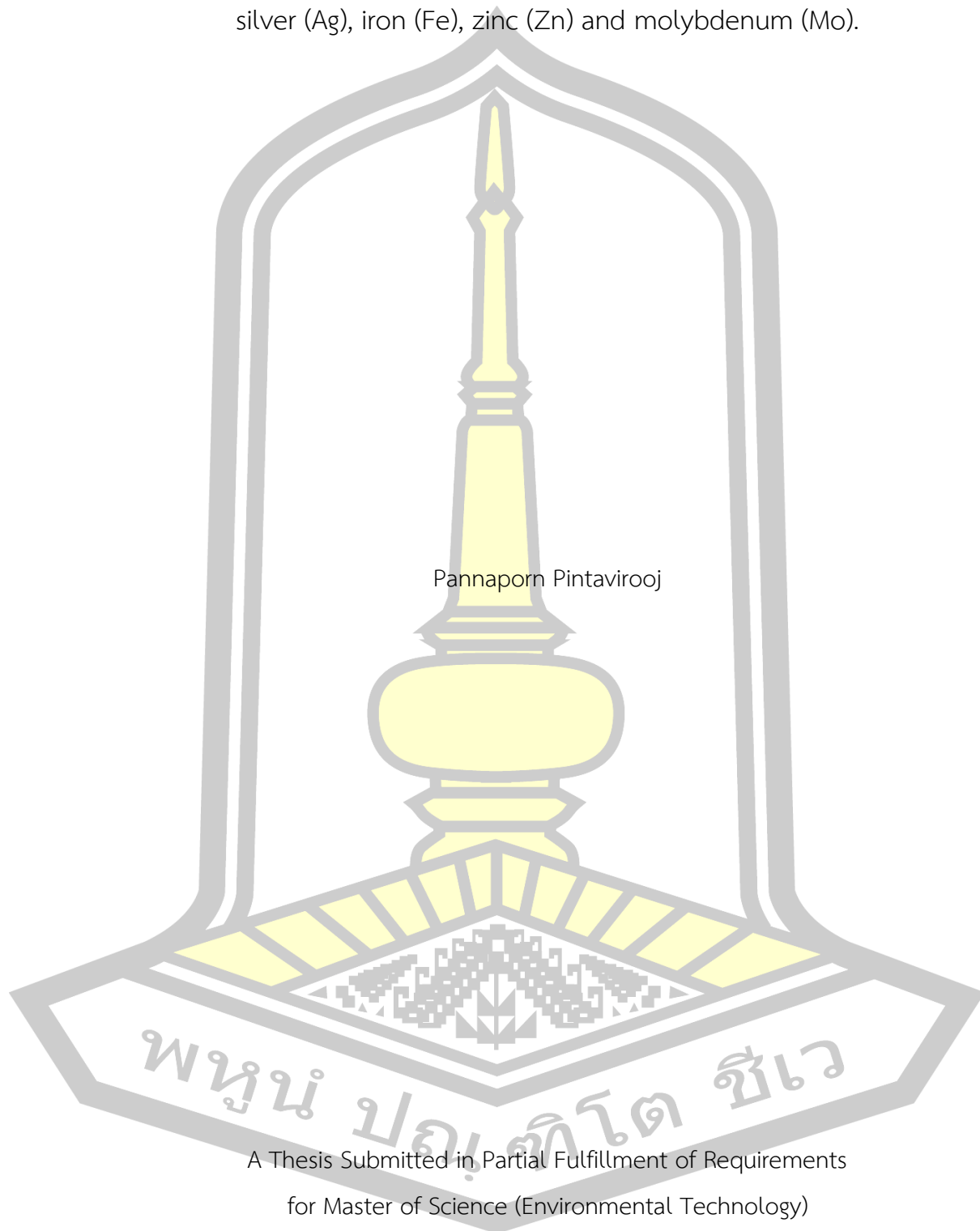


วิทยานิพนธ์  
ของ  
ปิ่นนพร ปิ่นทวิรุจน์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2560

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Optimization of the catalyst HZSM-5 and NaZSM-5 with adding metals as silver (Ag), iron (Fe), zinc (Zn) and molybdenum (Mo).



Pannaporn Pintavirooj

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Science (Environmental Technology)

Academic Year 2017

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวปณณพร ปิณฑวิ  
รุจน์ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์ )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. พลกฤษณ์ จิตรโตะ )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. นิดา ชัยมูล )

กรรมการ

(อ. ดร. ชุภพนธ์ เจริญสุข )

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ผศ. ดร. กิติโรจน์ หวันตาหลา )

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ผศ. ดร. ยรรยงค์ อินทร์ม่วง)

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน.....เดือน.....ปี.....

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 ด้วยการเติมโลหะเงิน (Ag) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) และโมลิบดีนัม (Mo)		
<b>ผู้วิจัย</b>	ปณณพร ปิณฑวิรุจน์		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ จิตรโต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิดา ชัยมูล		
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	<b>สาขาวิชา</b>	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
<b>มหาวิทยาลัย</b>	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	<b>ปีการศึกษา</b>	2560

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเอทิลีนจากเอทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 โดยการเติมโลหะเงิน, สังกะสี, เหล็ก และโมลิบดีนัม ทำการทดลองอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอลที่ 100, 150, 200 และ 250°C ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการดีไฮเดรชันของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 อยู่ที่ 200°C โดยมีอัตราการเกิดแก๊สอยู่ที่ 94.5 และ 52.4% มีสัดส่วนของแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 95.9 และ 95.1% ตามลำดับ และมีสารอื่นๆเกิดขึ้นได้แก่ กรดพธาลิก, กรดปาลมิติก และกรดสเตียริก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และเมื่อทำการเติมโลหะ Ag, Zn, Fe และ Mo ลงในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการดีไฮเดรชันลดลงอยู่ที่ 100°C ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5, Zn/HZSM-5, Ag/NaZSM-5, Fe/HZSM-5, Ag/HZSM-5, Mo/HZSM-5 และ Mo/NaZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สอยู่ที่ 56.8, 56, 41.6, 36.4, 32.5, 24.8, 23.9 และ 23.4% ตามลำดับ มีสัดส่วนของแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 100, 100, 100, 100, 99.99, 93.9, 94 และ 94.4% ตามลำดับ และมีสารอื่นๆเกิดขึ้น ได้แก่ โพรพานอล, เมทานอลและไอโซโพรพานอลซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงจากการทดลองนี้เห็นว่าเมื่อทำการเติมโลหะเงิน, สังกะสี, เหล็ก และโมลิบดีนัมลงในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 พบว่าโลหะสังกะสีและเหล็กสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาลดลงและมีสัดส่วนแก๊สเอทิลีนมากขึ้นอีกทั้งสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นมีขนาดโมเลกุลที่ลดลงอีกด้วย

คำสำคัญ : ตัวเร่งปฏิกิริยา, HZSM-5, NaZSM-5, โลหะ, เอทิลีน, เอทานอล

<b>TITLE</b>	Optimization of the catalyst HZSM-5 and NaZSM-5 with adding metals as silver (Ag), iron (Fe), zinc (Zn) and molybdenum (Mo).		
<b>AUTHOR</b>	Pannaporn Pintavirooj		
<b>ADVISORS</b>	Assistant Professor Ponglakit Jitto , Ph.D. Assistant Professor Professor Nida Chaimoon , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Master of Science	<b>MAJOR</b>	Environmental Technology
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2017

### ABSTRACT

This research were studied to improve an efficiency of ethylene production from ethanol of HZSM-5 and NaZSM-5 by adding silver, zinc, iron and molybdenum. The experiment on temperature affects to dehydration of ethanol process as 100, 150, 200 and 250°C dehydration of ethanol process. The results were showed that temperature affects using HZSM-5 and NaZSM-5 for dehydration of ethanol process was 200°C and gas transformation efficiency as 94.5 and 52.4%, respectively and ratio of ethylene per product gas as 95.9 and 95.1%, respectively. Another gas products were Phthalic acid, palmitic acid and stearic acid which are long molecule. When adding the metals into the HZSM-5 and NaZSM-5, affects to dehydration of ethanol process temperature reduced to 100°C. Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5, ZN/HZSM-5, Ag/NaZSM-5, Fe/HZSM-5, Ag/HZSM-5, Mo/HZSM-5 and Mo/NaZSM-5 can transformation to gas as 56.8, 56, 41.6, 36.4, 32.5, 24.8, 23.9 and 23.4%, respectively. While ethylene per product gas were 100, 100, 100, 100, 99.99, 93.9, 94 and 94.4%, respectively. Another gas products were propanol, methanol and isopropanol that are short molecule. In this experiment when adding the metals into HZSM-5 and NaZSM-5 by zinc and iron can improve the catalyst because the temperature used in the reaction is lower and the ratio of ethylene gas was increase and another products were molecular size.

Keyword : catalyst, HZSM-5, NaZSM-5, metals, ethylene, ethanol

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีงบประมาณ 2558 โดยมีสัญญาทุนเลขที่ 5804037 และทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2559 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) โดยมีสัญญาทุนเลขที่ กบง/ 2559-ท 6.13 วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ จิตรโต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตา ชัยมูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมและอาจารย์บัณฑิตศึกษาภายนอกคณะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์ ประธานกรรมการและอาจารย์บัณฑิตศึกษาประจำคณะ อาจารย์ ดร.ชอุพันธ์ เจริญสุข อาจารย์บัณฑิตศึกษาประจำคณะ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิติโรจน์ หวันตาหลา ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้วิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC- MS)

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวิเคราะห์ชนิดผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) วิเคราะห์ขนาดและรูปร่างผลึกด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) และวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์แบบ EDS

ขอขอบคุณคณาจารย์และนิสิตสาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม รวมถึงบุคลากรของคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ ที่ให้ความรู้ และให้ความช่วยเหลือสนับสนุนการทำงานของผู้วิจัยในทุกๆด้านด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้ความสนับสนุนสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้สามารถดำเนินการศึกษาวิจัยในครั้งนี้บรรลุผลสำเร็จ

ปณณพร ปิณฑวิรุจน์

## สารบัญ

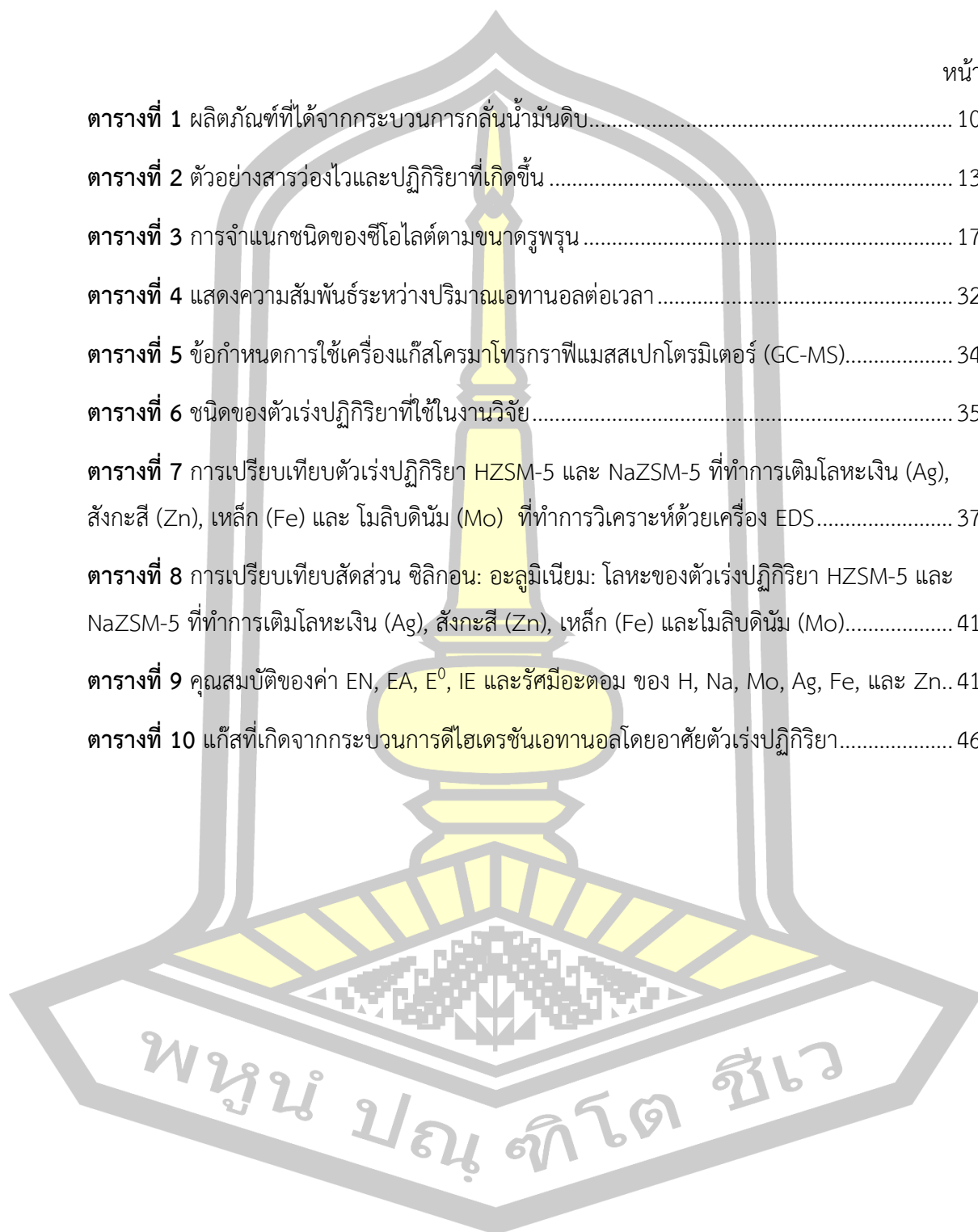
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพประกอบ.....	ญ
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 .....	4
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล .....	4
2.1 เอทิลีน .....	4
2.2 การผลิตเอทิลีน.....	9
2.3 ทฤษฎีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	12
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดซีโอไลต์ (Zeolite).....	16
2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	21
2.6 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange).....	21
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23



บทที่ 3 .....	25
วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	25
3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 และ NaZSM-5 .....	25
3.2 การติดตั้งระบบเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา .....	26
3.3 การเตรียมเอทานอล .....	31
3.4 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผล .....	33
บทที่ 4 .....	35
ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	35
4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5.....	35
4.2 ผลของการเติมโลหะลงในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5.....	39
4.3 ศึกษาปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอลโดย อาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	42
บทที่ 5 .....	51
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	51
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	52
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก ตัวอย่างภาพประกอบในงานวิจัยในส่วนของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5และ ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	63
ภาคผนวก ข เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	66
ภาคผนวก ค กราฟแสดงผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	74
ประวัติผู้เขียน.....	91

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ.....	10
ตารางที่ 2 ตัวอย่างสารว่องไวและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น .....	13
ตารางที่ 3 การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน .....	17
ตารางที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอทานอลต่อเวลา .....	32
ตารางที่ 5 ข้อกำหนดการใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS).....	34
ตารางที่ 6 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะเงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และ โมลิบดีนัม (Mo) ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS.....	37
ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบสัดส่วน ซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะเงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และโมลิบดีนัม (Mo).....	41
ตารางที่ 9 คุณสมบัติของค่า EN, EA, E <sup>0</sup> , IE และรัศมีอะตอม ของ H, Na, Mo, Ag, Fe, และ Zn..	41
ตารางที่ 10 แก๊สที่เกิดจากกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	46

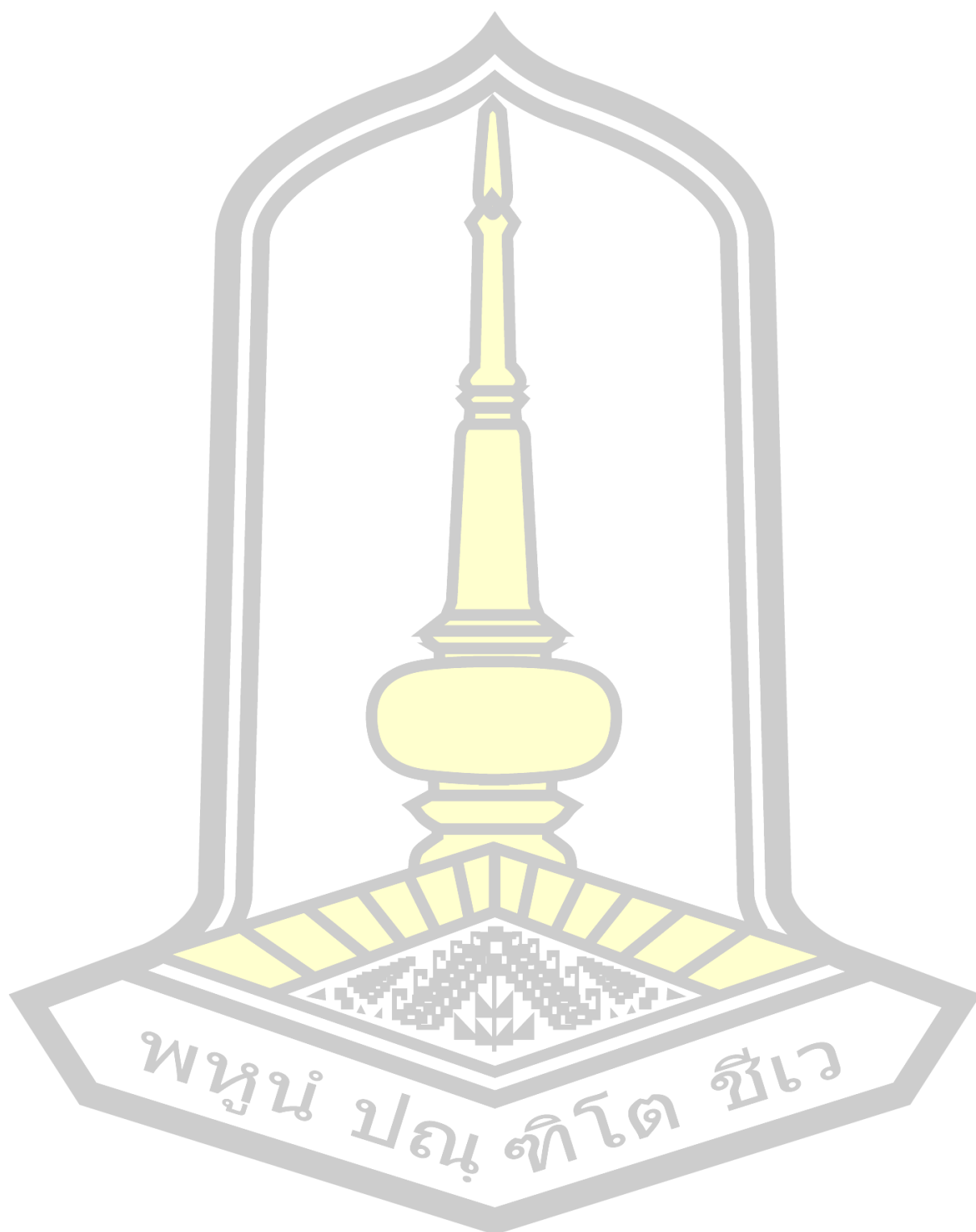


## สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 สูตรโครงสร้างของเอทิลีน .....	4
ภาพประกอบ 2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเอทิลีน .....	5
ภาพประกอบ 3 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของ Low density polyethylene (LDPE) .....	6
ภาพประกอบ 4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของ High Density Polyethylene (HDPE).....	6
ภาพประกอบ 5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของโพลีไวนิลคลอไรด์ (PV) .....	7
ภาพประกอบ 6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol: EG).....	7
ภาพประกอบ 7 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของกรดอะซิติก (Acetic Acid) .....	8
ภาพประกอบ 8 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) .....	9
ภาพประกอบ 9 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ .....	9
ภาพประกอบ 10 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุตสาหกรรมปิโตรเคมีกับปิโตรเคมี .....	11
ภาพประกอบ 11 ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล.....	12
ภาพประกอบ 12 กลไกปฏิกิริยาสำหรับการแปลงเอทานอลเป็นเอทิลีนที่ โดยมี HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	12
ภาพประกอบ 13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาริวไรต์.....	15
ภาพประกอบ 14 โครงสร้างของซีโอไลต์ .....	16
ภาพประกอบ 15 โครงสร้างของ A. ซีโอไลต์ Y B. ZSM-5.....	16
ภาพประกอบ 16 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 .....	21
ภาพประกอบ 17 เครื่องเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล .....	26
ภาพประกอบ 18 เตาปฏิกรณ์แบบท่อ.....	27
ภาพประกอบ 19 เตาปฏิกรณ์แบบท่อที่ใช้ในการทดลอง.....	28
ภาพประกอบ 20 เครื่องวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิ้ลไทร์เคล ( Type K ).....	28
ภาพประกอบ 21 ท่อแก้วสำหรับเตาปฏิกรณ์ .....	29

ภาพประกอบ 22	ท่อแก้วที่ใส่คะตาลีสต์เบด.....	29
ภาพประกอบ 23	ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง .....	30
ภาพประกอบ 24	หลอดสูญญากาศ.....	30
ภาพประกอบ 25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลและอัตราการระเหย .....	31
ภาพประกอบ 26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอทานอลต่อเวลา .....	32
ภาพประกอบ 27	การเก็บตัวอย่างแก๊ส.....	33
ภาพประกอบ 28	การเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะ Ag, Zn, Fe และ Mo วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD.....	38
ภาพประกอบ 29	การเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะ Ag, Zn, Fe และ Mo วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD .....	38
ภาพประกอบ 30	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 และ NaZSM-5.....	44
ภาพประกอบ 31	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะ Ag, Mo, Zn และ Fe.....	44
ภาพประกอบ 32	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด NaZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะ Ag, Mo, Zn และ Fe.....	45
ภาพประกอบ 33	พีคที่เกิดขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 HZSM-5, Ag/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Fe/HZSM-5 และ Mo/HZSM-5 .....	47
ภาพประกอบ 34	พีคที่เกิดขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5, Ag/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5 และ Mo/NaZSM-5 .....	47
ภาพประกอบ 35	กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นเอทิลีน .....	48
ภาพประกอบ 36	กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดพธาลิก .....	48
ภาพประกอบ 37	กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดปาลมิติก.....	49
ภาพประกอบ 38	กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดสเตียริก .....	49
ภาพประกอบ 39	กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นโพรพานอล .....	49
ภาพประกอบ 40	กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นเมทานอล.....	50

ภาพประกอบ 41 กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นไอโซโพรพานอล..... 50



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สถานการณ์ปริมาณปิโตรเลียมในอนาคตมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เป็นผลมาจากจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว รวมไปถึงการพัฒนาทางด้านต่างๆ เช่น ด้านอุตสาหกรรม ด้านคมนาคม ด้านเศรษฐกิจ เป็นต้น ดังนั้นประเทศไทยจึงพึ่งพาการนำเข้าพลังงานเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ โดยมีสัดส่วนการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศสูงถึงร้อยละ 80 ของปริมาณการใช้ น้ำมันทั้งหมดภายในประเทศและมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากไม่สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตปิโตรเลียมในประเทศให้เพียงพอกับความต้องการใช้งาน (ทวารัฐ สูตะบุตร, 2555) ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขนาดใหญ่ที่มีการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมและน้ำมันดิบ ในส่วนขั้นตอนของกระบวนการกลั่นจะได้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี 3 ชั้นด้วยกันคือ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต้น ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีชั้นกลาง และผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีชั้นปลาย โดยผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต้นจะนำไปสู่การผลิตผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีในขั้นต่อไปรวมถึงผลิตภัณฑ์หรือเคมีภัณฑ์อื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตเอทิลีนซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต้นที่นำไปสู่การผลิตพอลิเอทิลีน (Polyethylene) และสารเคมีอื่นๆ เช่น เอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide), เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol), และเอทิลเบนซีน (Ethyl Benzene) เป็นต้น (สารานุกรมเปิดโลกปิโตรเคมี, 2554) ซึ่งสารเหล่านี้ถือเป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกในรูปแบบต่างๆ เช่น ไนลอน ยางเทียม เสื้อผ้า ฟิล์ม ภาชนะ ส่วนประกอบเรือหรือรถยนต์ ของเล่นเด็ก เป็นต้น (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2555) โดยอุตสาหกรรมพลาสติกนั้นมีความสำคัญอย่างมากในการสร้างรายได้ให้กับประเทศกว่าปีละ 2.2 แสนล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2555) พบว่าการผลิตเอทิลีนจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถผลิตเอทิลีนได้สูงและอาจทำให้เกิดสารตั้งต้นใหม่ๆ ได้หลายชนิด เช่น เอทิลีน บิวทานอล อะซีทัลดีไฮด์ ไดเอทิลอีเทอร์ เป็นต้น (J.I. Di Cosimo, 1998) โดยเอทานอลสามารถผลิตได้จากการนำวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง ข้าว เศษไม้ ฟางข้าว อ้อย กากน้ำตาล เป็นต้น มาทำการหมักโดยยีสต์ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้เป็นวัตถุดิบที่ได้จากการเกษตรหรือพืชเศรษฐกิจในท้องถิ่น อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลผลิตทางการเกษตรอีกด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลเป็นเอทิลีนนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ซีโอไลต์, ซิลิโกอะลูมินอพอสเฟต (SAPO-34), NiAPSO-34 เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 มีความสามารถผลิตเอทิลีนได้ 95%

และใช้อุณหภูมิต่ำ (Xian Zhang, 2008) อีกทั้งยังมีการใช้กันอย่างแพร่หลายทางด้านอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เนื่องจากซีโอไลต์มีตำแหน่งกัมมันต์ที่สูง โดยจำนวนและความแรงของตำแหน่งกัมมันต์สามารถปรับเปลี่ยนได้ขึ้นกับการใช้ประโยชน์ มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงเหมาะสำหรับการทำปฏิกิริยาเคมีที่มีอุณหภูมิสูงและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีความจำเพาะต่อขนาดโมเลกุลของสารเคมีซึ่งการลดขั้นตอนในการคัดแยก ทำการแตกพันธะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง (ศิรินุช ลอยหา, 2556) โดยมีการเติมโลหะต่างๆเพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เช่น สังกะสี (Zn), โมลิบดีนัม (Mo), แกลเลียม (Ga), แลนทานัม (La) เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% Zn/HZSM-5 โดยตัวเร่งปฏิกิริยานี้ทำให้อัตราการเกิดเอทิลีนเพิ่มขึ้นถึง 18.5% ที่อุณหภูมิ 360°C เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 (FANG Yiwen, 2010) ตัวเร่งปฏิกิริยา 5.0% Mo/HZSM-5 มีอัตราการเกิดเอทิลีนสูงที่สุดอยู่ที่ 87% เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม 2% Ga-5% Mo/HZSM-5 ซึ่งเกิดเอทิลีนเพียง 27% (Sachchit Majhi, 2013) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทิลีนจากสารตั้งต้นเอทานอลโดยใช้วิธีปรับโครงสร้างด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ด้วยโลหะเงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และโมลิบดีนัม (Mo)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอล
- 1.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณและชนิดของแก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาสัดส่วนของโลหะ เงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และโมลิบดีนัม (Mo) ในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5
- 1.3.2 ศึกษาศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอล โดยอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ 100, 150, 200 และ 250°C
- 1.3.3 ศึกษาปริมาณและชนิดของแก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะเงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และ โมลิบดีนัม (Mo)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบว่าโลหะเงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และโมลิบดีนัม (Mo) โลหะชนิดใดมีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5

1.4.2 ทราบถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอล

1.4.3 ทราบว่ามีแก๊สใดเกิดขึ้นจากกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอล

1.4.4 สามารถเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบทางการเกษตร

1.4.5 สามารถสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและอุตสาหกรรมพลาสติก



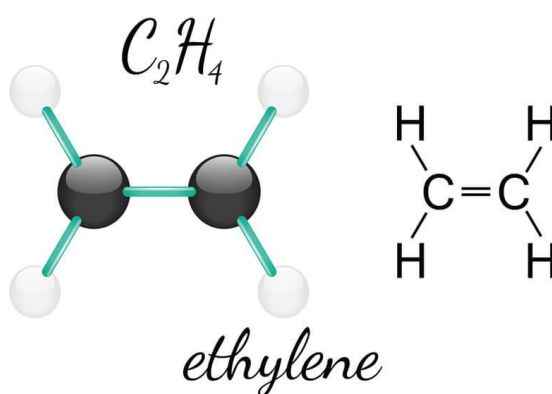


## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

#### 2.1 เอทิลีน

เอทิลีน (Ethylene) คือ คีอสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ชนิดแอลคีน (Alkene) ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 2 อะตอม มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_2H_4$



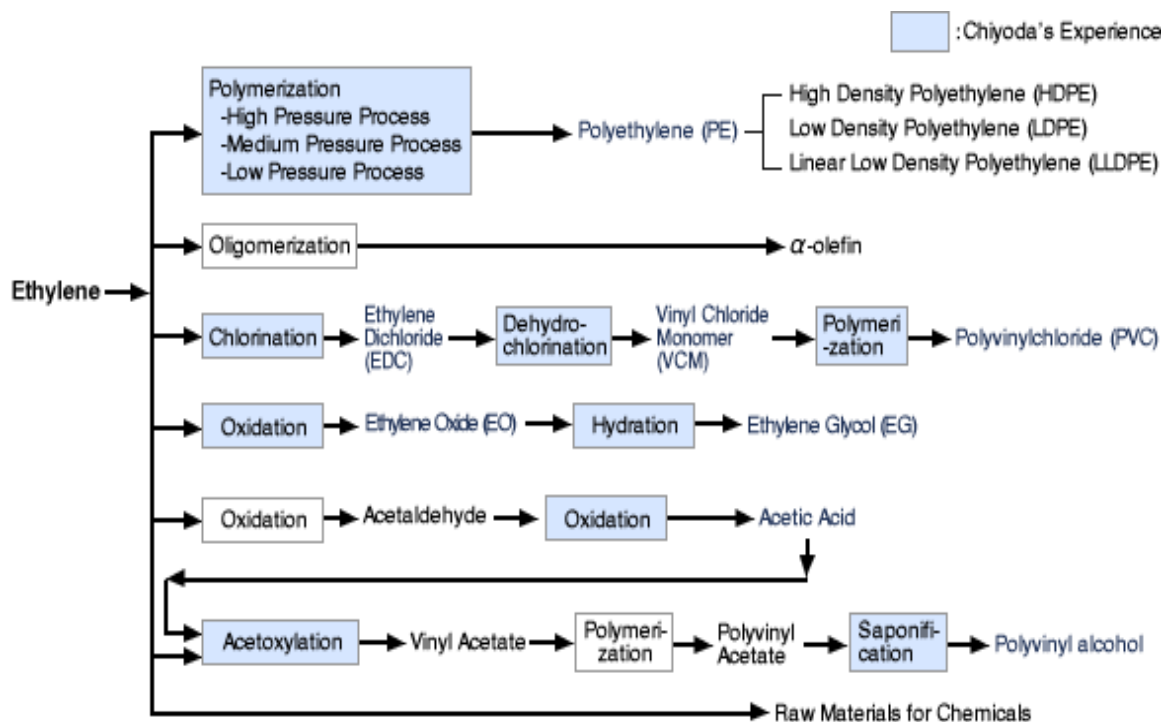
ภาพประกอบ 1 สูตรโครงสร้างของเอทิลีน

ที่มา: Products from Oil (Colin France, 2014)

ลักษณะทางกายภาพของเอทิลีนที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ มีลักษณะเป็นแก๊ส ไม่มีสี สามารถสังเคราะห์ได้จากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่นอีเทน (Ethane) โพรเพน (Propane) แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG) และแนฟทา (Naphtha) โดยวิธีการแตกตัวด้วยไอน้ำ (Steam Cracking) และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking) (สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย, 2554)

##### 2.1.1 ผลิตรภัณฑ์จากเอทิลีน

เอทิลีน เป็นผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีในกระบวนการกลั่น ซึ่งเอทิลีนเป็นผลิตรภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต้นที่เกิดขึ้น โดยผลิตรภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต้นนั้นจะนำไปสู่การผลิตผลิตรภัณฑ์ปิโตรเคมีในขั้นต่อไปรวมถึงผลิตรภัณฑ์ หรือเคมีภัณฑ์อื่นๆ



ภาพประกอบ 2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเอทิลีน

ที่มา: Ethylene Derivatives (Chiyoda Corporation, 2014)

### 2.1.1.1 โพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE)

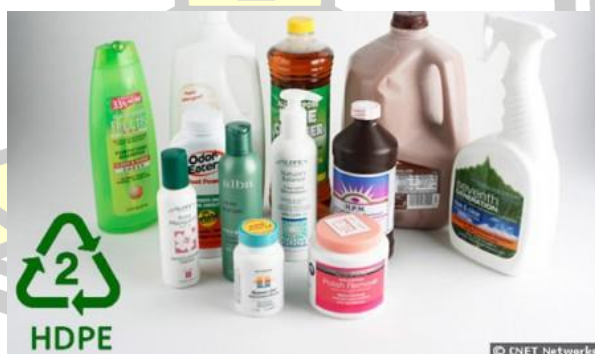
โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นพลาสติกที่มีเอทิลีนเป็นสารตั้งต้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene: LDPE) โดยโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำถูกผลิตขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1942 มีการนำมาใช้เคลือบสารเคเบิลใต้น้ำใช้เป็นฉนวนของเรดาร์ในสงครามโลกครั้งที่ 2 และชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) (วลัยพร มุขสุวรรณ, 2551)

Low Density Polyethylene (LDPE) เป็นพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน (Polyethylene) ที่มีความหนาแน่นต่ำ (low density) โดยมีความหนาแน่นอยู่ที่  $0.910-0.925 \text{ g/cm}^3$  ไม่ทนความร้อน มีความนิ่ม ความยืดหยุ่น ความเหนียวและความโปร่งใสมากกว่า High Density Polyethylene (HDPE) ไม่ว่องไวต่อสารเคมี แต่มีความทนต่อการกัดและด่างได้ดี (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์และนิธิยา รัตนาปนนท์, 2556) ผลิตภัณฑ์ของ Low Density Polyethylene (LDPE) ได้แก่ ถุงพลาสติกที่เรียกว่าถุงก๊อบแก๊บหรือถุงหูหิ้ว ภาชนะบรรจุอาหาร แผ่นเคลือบบอร์ดกระดาษ เคลือบสายเคเบิลและของเล่นเด็ก เป็นต้น แสดงดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของ Low density polyethylene (LDPE)  
 ที่มา: Low density polyethylene (LDPE) / พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ  
 (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์, 2556)

High Density Polyethylene (HDPE) เป็นพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน (Polyethylene) ที่มีค่าความหนาแน่นสูง (High density) โดยมีความหนาแน่นอยู่ที่  $0.941-0.965 \text{ g/cm}^3$  ไม่อ่องไวต่อสารเคมี ทนทานต่อการแตกหรือการหักงอได้ดี ทนความร้อนได้มาก ทนความเย็นได้ดีต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง และสามารถป้องกันความชื้นได้ (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์, 2556) ผลิตภัณฑ์ของ High Density Polyethylene (HDPE) ได้แก่ ทัปเปอร์แวร์ ขวดน้ำยาซักผ้า ขวดนม ถังน้ำมันสำหรับยานพาหนะ ถูพลาสติกร้อน ภาชนะใส่สารเคมี เป็นต้น แสดงดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของ High Density Polyethylene (HDPE)  
 ที่มา: High Density Polyethylene (HDPE) / พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง  
 (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์, 2556)

### 2.1.1.2 โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC)

โพลีไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซีเป็นพลาสติกที่มีเอทิลีนและคลอรีนเป็นสารตั้งต้น คิดค้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1912 แต่ผลิตออกจำหน่ายครั้งแรกในปี ค.ศ.1931 พีวีซีเป็นพลาสติกชนิด เทอร์โมพลาสติกคือสามารถหลอมเป็นของเหลวได้ โดยที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสถานะของแข็ง (วัลย์พร มุขสุวรรณ, 2551) ผลิตภัณฑ์ของโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ได้แก่ ฟิล์มยืดสำหรับห่ออาหาร ท่อ ภาชนะบรรจุขนม เป็นต้น แสดงดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของโพลีไวนิลคลอไรด์ (PV)

ที่มา: Polyvinylchloride (PVC) / พอลิไวนิลคลอไรด์

(พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์, 2556)

### 2.1.1.3 เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG)

เอทิลีนไกลคอล เป็นสารที่ไม่มีสีและไม่มีกลิ่น มีจุดเดือดอยู่ที่ 196°C จึงนิยมใช้เป็นสาร โมโนเมอร์ของพลาสติกแข็ง (Polyethylene Terephthalate หรือ PET) และเป็นสารป้องกันการแข็งตัวจากความเย็น (Anti-freeze) (ชญาณิศา เมฆพัฒน์, 2555) ผลิตภัณฑ์ของ เอทิลีนไกลคอล ได้แก่ สารหล่อเย็นหม้อน้ำรถยนต์ น้ำยาขัดเงา น้ำยาซักฟอก ทำปึกเครื่องบิน หมึกพิมพ์ เป็นต้น แสดงดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol: EG)

ที่มา: Ethylene Glycol Products (KOST USA, 2011)

#### 2.1.1.4 กรดอะซิติก (Acetic Acid)

กรดอะซิติก (Acetic Acid) หรือกรดน้ำส้ม เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีกลิ่นฉุน แสบจมูก ระเหยได้ มีจุดเดือดอยู่ที่  $118^{\circ}\text{C}$  จุดเยือกแข็งที่  $17^{\circ}\text{C}$  ละลายน้ำได้ดี มีความเสถียร กรดอะซิติกบริสุทธิ์เรียกว่ากรดน้ำส้มกลั่นหรือกรดกลacialอะซิติก (Glacial Acetic Acid) หากนำไปเจือจางกับน้ำจะได้น้ำส้มสายชูสำหรับปรุงอาหาร ผลิตภัณฑ์ของกรดอะซิติก ได้แก่ อุตสาหกรรมสีย้อมผ้า ยาฆ่าแมลง ยาแอสไพริน เส้นใยสังเคราะห์ สารโพลีเมอร์และกาว เป็นต้น (บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด, 2557) แสดงดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของกรดอะซิติก (Acetic Acid)

ที่มา: ACETIC SILICONE ANTIMUFFA (Tecnogas, 2014)

#### 2.1.1.5 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA)

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารเทอร์โมพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่อาศัยคุณสมบัติการละลายในน้ำ เช่น ใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความใสเหนียว และทนต่อการขีดข่วนและกลุ่มที่นำไปทำปฏิกิริยาเคมีให้ไม่สามารถละลายได้แล้วจึงนำมาใช้งาน จึงใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้ายได้ ทำให้เนื้อผ้ามีความ ทนทานต่อการสึกหรอ ซักง่ายและสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี (บริษัท MonoSol, 2553) ผลิตภัณฑ์ของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) ได้แก่ กาว วัสดุชั้นในสียาง เคลือบกระดาษ แชมพู เป็นต้น แสดงดังภาพประกอบ 8

พูนุ ปณ ทิโต ชิว



ภาพประกอบ 8 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) ที่มา: Mini Washable PVA Glue (Baker Ross,2016)

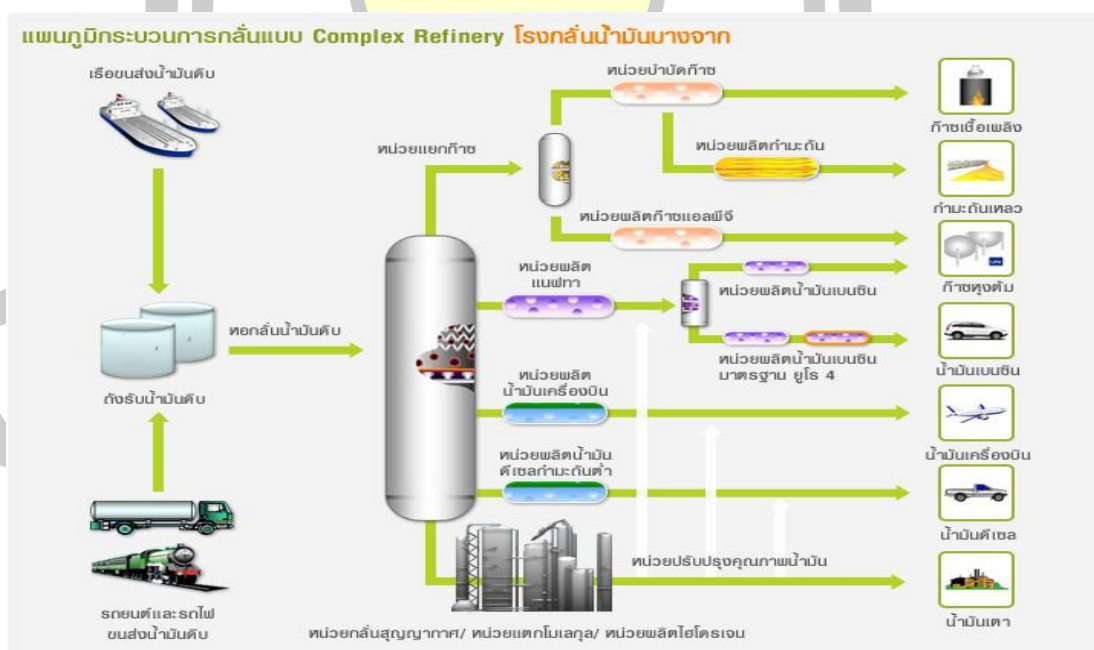
## 2.2 การผลิตเอทีลิน

### 2.2.1 กระบวนการกลั่น

ในกระบวนการกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิง ประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญอยู่ 4 กระบวนการ (ฐิติพรรณ ฉิมสุข ,2554) ได้แก่

#### 2.2.1.1 การกลั่นหรือการแยก (Separation)

การกลั่นหรือการแยก คือการแยกส่วนประกอบของน้ำมันดิบทางกายภาพโดยการกลั่นลำดับส่วน ดังภาพประกอบ 9 และสามารถแสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบแสดงดังตารางที่ 1



ภาพประกอบ 9 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

ที่มา : โรงกลั่นบางจากปิโตรเลียม (2555)

ตารางที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	จุดเดือด (°C)	สถานะ	จำนวน C	การใช้ประโยชน์
แก๊สปิโตรเลียม	< 30	แก๊ส	1-4	แก๊สหุงต้ม ทำสารเคมี
แนฟทาเบา	30-110	ของเหลว	5-7	ผลิตน้ำมันเบนซิน เป็นตัวทำละลาย
แนฟทาหนัก	65-170	ของเหลว	6-12	ผลิตน้ำมันเบนซิน
น้ำมันก๊าด	170-250	ของเหลว	10-19	ใช้เป็นเชื้อเพลิงตะเกียงและเครื่องบิน ไอพ่น
น้ำมันดีเซล	250-340	ของเหลว	14-19	ใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล
น้ำมันหล่อลื่น	> 350	ของเหลว	19-35	ใช้ผลิตน้ำมันเครื่อง
ไข	> 500	ของแข็ง	> 35	ใช้ผลิตเครื่องสำอาง ทำยาขัดมัน ผลิตผงซักฟอกและทำเทียน
น้ำมันเตา	> 500	ของเหลวหนืด	> 35	ใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องจักร
ยางมะตอย	> 500	ของเหลวหนืด	> 35	ใช้เป็นวัสดุกันซึม ใช้ทำถนน

ที่มา: ปิโตรเคมี (รัฐพิพรรณ ฉิมสุข, 2554)

2.2.1.2 การแปรรูปหรือการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี (Conversion) คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือโมเลกุลของน้ำมันให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน ทำได้ดังนี้

2.2.1.2.1 กระบวนการแตกสลาย (Cracking) คือ การเปลี่ยนสภาพสารไฮโดรคาร์บอนจาก โมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็ก โดยอาศัยความร้อน ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือไฮโดรเจน

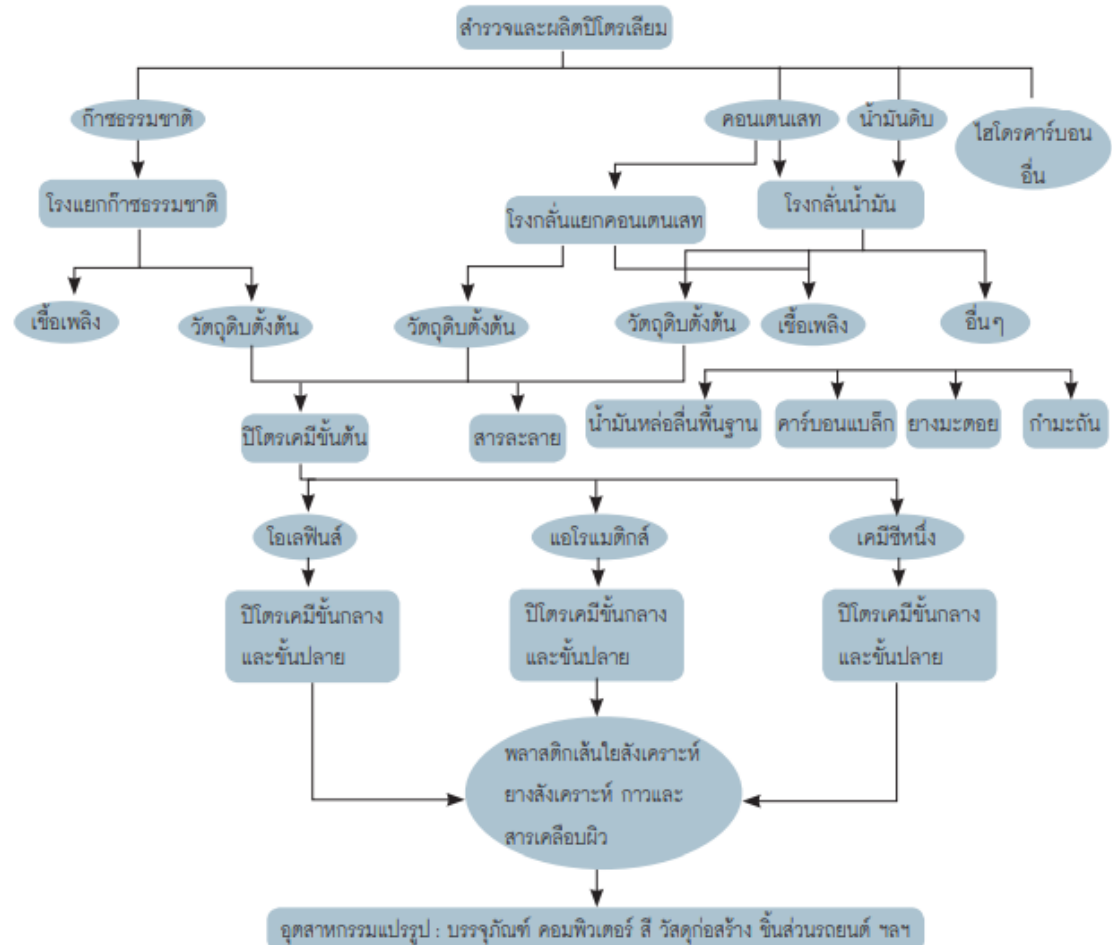
2.2.1.2.2 กระบวนการเปลี่ยนสภาพ (Reforming) เป็นการเปลี่ยนแปลงสภาพโมเลกุล เช่น จากโครงสร้างแบบโซ่ให้กลายเป็นวงแหวนอะโรมาติก เป็นต้น

2.2.1.2.3 กระบวนการรวมโมเลกุล (Alkylation และ polymerization) เป็นการรวมโมเลกุลเล็กเข้าด้วยกันเพื่อกลายเป็นโมเลกุลใหญ่และมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

2.2.1.3 การปรับปรุงคุณภาพ (Treating) เป็นการกำจัดสารที่ไม่ต้องการออกจากตัวน้ำมัน เช่น กำมะถัน เกลือ เป็นต้น

2.2.1.4 การผสม (Blending) เป็นการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม เช่น การเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมัน เป็นต้น

เอทิลีนเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งจะนำไปสู่การผลิตผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีในขั้นต่อไปรวมถึงผลิตภัณฑ์หรือเคมีภัณฑ์อื่นๆ เช่น สามารถผลิตโพลิเอทิลีน (Polyethylene) เอทิลีนออกไซด์ (Ethylene oxide) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) และ เอทิลเบนซีน (Ethyl Benzene) เป็นต้น (สารานุกรมเปิดโลกปิโตรเคมี, 2554) ดังภาพประกอบที่ 10

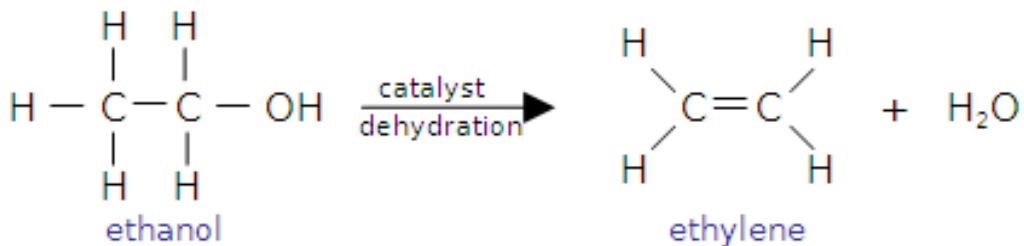


ภาพประกอบ 10 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุตสาหกรรมปิโตรเลียมกับปิโตรเคมี  
ที่มา: อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมพลาสติก (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2555)

### 2.2.2 ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration reaction) ของเอทานอล

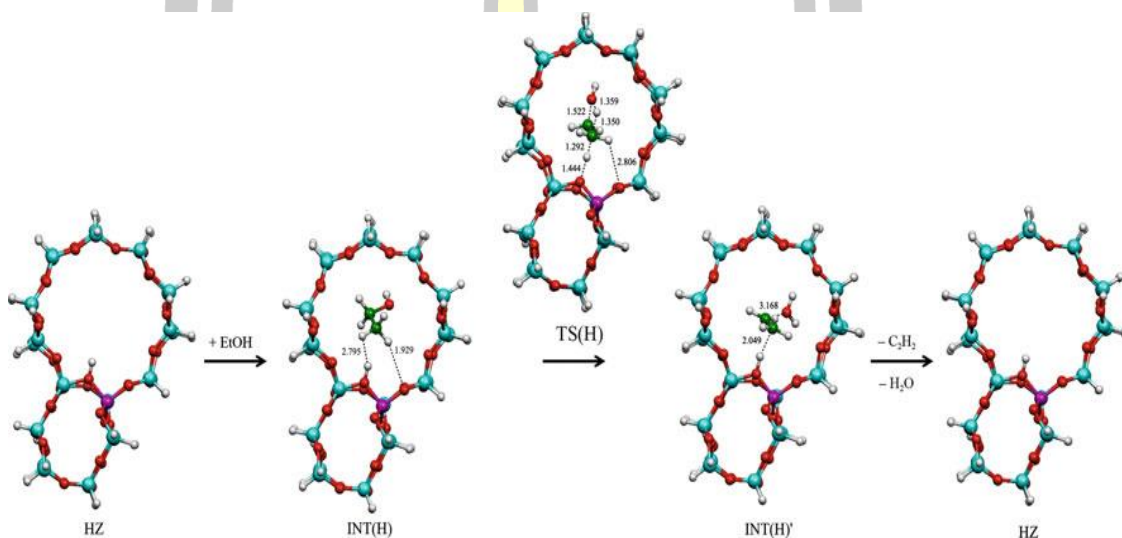
ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน เป็นปฏิกิริยาที่มีความเกี่ยวข้องกับการขจัดน้ำออกจากโมเลกุลและปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการใช้กรดบรอนสเตดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกรดบรอนสเตดจะมีหน้าที่ให้โปรตรอนแก่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) (อุณาโลม เวทวิวัฒน์, 2545) แสดงดังภาพประกอบ 11





ภาพประกอบ 11 ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล

ที่มา: Biomass, Ethylene, Ethanol, Polymers (bored of studies, 2004)



ภาพประกอบ 12 กลไกปฏิกิริยาสำหรับการแปลงเอทานอลเป็นเอทิลีนที่ โดยมี HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Parisa Dumrongsakda, 2011

### 2.3 ทฤษฎีตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา หมายถึงตัวที่ทำให้เกิดการแตกตัวบนโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยเลือกเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาข้างเคียงอื่น ๆ (สุรางคนาสุรางคนา หัตถา, 2546) ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารช่วยในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogenous Catalyst) ตัวเร่งจะเป็นของเหลวและมีสถานะเดียวกับสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst) โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นของแข็ง เนื่องจากทนทานต่อความดันและอุณหภูมิที่สูงอีกทั้งยังสามารถแยกออกจากสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ได้ง่าย

ในปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของแอลกอฮอล์จะนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยในการประหยัดเวลาในอุตสาหกรรมนิยมใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts) (วัชรกรรณ์ ปราณี, 2550)

### 2.3.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ สารว่องไว (Active component) เพื่อช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยา และตัวพา (Carrier) หรือ ตัวรองรับ (Support) เพื่อให้ง่ายต่อการกระจายตัวของสารว่องไว

### 2.3.2 สารว่องไว

สารว่องไวสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม โดยแบ่งตามหน้าที่ของสารว่องไว ได้แก่ โลหะ โลหะออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด และ โลหะและกรด ดังนี้

#### 2.3.2.1 โลหะ

โลหะ เช่น นิกเกิล แพลเลเดียม แพลทินัม ทองแดง และเงิน เป็นต้น มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ปฏิกิริยาไฮโดรจีโนลิซิส และปฏิกิริยาออกซิเดชัน แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสารว่องไวและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

สารกัมมันต์	ธาตุและสารประกอบ	ปฏิกิริยา
โลหะ	Fe, Co, Ni, Cu, Ru, Rh, Pb, Ir, Pt, Au	Hydrogenation Stream reforming Hydrocarbon reforming Dehydrogenation Ammonia synthesis Fischer - Tropsch Oxidation
ออกไซด์	ออกไซด์ของ V, Mn, Fe, Cu, Mo, W, rare earth, Al, Si, Sn, Pb, Bi	Complete and partial oxidation of hydrocarbons and CO Acid-catalyzed reactions (e.g. Cracking, Isomerization, Alkylation) Methanol synthesis

ตารางที่ 2 (ต่อ) ตัวอย่างสารว่องไวและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

สารกัมมันต์	ธาตุและสารประกอบ	ปฏิกิริยา
ซัลไฟด์	ซัลไฟด์ของ Co, Mo, W, Ni	Hydrotreating (e.g. Hydrodesulfurization, Hydrodenitrogenation, Hydrodeoxygenation) Hydrogenation
คาร์ไบด์	คาร์ไบด์ของ Fe, Mo, W	Hydrogenation Fischer -Tropsch

ที่มา : วัชรกรรณ์ ปราณี, 2550

#### 2.3.2.2 โลหะออกไซด์

โลหะออกไซด์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนและปฏิกิริยารีดอกซ์ เช่น ออกไซด์ของโลหะผสม เป็นต้น ซึ่งออกไซด์ประเภทนี้มีโครงสร้างเป็นสารประกอบชนิดไอออนิกและมีจำนวนออกซิเจนไม่แน่นอนซึ่งออกซิเจนสามารถเคลื่อนที่ได้ และอีกกลุ่มคือกลุ่มที่เร่งปฏิกิริยาการดีไฮโดรเจนออก เช่น  $Fe_2O_3$ , ZnO เป็นต้น โดยกลุ่มนี้ออกซิเจนถูกจับอย่างแข็งแรงกับโลหะและจะต้องไม่ถูกรีดิวซ์โดยไฮโดรเจน

#### 2.3.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด

ตัวเร่งปฏิกิริยากรดสามารถเร่งปฏิกิริยาได้หลายชนิด เช่น สารประกอบซิลิกา อะลูมินา สารประกอบโลหะฟอสเฟต ในงานวิจัยนี้ใช้สารประเภทซีโอไลต์ เพื่อเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล ปฏิกิริยาที่เร่งด้วยกรดมักขึ้นกับความแรงและธรรมชาติของกรดนั้น ๆ แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของอะตอมที่อยู่ในปฏิกิริยา

#### 2.3.2.4 โลหะและกรด

โลหะและกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถทำหน้าที่ 2 อย่างได้ กล่าวคือตัวเร่งประเภทนี้สามารถเร่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ต่างกัน เช่น แพลเรเดียมบนซีโอไลต์ ที่ใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิส เป็นต้น

#### 2.3.3 ตัวรองรับหรือตัวพา

จำเป็นต้องมีพื้นที่ผิวสูงสำหรับสารกัมมันต์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่พบบ่อยเป็นปฏิกิริยาจะอยู่บนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูง เช่น ซิลิกา อะลูมินา ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ เป็นต้น

### 2.3.4 ขั้นตอนของปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

การเข้าทำปฏิกิริยาบนผิวของตัวเร่ง มี 7 ขั้นตอน แสดงดังภาพประกอบ 13 มีรายละเอียดดังนี้

2.3.4.1 การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้นไปที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (External diffusion of reactant)

2.3.4.2 การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Internal pore diffusion of reactant)

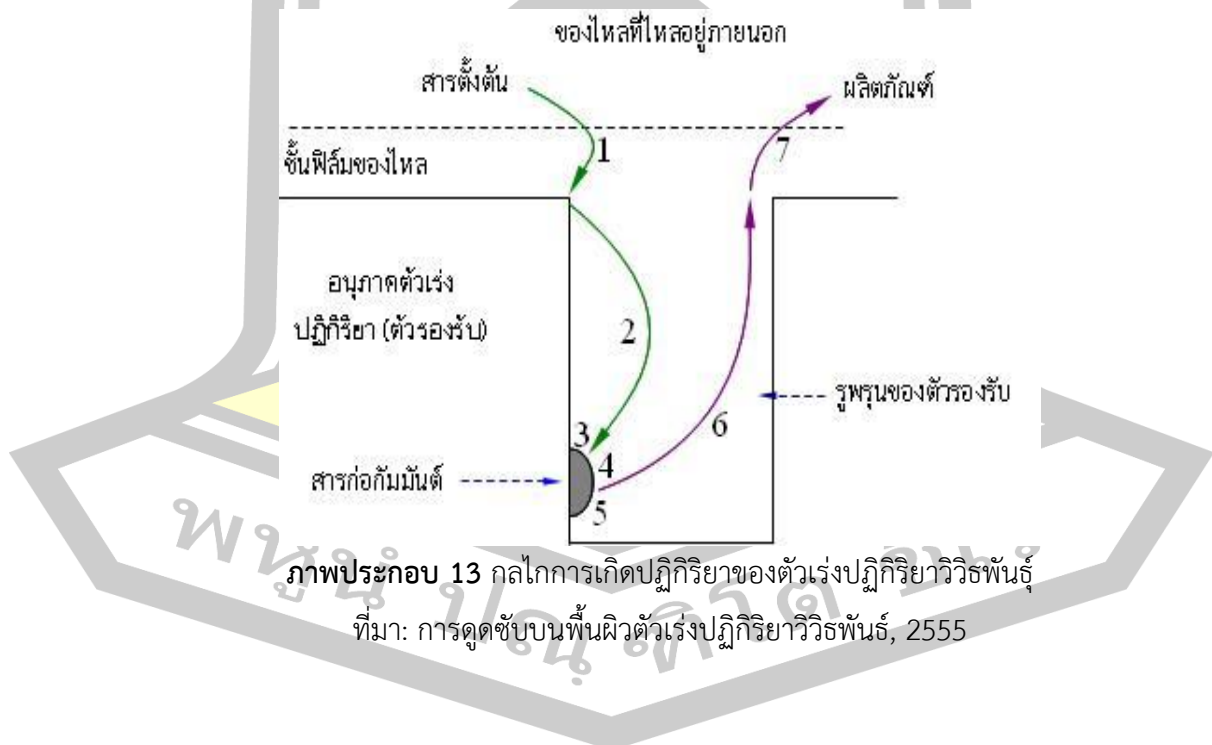
2.3.4.3 การดูดซับ (Adsorption of reactant)

2.3.4.4 การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Surface reaction)

2.3.4.5 การคายซับ (Desorption of product)

2.3.4.6 การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Internal pore diffusion of product)

2.3.4.7 การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา (External diffusion of product)



## 2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดซีโอไลต์ (Zeolite)

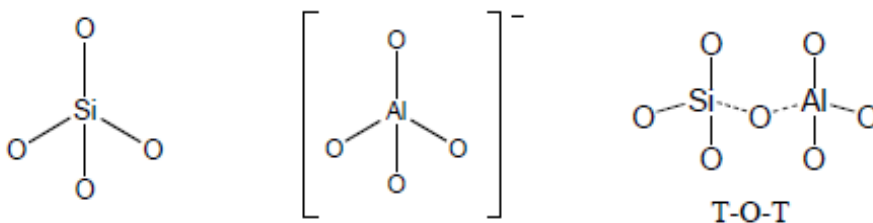
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (Zeolite) ถูกพบในรูปแร่ธรรมชาติ โดยผู้เชี่ยวชาญด้านแร่ชาวสวีเดน พบในรูปแร่อลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) มีมากกว่า 600 ชนิด แต่แบ่งตามโครงสร้างได้ 40 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างต่างกันและมีผลต่อสมบัติไม่เหมือนกัน เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น (ศิรินุช ลอยหา, 2556)

### 2.4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

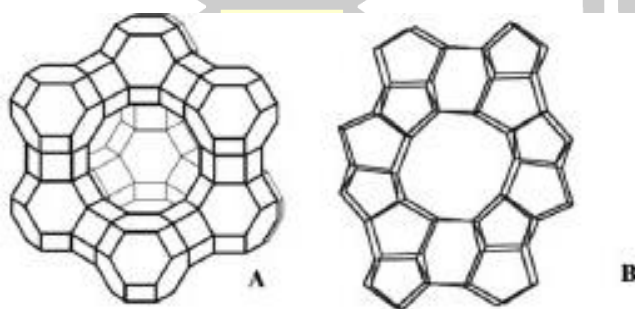
#### 2.4.1.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (Zeolite compositions)

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์เป็นกลุ่มของแร่ที่เรียกว่า ไฮเดรตอะลูมิโนซิลิเกต (Hydrated aluminosilicates) ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) 1 อะตอม และออกซิเจน 4 อะตอม มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{AlO}_4$  แสดงดังภาพประกอบ 14 และภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 14 โครงสร้างของซีโอไลต์

ที่มา: ซีโอไลต์และเทคโนโลยีซีโอไลต์ (ศิรินุช ลอยหา, 2556)



ภาพประกอบ 15 โครงสร้างของ A. ซีโอไลต์ Y B. ZSM-5

ที่มา: Carbocations on Zeolites. Quo Vadis, 2011

### 2.4.1.2 โครงสร้างรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (Pore structure)

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์สามารถจำแนกตามขนาดรูพรุน ตามระบบของ pore/channel สามารถจำแนกได้ 5 ชนิด (N. Y. Chen, William E. Garwood และ Francis G. Dwyer, 1996) แสดงดังตารางที่ 3

#### 2.4.1.2.1 8 Membered Pore System

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ในกลุ่มนี้จัดเป็นกลุ่มที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ประกอบด้วย การเรียงตัวกันของออกซิเจน 8 อะตอม

#### 2.4.1.2.2 Medium Pore System

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ในกลุ่มนี้จัดเป็นกลุ่มที่มีรูพรุนขนาดกลาง ประกอบด้วย การเรียงตัวกันของออกซิเจน 10 อะตอม

#### 2.4.1.2.3 Dual Pore System

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์กลุ่มนี้เกิดจากการเชื่อมต่อกันของซีโอไลต์ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มวงออกซิเจน 10 อะตอมรวมตัวกับกลุ่มวงออกซิเจน 8 อะตอม หรือ กลุ่มวงออกซิเจน 12 อะตอมรวมตัวกับกลุ่มวงออกซิเจน 8 อะตอม หรือ 10 อะตอม

#### 2.4.1.2.4 Large Pore System

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์กลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ประกอบด้วยมีการเรียงตัวของออกซิเจน 12 อะตอม และมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย

#### 2.4.1.2.5 Meso Pore System

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์กลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุด ประกอบด้วยมีการเรียงตัวของออกซิเจน 18 อะตอม

**ตารางที่ 3** การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน

IUPAC code	Pore system	Pore size (angstrom)	Number of rings
8 Membered pore systems			
CHA	Chabazite	8	3.8 x 3.8
RHO	RHO	8	3.6
KFI	ZK-5	8	3.9
ERI	Erionite	8	3.6 x 5.1
LTA	Linde Type A	8	4.1

ตารางที่ 3 (ต่อ) การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน

IUPAC code	Pore system	Pore size (angstrom)	Number of rings
Medium pore system			
PAR	Partheite	10	3.5 × 6.9
LAU	Laumontite	10	4.0 × 5.3
AEL	SAPO – 11	10	3.9 × 6.3
TON	Theta – 1 (ZSM-22)	10	4.4 × 5.5
	ZSM – 23	10	4.5 × 5.2
EUO	ZSM – 48	10	5.3 × 5.6
MFI	ZSM – 50	10	5.3 × 5.7
MEL	ZSM – 5	10	5.3 × 5.6
	ZSM – 11	10	5.3 × 5.4
Dual pore system			
FER	Ferrierite	10	4.2 × 4.5
		8	3.5 × 4.8
MPS	ZSM – 57	10	5.1 × 5.4
		8	5.3 × 4.8
STI	Stibite	10	4.9 × 6.1
MAZ		8	2.7 × 5.6
	Mazzite (ZSM - 4)	12	7.4 × 5.6
MOR		8	3.4 × 5.6
	Mordenite	12	6.5 × 7.0
		8	2.6 × 5.7

ตารางที่ 3 (ต่อ) การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน

IUPAC code	Pore system	Pore size (angstrom)	Number of ring
Large pore system			
MTW	ZSM – 12	12	5.5 x 5.9
BEA	Beta	12	7.6 x 6.4
LTL	Linde Type L	12	5.5 x 5.5
FAU	Faujasite	12	7.1
		12	7.4
			7.4 x 6.5
Meso pore system	VPI – 5	18	12.1
VFI	M41 – 5		16 to 100

ที่มา : N. Y. Chen, William E. Garwood และ Francis G. Dwyer, 1996

#### 2.4.1.3 ตำแหน่งกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (active site)

ตำแหน่งกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับการสังเคราะห์และการผ่านกระบวนการบำบัด เลย์ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์มีสมบัติเป็นทั้ง กรด เบส รีดอกซ์ หรือไบฟังก์ชัน (bifunction) ซึ่งโดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกรดหรือไบฟังก์ชัน

#### 2.4.2 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประกอบด้วยช่องว่างมีการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลมาก อีกทั้งสามารถดูดซับแก๊สและไอของสารผสมได้ดี เช่น แอมโมเนีย ไฮโดรเจน เป็นต้น ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์จึงมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน โครงสร้างโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์จะมีความสัมพันธ์กับสมบัติต่างๆ ดังนี้

2.4.2.1 สามารถเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ในปริมาณสูง

2.4.2.2 มีความหนาแน่นต่ำและมีปริมาตรของช่องว่างมากเมื่อถูกดึงน้ำออกจาก

โครงสร้าง

2.4.2.3 มีความเสถียรเมื่อถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง

2.4.2.4 สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้

2.4.2.5 มีขนาดช่องว่างสม่ำเสมอ เมื่อผลึกถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง



2.4.2.6 สามารถดูดซับแก๊สและไอได้

2.4.2.7 มีสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4.3 ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

2.4.3.1 ใช้ในกระบวนการดูดซับเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แต่ละชนิดมีขนาดรูพรุน ทำให้ดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี โดยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์มีหลายชนิดและมีรูพรุนที่มีขนาดต่างกัน จึงทำให้สามารถดูดซับสารได้ต่างกัน

2.4.3.2 ใช้ในกระบวนการ Selective Catalytic Reduction (SCR) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการลดมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์เบนซิน เครื่องยนต์ดีเซล หรือในโรงงานอุตสาหกรรม

2.4.3.3 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น Hydrogenation, Alkylation เป็นต้น

2.4.3.4 ใช้เป็น Detergent builder คือใช้เป็นส่วนผสมของผงซักฟอก

2.4.3.5 ใช้เป็นสารลดความกระด้างของน้ำ

2.4.3.6 ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน โดยการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ขึ้นกับธรรมชาติของแคตไอออน อุณหภูมิที่ใช้ ตัวทำละลาย ลักษณะโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ความเข้มข้นของแคตไอออนในสารละลาย และชนิดของแอนไอออนที่รวมตัวกับแคตไอออนในสารละลาย

2.4.4 ปฏิกิริยาที่ใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ซีโอไลต์มีความสำคัญทางด้านอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี โดยปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (ชุติมณฑิ รัตน์บัณฑิตสกุล, 2552) ได้แก่

2.4.4.1 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) เป็นการแตกพันธะของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวให้มีสายโซ่สั้นลง เช่น แกสโซลีน

2.4.4.2 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจน (Hydrocracking) เป็นการเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็กโดยใช้ไฮโดรเจนช่วย

2.4.4.3 รีฟอร์มมิง (Reforming) เป็นการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลิฟาติกให้เป็นอะโรมาติก

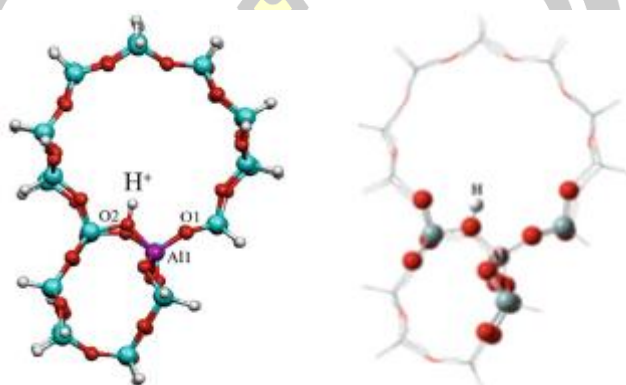
2.4.4.4 การเปลี่ยนไอโซเมอร์ของ C5 และ C6 (C5/C6 Isomerization) เป็นการเปลี่ยนค่าออกเทนต่ำให้เป็นไอโซเพนเทนและเตมเพทิลบิวเทนซึ่งมีค่าออกเทนที่สูงกว่าการกำจัดไขในน้ำมัน (Dewaxing)

2.4.4.5 การเติมหมู่แอลคิลในเบนซีน (Benzene alkylation) เช่น การผลิตเอทิลเบนซีนจากเอทิลีนและเบนซีนหรือการผลิตคิวมินจากเบนซีนและโพรพิลีน เป็นต้น

2.4.4.6 การเปลี่ยนไอโซเมอร์ของไซลีน (Xylene isomerization) เป็นการเปลี่ยนไอโซเมอร์ของ o-ไซลีนให้เป็น p-ไซลีน ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมกรด Terephthalic เพื่อผลิตพอลิเอสเทอร์ (Polyester)

## 2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดหนึ่งในกลุ่มของ ZSM-5 ที่มีโปรตอน ( $H^+$ ) เป็นตำแหน่งแลกเปลี่ยนไอออน ซีโอไลต์ที่มีความเป็นกรดจะมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ณัฐกฤตต์ เพชรนะ, 2554) แสดงดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ที่มา: Parisa Dumrongsakda, 2011

## 2.6 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

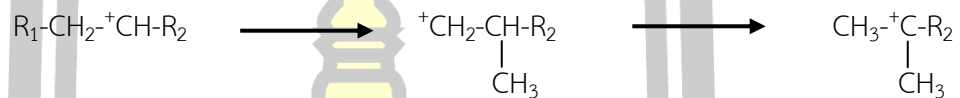
การแลกเปลี่ยนไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการเติมโลหะ มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เนื่องจากมีการปรับเปลี่ยนความเป็นกรดของ HZSM-5 สำหรับการเปลี่ยนเอทานอลให้เป็นไฮโดรคาร์บอนโดยอาศัยปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเอทานอลเป็นเอทิลีน จะเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นกรดอ่อนๆ ในขณะที่ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับไฮโดรคาร์บอนและอะโรมาติกส์ที่สูงขึ้นจำเป็นต้องมีความแข็งแรงของกรดสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าไอออนของโลหะสามารถลดความเป็นกรดของซีโอไลต์ ZSM-5 ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลเป็นเอทิลีนและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาค่อนข้างต่ำ และเกิดเป็นไดเอทิลอีเทอร์ได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Baohui Chen, Jiazheng Lu, Lianping Wu และ Zisheng Chao, 2016) ตามกฎของสเวนเต อาร์รีเนียส พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) หรือ ไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เมื่อสารเหล่านั้นละลายน้ำ โดยระบุว่า "กรด หมายถึง สารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัว ทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนหรือไฮโดรเนียมไอออนเพิ่มขึ้น" และ "เบส หมายถึง สารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวทำให้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้น" (พงษ์ศักดิ์ พวงเพชร, 2560)

การเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion) เกิดจากโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนมีการสูญเสียไฮโดรไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีประจุเป็นบวกโดย

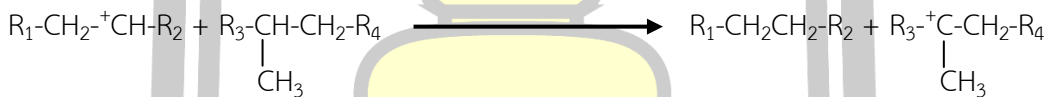
tertiary ion จะมีความเสถียรมากกว่า secondary ion และ primary ion (Charles N. Satterfield, 1991) (Schobert, 1991)



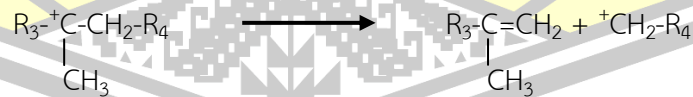
ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลภายในโมเลกุลของคาร์บอนเนียมไอออนทำให้โครงสร้างของคาร์บอนเนียมไอออนมีความเสถียร



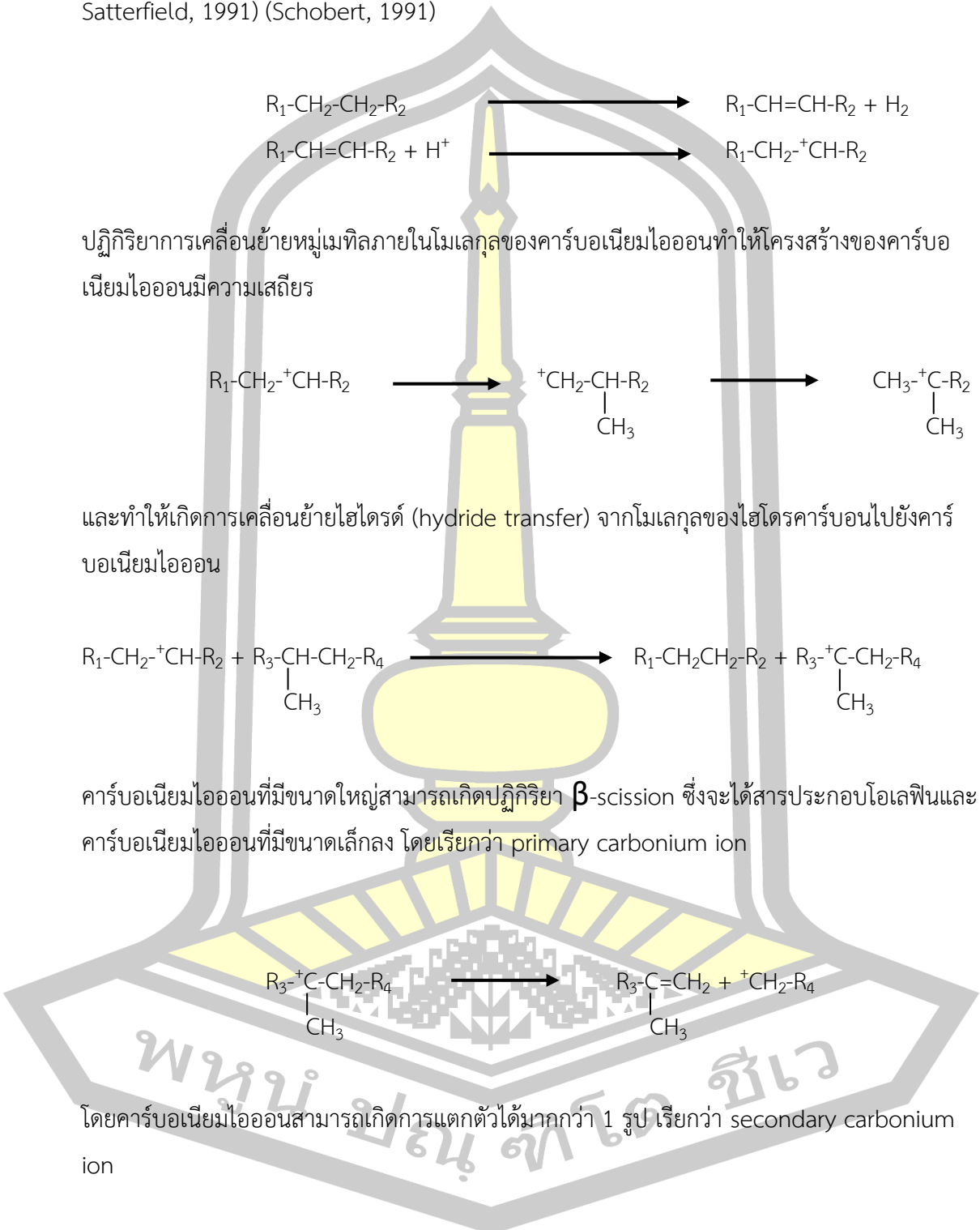
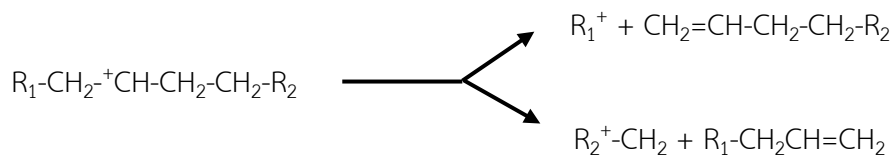
และทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) จากโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนไปยังคาร์บอนเนียมไอออน



คาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา  $\beta$ -scission ซึ่งจะได้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง โดยเรียกว่า primary carbonium ion



โดยคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูป เรียกว่า secondary carbonium ion



## 2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yiwen FANG, Ji TANG, Xiaochang HUANG, Weibin SHEN, Yibing SONG, และ Changyong SUN (2010) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการสร้างวงแหวนอะโรมาติกของไดเมทิลอีเทอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/HZSM-5 พบว่าการเพิ่มจำนวนและความแข็งแรงของกรดใน HZSM-5 ที่เป็นประโยชน์สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างวงแหวน อะโรมาติกของ ไดเมทิลอีเทอร์ โดยการเติมโลหะ Zn ลงในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 พบว่าที่ 480 °C ผลผลิตอะโรเมติกกรรมเพิ่มขึ้นเป็น 78.0 % และเมื่อเติมโลหะ Zn เพิ่มมากขึ้นก็มีการเลือกเกิดเอทิลีนมากขึ้น

J. Haber, Katarzyna Pamin , L. Matachowski, B. Napruszewska และ J. Poktowicz (2002) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลเพื่อผลิตเอทิลีน โดยใช้ซิลิกาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเคลือบด้วย  $KxH_3-xPW_{12}O_{40}$  และ  $AgxH_3-xPW_{12}O_{40}$  โดยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับ  $KxH_3-xPW_{12}O_{40}$  และ  $AgxH_3-xPW_{12}O_{40}$  มีความใกล้เคียงกันโดยมีอุณหภูมิอยู่ที่ 470 °C ซึ่งจะทำให้เอทานอลมีค่าการเปลี่ยนแปลงถึง 100 %

T.Zaki (2005) ได้ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโลหะทรานซิชันออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล โดยใช้ เพอร์ริคออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ อะลูมินาและซิลิกา โดยวัดค่าความเป็นกรดและทดสอบสมบัติการคายซับและดูดซับแก๊สไนโตรเจน และนำตัวเร่งปฏิกิริยานั้นไปทดลองการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลในช่วงอุณหภูมิ 200-500 °C พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเอทานอลที่เกิดก็จะเพิ่มขึ้น และมีผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้เป็นไดเอทิลอีเทอร์และเอทิลีน

Dilek Varisli, Timur Dogu และ Gulsen Dogu (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลที่อุณหภูมิ 140-250°C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HPA STA และ TPA พบว่าอุณหภูมิ 250°C มีค่าการเกิดเอทิลีนสูงที่สุดถึง 0.75% โดยใช้ TPA และที่ 160°C จะเกิดผลิตภัณฑ์ไดเอทิลอีเทอร์

Guangwen Chen, Shulian Li, Fengjun Jiao และ Quan Yuan (2007) ได้ทำการศึกษาการผลิตเอทิลีนจากไปโอเอทานอลโดยใช้ไทเทเนียเคลือบบนแกมมาอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันโดยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา คือ 500°C ทำให้สัดส่วนการเกิดเอทิลีนเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบ ไทเทเนียจะทำให้สัดส่วนของเอทิลีนเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อทดลองโดยเพิ่มค่า LHSV พบว่าการเกิด เอทิลีนลดลงแต่มี ไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้น

Denise Fan, Der-Jong Dai และ Ho-Shing Wu (2013) พบว่า HZSM-5 สามารถผลิตเอทิลีนได้ถึง 99.7% ที่อุณหภูมิ 240°C และมีอายุการใช้งาน 630 ชั่วโมง

พิชญ์ณัฐ์ เสวตรัตน์ (2552) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะมีความเลือกจำเพาะต่อโมโนกลี-เซอไรด์

มากกว่ารูพรุนขนาดกลางและความเป็นกรดที่รุนแรงของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ทำให้สามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้ดี แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาทำให้การเลือกความจำเพาะของโมโนกลีเซอไรด์ลดลง

เมตตา เจริญพานิช, วุฒิชัย ไข้อย่างวงศ์ และ อาสา ชินธรรมมิตร (2539) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยอัตราการให้ความร้อนที่ใช้คือ 1.2, 1.6, 2.0 และ 2.5°C/min (จากอุณหภูมิ 30°C-160°C) โดยมีอัตราช่วงหลัง (จาก 160°C-210°C) เป็น 0.2°C/min และอัตรา 1.6, 2.0 และ 2.5°C/min (จาก 30°C-210°C) พบว่าซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถเตรียมได้ยกเว้นช่วง 1.2°C/min (โดยควบคุมอัตราช่วงหลังที่ 0.2°C/min) แต่ช่วงที่ 2.0°C/min สามารถผลิต ZSM-5 ได้ในปริมาณสูงที่สุดและมีสมบัติทางกายภาพสม่ำเสมอมากที่สุด



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 และ NaZSM-5

การเติมโลหะต่างๆลงในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ทำได้ดังนี้

###### 3.1.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/NaZSM-5

ทำได้โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 มาทำการเติมสารละลาย 0.1 M  $\text{MoO}_3$  ในอัตราส่วน 5% โดยน้ำหนัก ที่งัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผาที่  $400^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Nina Zhan, Yi Hu, Heng Li, Dinghua Yu, Yuwang Han และ He Huang, 2011)

###### 3.1.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/HZSM-5 และ Zn/NaZSM-5

ทำได้โดยนำการนำตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 มาทำการเติมสารละลาย 0.1 M  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  ในอัตราส่วน 5% โดยน้ำหนัก ที่งัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและนำไปเผาที่  $550^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (Yiwen FANG, Ji TANG, Xiaochang HUANG, Weibin SHEN, Yibing SONG, และ Changyong SUN ,2010)

###### 3.1.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/HZSM-5 และ Fe/NaZSM-5

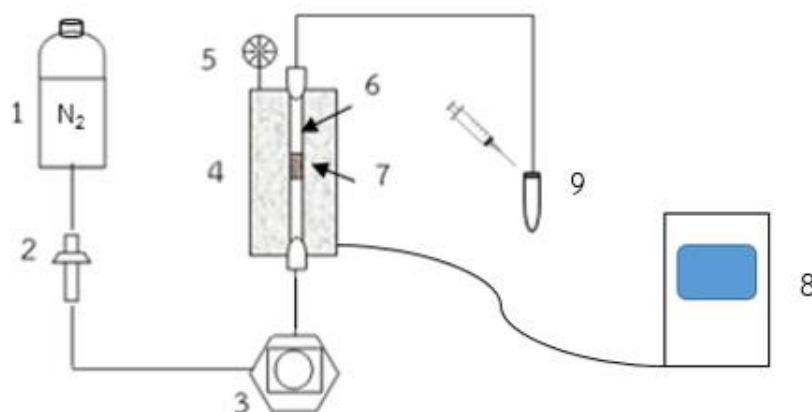
ทำได้โดยนำการนำตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 มาทำการเติมสารละลาย 0.1 M  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  ในอัตราส่วน 5% โดยน้ำหนัก ที่งัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผาที่  $550^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Xiaoyin Chen, Wei Li และ Johannes W. Schwank, 2011)

###### 3.1.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5 และ Ag/NaZSM-5

ทำได้โดยนำการนำตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 มาทำการเติมสารละลาย 0.1 M  $\text{AgNO}_3$  ในอัตราส่วน 5% โดยน้ำหนัก ที่งัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปเผาที่  $450^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Yang Liu, Xiaosong Li, Jinglin Liu, Chuan Shi, และ Aimin Zhu, 2014)

### 3.2 การติดตั้งระบบเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองในส่วนของ การเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5, Ag/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Fe/HZSM-5, Mo/HZSM-5, NaZSM-5, Ag/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5 และ Mo/NaZSM-5 โดยในระบบเร่งปฏิกิริยามี ส่วนประกอบดังนี้คือ 1.ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen Tank) 2.เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Rotameter) 3.เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) 4.เตาปฏิกรณ์แบบท่อ (tube furnace) 5.เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) 6.ท่อแก้วยาว 7.ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา 8.ตู้ควบคุมอุณหภูมิ 9.หลอดสุญญากาศ (Vacuum tube) แสดงดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 เครื่องเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล

รายละเอียดส่วนประกอบ มีดังนี้

#### 3.2.1 ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen tank)

แก๊สไนโตรเจนที่ใช้มีความบริสุทธิ์อยู่ที่ 99.9% มีหัวปรับแรงดันใช้สำหรับควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส โดยใช้ความดันที่ 1 บาร์

#### 3.2.2 เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Rotameter)

ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการเข้าสู่ระบบเร่งปฏิกิริยา โดยทำการกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเริ่มต้นในการเข้าสู่ระบบคือ 40 ml/min หรือ 2.4 L/hr

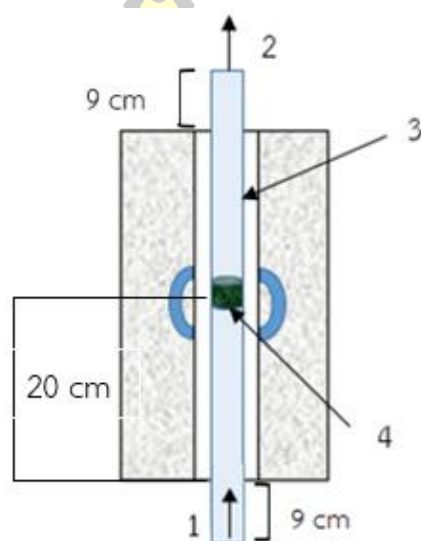
#### 3.2.3 เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)

ทำหน้าที่ระเหยเอทานอลให้กลายเป็นไอ ใช้อุณหภูมิในการระเหยอยู่ที่ 80°C

#### 3.2.4 เตาปฏิกรณ์แบบท่อ (Tube furnace)

เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีความสูงอยู่ที่ 57 cm ขนาดช่องให้ความร้อน 5 x 5 x 2.5 cm ร่องวางขดลวดกว้าง 2 cm ลึก 6 cm ภายในเตาปฏิกรณ์บุด้วยใยแก้วเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวน

ความร้อน และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลอดฮีทเตอร์ ขนาด 1.2 mm ขนาดขดลวด 1.6 mm กระแสไฟฟ้า 10 A มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับ 2,200 W เป็นตัวกำเนิดความร้อนของ เตปปฏิกรณ์ โดยปลายท่อแก้วอยู่ห่างจากขอบบนและขอบล่างของเตปปฏิกรณ์เป็นระยะ 9 cm และ โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะ 20 cm วัดจากระยะของขอบเตปปฏิกรณ์ แสดงดังภาพประกอบ 18 และ 19



ภาพประกอบ 18 เตปปฏิกรณ์แบบท่อ

มีรายละเอียดได้ดังนี้

หมายเลข 1 คือ ทิศทางการไหลของแก๊สที่เข้าสู่เตปปฏิกรณ์

หมายเลข 2 คือ ทิศทางการไหลของแก๊สที่เข้าสู่เตปปฏิกรณ์

หมายเลข 3 คือ ท่อแก้วสำหรับใช้ในเตปปฏิกรณ์

หมายเลข 4 คือ ไยแก้วที่ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา

พหุบัน ปณฺ ทิโต ชิว





ภาพประกอบ 19 เตาปฏิกรณ์แบบท่อที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.5 เครื่องวัดอุณหภูมิ

เครื่องวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปอร์ทิพ์เคิล (Type K) เส้นผ่าศูนย์กลาง 21 mm ยาว 200 mm (เนื้อสแตนเลส) ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1100°C โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 100, 150, 200 และ 250°C ดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 เครื่องวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปอร์ทิพ์เคิล (Type K)

### 3.2.6 ท่อแก๊วยาวสำหรับเตาปฏิกรณ์

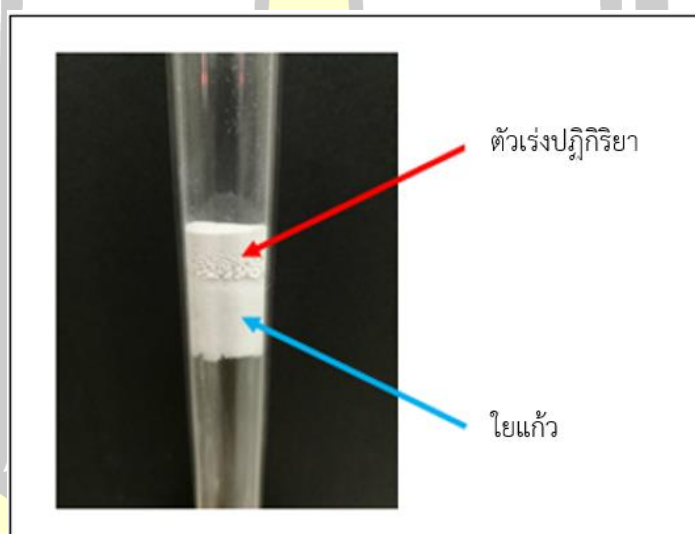
ท่อแก้วที่ใช้สำหรับเตาปฏิกรณ์มีความยาวท่ออยู่ที่ 75 cm และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่ออยู่ที่ 2.5 cm มีหน้าที่สำหรับรองรับสำหรับใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 ท่อแก้วสำหรับเตาปฏิกรณ์

### 3.2.7 ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำหน้าที่ในการรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้ใช้ใยแก้วเป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีความสูงของใยแก้วอยู่ที่ 1 cm สำหรับรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g (P.L. Tan, Chak Tong Au และ Suet ye Lai, 2007) โดยใส่ใยแก้วอยู่ที่ระยะ 25 cm ดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 ท่อแก้วที่ใส่คะตาลีสต์เบด

### 3.2.8 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

เครื่องควบคุมอุณหภูมิทางผู้วิจัยใช้ตู้คอนโทรลเตาไฟฟ้า 38 Am. และแปลค่าพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์โดยอาศัยเครื่องวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปอร์ไทป์เซลล์ (Type K) แสดงดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.9 หลอดเก็บตัวอย่าง

เป็นหลอดสุญญากาศ (Vacuum tube) ขนาด 13x100 mm วัสดุของหลอดเป็นพลาสติกชนิด PET ฝาสีแดง สามารถบรรจุของเหลวหรืออากาศได้ปริมาตร 10 ml จุกปิดเป็นแบบ 2 ชั้น ชั้นนอกเป็นพลาสติก มีเกลียวหุ้มชั้นใน ซึ่งเป็นยางปิดได้สนิทไม่มีการรั่วซึมของของเหลวและอากาศ (สถาบันบำราศนราดูร, 2557) แสดงดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 หลอดสุญญากาศ

ที่มา : ดีไลท์อินเตอร์เนชั่นแนล (HK) จำกัด, 2017-2018

### 3.3 การเตรียมเอทานอล

การเตรียมเอทานอลสำหรับใช้ในปฏิกิริยาดีไฮเดรชันในการทดลองนี้ใช้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ที่ 99.5%

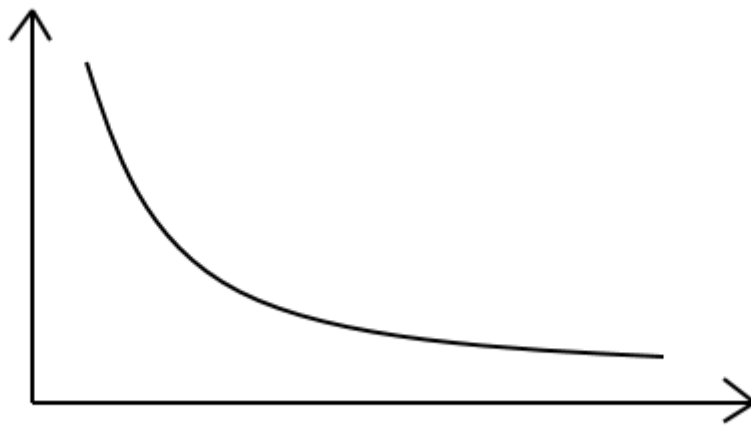
#### 3.3.1 การระเหยเอทานอล

การระเหยเอทานอลสามารถทำได้โดยให้ความร้อนแก่เอทานอล โดยจะให้ความร้อนอยู่ที่ 80-85°C โดนผ่าน hotplate โดยเมื่อมวลโมเลกุลของเอทานอลเพิ่มขึ้น อัตราการระเหยก็จะลดลงตามลำดับ (Yoojin Lee, 2010) ซึ่งอัตราการระเหยสามารถหาได้จากสมการอัตราการระเหย แสดงดังภาพประกอบ 25 อัตราการระเหยเอทานอลบริสุทธิ์ที่ 99% มีความผันกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเวลาผ่านไปโดยเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น อัตราการระเหยของเอทานอลยิ่งลดลง (Ted Cook, Susan English และ Katie Lanier, 1996) แสดงดังตารางที่ 4 และสามารถสร้างกราฟของปริมาณแอลกอฮอล์ต่อเวลาแสดงดังสมการที่ (1) และภาพประกอบ 26

อัตราการระเหย,  $r = \frac{(\Delta \text{Temperature})}{\text{Time}} / \text{°C} * \text{S}^{-1}$  ----- (1)

Time

อัตราการระเหย,  $r / \text{°C} \text{S}^{-1}$



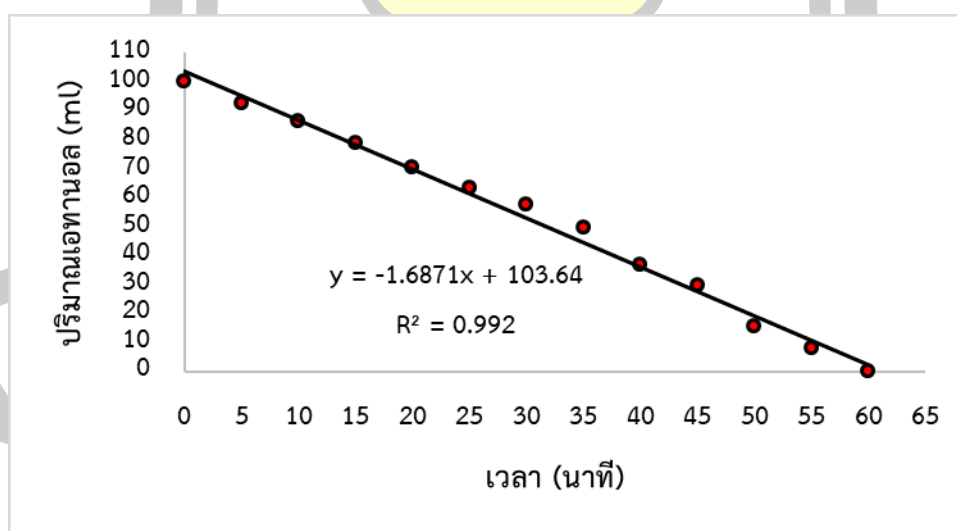
มวลโมเลกุล,  $M / \text{g/mol}$

ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลและอัตราการระเหย

ที่มา : Internal Assessment – Rate of Evaporation (Yoojin Lee, 2010)

ตารางที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอทานอลต่อเวลา

เวลา (นาที)	ปริมาณเอทานอล (ml)
0	100
5	92.7
10	86.3
15	78.9
20	70.6
25	63.4
30	57.5
35	49.8
40	36.7
45	29.9
50	15.7
55	7.8
60	0



ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอทานอลต่อเวลา

### 3.3.2 การทดลองเปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 โดยทำการเติมโลหะเงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และ โมลิบดีนัม (Mo) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C โดยอัตราการไหลของเอทานอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 1.1 gเอทานอล/min.  $\rho_{\text{catalyst}}$  ความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ 29.2 g/L และค่า LHSV ที่ 100°C มีค่าเท่ากับ 3.6 hr<sup>-1</sup>, LHSV ที่ 150°C มีค่าเท่ากับ 4 hr<sup>-1</sup>, LHSV ที่ 200°C มีค่าเท่ากับ 4.6 hr<sup>-1</sup> และ LHSV ที่ 250°C มีค่าเท่ากับ 5 hr<sup>-1</sup> ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะ และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่มีผลต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.4 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผล

การเตรียมเอทานอลสำหรับใช้ในปฏิกิริยาดีไฮเดรชันในการทดลองนี้ใช้เอทานอล

#### 3.4.1 การเก็บตัวอย่าง

ใช้เข็มฉีดยาแก้วขนาด 10 cc โดยดูดแก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอล ทำการเก็บตัวอย่างแก๊สหลังจากที่ตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 45 นาทีหรือที่ภาวะสมดุล โดยในการทดลองที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C ใส่ในหลอดสุญญากาศและพันด้วยพาราฟิล์ม (Parafilm) ที่ด้านบนของหลอดเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไปแสดงดังภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 27 การเก็บตัวอย่างแก๊ส

### 3.4.2 การวิเคราะห์ผล

ทำการวิเคราะห์ผลตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะต่าง ๆ ทำได้โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS รุ่น QP2010 Shimadzu ) แสดงดังตารางที่ 5 มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.3.1 คอลัมน์

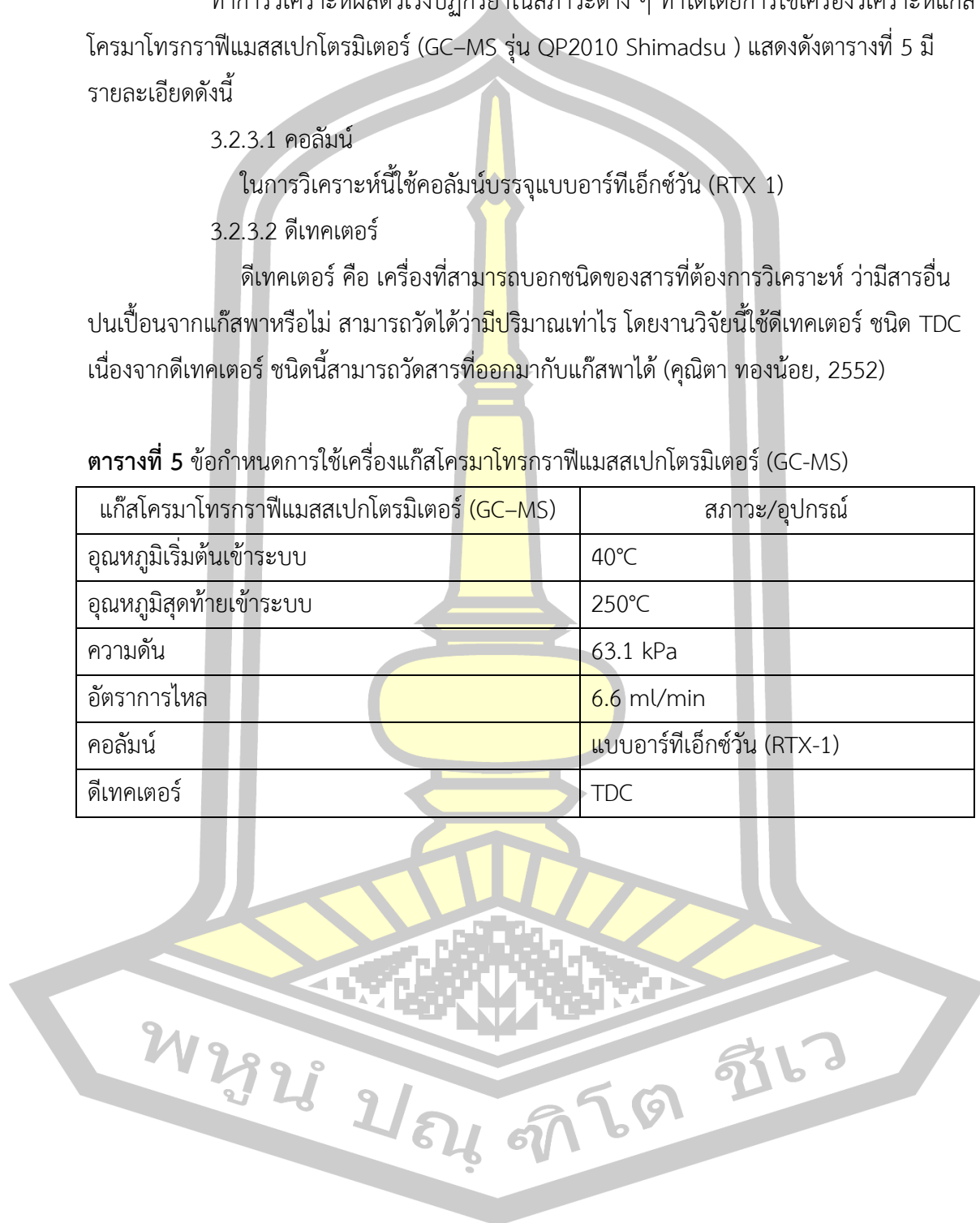
ในการวิเคราะห์นี้ใช้คอลัมน์บรรจุแบบอาร์ทีเอ็กซ์วัน (RTX 1)

#### 3.2.3.2 ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์ คือ เครื่องที่สามารถบอกชนิดของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ว่ามีสารอื่นปนเปื้อนจากแก๊สพาหรือไม่ สามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าไร โดยงานวิจัยนี้ใช้ดีเทคเตอร์ ชนิด TDC เนื่องจากดีเทคเตอร์ ชนิดนี้สามารถวัดสารที่ออกมากับแก๊สพาได้ (คุณिता ทองน้อย, 2552)

**ตารางที่ 5** ข้อกำหนดการใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS)

แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS)	สภาวะ/อุปกรณ์
อุณหภูมิเริ่มต้นเข้าระบบ	40°C
อุณหภูมิสุดท้ายเข้าระบบ	250°C
ความดัน	63.1 kPa
อัตราการไหล	6.6 ml/min
คอลัมน์	แบบอาร์ทีเอ็กซ์วัน (RTX-1)
ดีเทคเตอร์	TDC



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปราย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ด้วยโลหะเงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และโมลิบดีนัม (Mo) โดยในการทดลองจะแบ่งได้เป็น 2 ชุดการทดลองคือชุดการทดลองที่ 1 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ด้วยโลหะ Ag, Zn, Fe และ Mo และชุดการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอล

#### 4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5

ในงานวิจัยนี้มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 โดยทำการเติมโลหะ Ag, Zn, Fe และ Mo ลงในตัวเร่ง แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดโลหะ	ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5	ตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5
โลหะ Ag เติมโลหะโดยใช้ในรูปแบบของสารละลาย 0.1 M $\text{AgNO}_3$	Ag/HZSM-5	Ag/NaZSM-5
โลหะ Zn เติมโลหะโดยใช้ในรูปแบบของสารละลาย 0.1 M $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	Zn/HZSM-5	Zn/NaZSM-5
โลหะ Fe เติมโลหะโดยใช้ในรูปแบบของสารละลาย 0.1 M $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$	Fe/HZSM-5	Fe/NaZSM-5
โลหะ Mo เติมโลหะโดยใช้ในรูปแบบของสารละลาย 0.1 M $\text{MoO}_3$	Mo/HZSM-5	Mo/NaZSM-5

ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและผลึกด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) วิเคราะห์สัดส่วนของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS) แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 40.3% และมีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 2.1% ตัวเร่ง Mo/HZSM-5 มีปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 32.5% มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 1.7% และมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 3.5% ตัวเร่งปฏิกิริยา



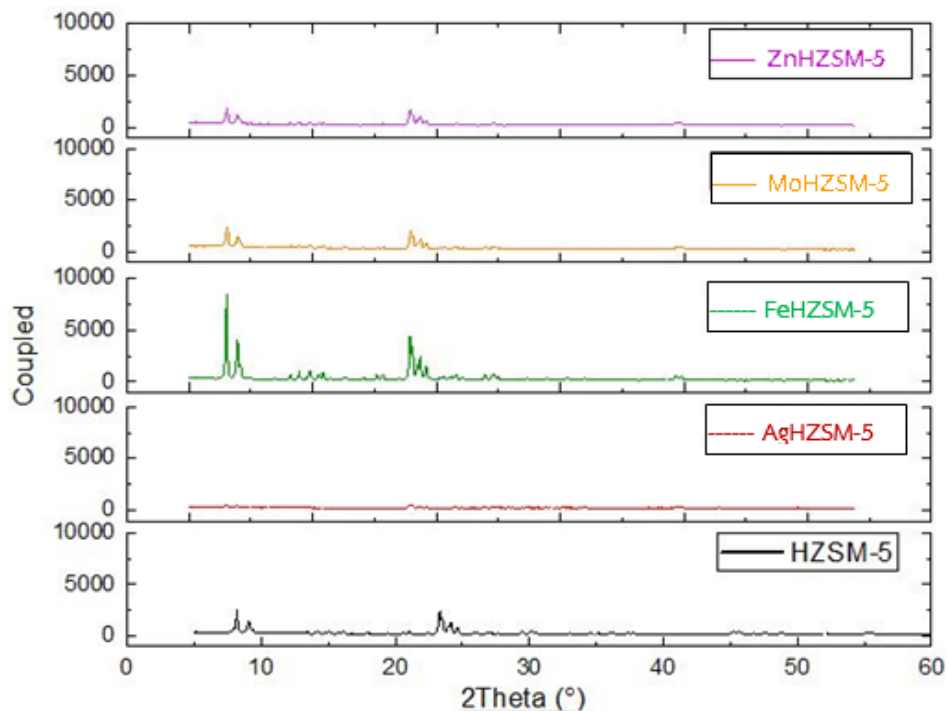
Zn/HZSM-5 มีปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 29.9% มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 1.7% และมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 0.6% ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/ZSM-5 ปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 34.3% มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 1.8% และมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 0.4% และตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/ZSM-5 มีปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 34.5% มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 1.8% และมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 2% ตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 และสัดส่วนของธาตุที่มีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM และเครื่อง EDS พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 ปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 36.6% มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 2.1% และมีปริมาณ Na อยู่ที่ 0.9% ตัวเร่ง Mo/NaZSM-5 ปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 35.4% มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 1.8% ไม่พบปริมาณของ Na และมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 3.5% ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5 ปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 39.5% มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 2.2% และมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 0.9% ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/NaZSM-5 ปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 34.5% มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 2% และมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 0.4% และตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5 ปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 34.1% มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 1.9% และมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 3% แสดงผลดังตารางที่ 7

จากตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะมีปริมาณซิลิกอนลดลงใกล้เคียงกันโดยตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5 มีปริมาณซิลิกอนมากที่สุดคือ 34.5% รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/HZSM-5, Mo/HZSM-5 และ Zn/HZSM-5 โดยมีปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 34.3, 32.5 และ 29.9% ตามลำดับ ปริมาณอะลูมิเนียมลดลงใกล้เคียงกันโดยตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5 และ Fe/HZSM-5 มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 1.8% และตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/HZSM-5 และ Ag/HZSM-5 มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 1.7% ปริมาณโลหะที่ตรวจพบในตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/HZSM-5 มีปริมาณโลหะมากที่สุดคือ 3.5% รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5, Zn/HZSM-5 และ Fe/HZSM-5 โดยมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 3.0, 0.9 และ 0.4% ตามลำดับและเมื่อทำการเติมโลหะลงในตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5 มีปริมาณซิลิกอนเพิ่มขึ้นโดยมีปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 39.5% ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5 และ Ag/NaZSM-5 มีปริมาณซิลิกอนลดลงใกล้เคียงกันโดยมีปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 35.4, 34.5 และ 34.1% ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5 มีปริมาณอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นโดยมีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 2.2% ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/NaZSM-5, Ag/NaZSM-5 และ Mo/NaZSM-5 มีปริมาณอะลูมิเนียมลดลงใกล้เคียงกันโดยมีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ที่ 2.0, 1.9 และ 1.8% ตามลำดับ ปริมาณโลหะที่ตรวจพบในตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/NaZSM-5 มีปริมาณโลหะมากที่สุดคือ 3.5% รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5 และ Fe/NaZSM-5 โดยมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 3.0, 0.9 และ 0.4% ตามลำดับ

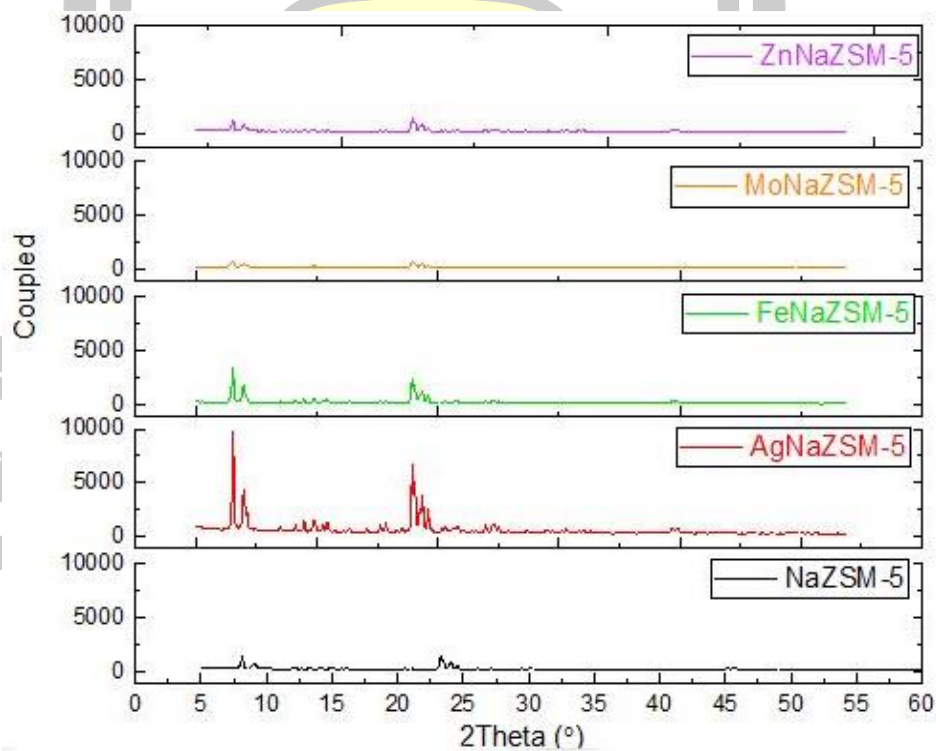
**ตารางที่ 7** การเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะเงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และ โมลิบดีนัม (Mo) ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณซิลิกอน (%)	ปริมาณอะลูมิเนียม (%)	ปริมาณโลหะ (%)
HZSM-5	40.3	2.1	-
Mo/HZSM-5	32.5	1.7	3.5
Zn/HZSM-5	29.9	1.7	0.6
Fe/HZSM-5	34.3	1.8	0.4
Ag/HZSM-5	34.5	1.8	2.0
NaZSM-5	36.6	2.1	-
Mo/NaZSM-5	35.4	1.8	3.5
Zn/NaZSM-5	39.5	2.2	0.9
Fe/NaZSM-5	34.5	2.0	0.4
Ag/NaZSM-5	34.1	1.9	3.0

และสามารถทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) จะเห็นได้ว่าพีคของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ที่ทำการเปรียบเทียบกับพีคต้นแบบ (XRD pattern) ที่  $2\theta$  พีคขึ้นที่ระยะ  $8.0^\circ$ ,  $9.0^\circ$ ,  $14.8^\circ$ ,  $22.9^\circ$ ,  $24.0^\circ$  และ  $29.8^\circ$  (Min Liu, Junhui Li, Wenzhi Jia, Mengjiao Qin, Yanan Wang, Kai Tong, Chen Huanhui และ Zhirong Zhu, 2015) และเมื่อทำการเติมโลหะ Ag, Zn, Fe และ Mo ลงในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 แสดงผลดังภาพประกอบ 28 และภาพประกอบ 29 ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบจากพีคต้นแบบ (XRD pattern) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการเติมโลหะพบว่า โลหะ Ag ที่  $2\theta$  พีคขึ้นที่ระยะ  $38.3^\circ$  และ  $44.2^\circ$  (Ming-Feng Hsieh, Yunwen Zhou, Hari Thirumalai, Lars C. Grabow, และ Jeffrey D. Rimer, 2017) โลหะ Fe พีคขึ้นที่ระยะ  $33.15^\circ$  และ  $35.65^\circ$  (Pasqualino Marturano, Lucie Drozdová, Andreas Kogelbauer, and Roel Prins, 2000) โลหะ Zn พีคขึ้นที่  $7.90^\circ$ ,  $8.80^\circ$  และ  $23.00^\circ$  (Xianhui Zhao, Lin Wei, Shouyun Cheng และ James Julson,) และโลหะ Mo พีคขึ้นที่ระยะ  $8.04^\circ$ ,  $9.04^\circ$  และ  $23.46^\circ$  (Zhe Li, Ke-Chang Xie, Wei Huang และ W. Reschetilowski, 2005)



ภาพประกอบ 28 การเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะ Ag, Zn, Fe และ Mo วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD



ภาพประกอบ 29 การเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะ Ag, Zn, Fe และ Mo วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

#### 4.2 ผลของการเติมโลหะลงในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของ ซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะ ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะอยู่ที่ 19.2: 1: 0 ตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/HZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะอยู่ที่ 9.2: 0.5: 1 ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/HZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะอยู่ที่ 48.2: 2.7: 1 ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/HZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะอยู่ที่ 35.7: 4.6: 1 ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะอยู่ที่ 17.5: 0.9: 1 ตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะอยู่ที่ 17.4 : 1: 0 ตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/NaZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะอยู่ที่ 10.1: 0.5: 1 ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะอยู่ที่ 43.9: 2.4:1 ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/NaZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะอยู่ที่ 93.2: 5.4: 1 และตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะอยู่ที่ 11.5: 0.7: 1 แสดงผลดังตารางที่ 8

จากการเติมโลหะเข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าโลหะ Mo เป็นโลหะที่มีปริมาณมากที่สุดในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยมีปริมาณอยู่ที่ 3.5% ตามมาด้วยโลหะ Ag, Zn, และ Fe โดยมีปริมาณอยู่ที่ 2, 0.6 และ 0.4% ตามลำดับ โดยมีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม ในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เท่ากับ 19.2: 1 และเมื่อทำการเติมโลหะแล้วพบว่าตัวเร่ง Mo/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Fe/HZSM-5 และ Ag/HZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะ เท่ากับ 9.24: 0.49: 1, 48.21: 2.66: 1, 35.73: 4.55: 1 และ 17.53: 0.93: 1 ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าโลหะ Mo มีปริมาณมากที่สุดในตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 โดยมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 3.5% ตามมาด้วยโลหะ Ag, Zn, และ Fe โดยมีปริมาณอยู่ที่ 3, 0.9 และ 0.4% ตามลำดับ โดยมีสัดส่วนของ ซิลิกอน: อะลูมิเนียม ในตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 เท่ากับ 17.36 : 1 และเมื่อทำการเติมโลหะแล้วพบว่าตัวเร่ง Mo/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5 และ Ag/NaZSM-5 มีสัดส่วนของซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะ เท่ากับ 10.11: 0.53: 1, 43.93: 2.44:1, 93.19: 5.35: 1 และ 11.5: 0.65: 1 ตามลำดับ

จากผลการเปรียบเทียบสัดส่วน ซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะ ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 พบว่าโลหะ Mo มีปริมาณมากที่สุดและโลหะ Fe มีปริมาณน้อยที่สุดในตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งโลหะแต่ละชนิดสามารถอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ได้โดยการแลกเปลี่ยนไอออนในรูปของสารละลาย  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{Zn(NO}_3)_2$ ,  $\text{Fe(NO}_3)_3$  และ  $\text{MoO}_3$  ที่อุณหภูมิห้อง (Rongrong Zhang, Zhengbao Wang, 2015) โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN), ค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (Electron affinity, EA), ศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Potential,  $E^0$ ), ค่าพลังงานไอออไนเซชัน (Ionization Energy, IE) และรัศมี

อะตอม พบว่าค่า IE มีความสัมพันธ์กับการแลกเปลี่ยนไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ส่วนค่า EN, EA,  $E^0$  และรัศมีอะตอมไม่มีความสัมพันธ์กับการแลกเปลี่ยนไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยา กล่าวคือธาตุที่มีค่า IE สูงจะสูญเสียอิเล็กตรอนได้ยาก แสดงว่า ธาตุที่มีค่า IE สูงกว่าจะสามารถดึงอิเล็กตรอนจากธาตุที่มีค่า IE น้อยกว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบโลหะทั้ง 4 ชนิด พบว่าโลหะ Zn มีค่า IE สูงที่สุดคือ 906.4 KJ/mol รองลงมาคือโลหะ Fe, Ag และ Mo โดยมีค่า IE อยู่ที่ 762.5, 731 และ 684.3 KJ/mol ตามลำดับ ทำการเปรียบเทียบค่า IE ของ H และ Na พบว่า H มีค่า IE ที่สูงโดยมีค่า IE อยู่ที่ 1312 KJ/mol ทำให้โลหะ Mo ซึ่งมีค่า IE น้อยที่สุดคือ 684.3 KJ/mol มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในรูปการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับ H รองลงมาคือโลหะ Ag, Fe และ Zn ตามลำดับ และ Na มีค่า IE ที่ต่ำโดยมีค่า IE อยู่ที่ 495.8 KJ/mol จึงทำให้โลหะ Zn ซึ่งมีค่า IE มากที่สุดคือ 906.4 KJ/mol มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในรูปการได้รับอิเล็กตรอนจาก Na รองลงมาคือโลหะ Fe, Ag และ Mo ตามลำดับ (Pannaporn Pintavirooj, Ponlakit Jitto และ Nida Chaimoon, 2017) แสดงผลดังตารางที่ 9

ดังนั้นโลหะที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในรูปการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับ H มากที่สุด ได้แก่ โลหะ Mo รองลงมาคือโลหะ Ag, Fe และ Zn ตามลำดับ และโลหะที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในรูปการได้รับอิเล็กตรอนจาก Na มากที่สุด ได้แก่ โลหะ Zn รองลงมาคือโลหะ Fe, Ag และ Mo ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถดีขึ้นได้เมื่อมีการแลกเปลี่ยนโลหะแทนซิซันในโครงสร้างซีโอไลต์ เช่น Fe, Cu, Mn และอื่น ๆ เช่น Ca, Ba ฯลฯ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีโครงสร้างและพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ มีความสามารถในการแปลงเป็นสารประกอบที่ซับซ้อน ซีโอไลต์มีประจุเป็นลบเนื่องจากมีการแทนที่ Si โดย Al ในรูปทรง 4 หน้า กล่าวคือสัดส่วนของ Si/Al เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของซีโอไลต์ เช่น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์อย่างหลวมๆจะแลกเปลี่ยนกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ ไอออนของโลหะจะทำให้ประจุลบของซีโอไลต์มีค่าเป็นเป็นกลาง (Arun Kumar Kondru, Pradeep Kumar, Shri Chand, 2009)

พูน ปณ จิตโต ชีเว

**ตารางที่ 8** การเปรียบเทียบสัดส่วน ซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะเงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และโมลิบดีนัม (Mo)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณซิลิกอน (%)	ปริมาณอะลูมิเนียม (%)	ปริมาณโลหะ (%)	สัดส่วนของ ซิลิกอน: อะลูมิเนียม: โลหะ
HZSM-5	40.3	2.1	-	19.2: 1: 0
Mo/HZSM-5	32.5	1.7	3.5	9.2: 0.5: 1
Zn/HZSM-5	29.9	1.7	0.6	48.2: 2.7: 1
Fe/HZSM-5	34.3	1.8	0.4	35.7: 4.6: 1
Ag/HZSM-5	34.5	1.8	2.0	17.5: 0.9: 1
NaZSM-5	36.6	2.1	-	17.4: 1: 0
Mo/NaZSM-5	35.4	1.8	3.5	10.1: 0.5: 1
Zn/NaZSM-5	39.5	2.2	0.9	43.9: 2.4: 1
Fe/NaZSM-5	34.5	2.0	0.4	93.2: 5.4: 1
Ag/NaZSM-5	34.1	1.9	3.0	11.5: 0.7: 1

**ตารางที่ 9** คุณสมบัติของค่า EN, EA,  $E^0$ , IE และรัศมีอะตอม ของ H, Na, Mo, Ag, Fe, และ Zn

ธาตุ	ค่า En	ค่า EA (KJ/mol)	ค่า $E^0$ (V)	ค่า IE (KJ/mol)	รัศมีอะตอม (pm)
Mo	2.2	72	-0.2	684.3	190
Ag	1.9	126	0.8	731	165
Fe	1.8	15	-0.4	762.5	156
Zn	1.7	0	-0.8	906.4	142
H	2.2	73	0	1312	53
Na	0.9	53	-2.7	495.8	190

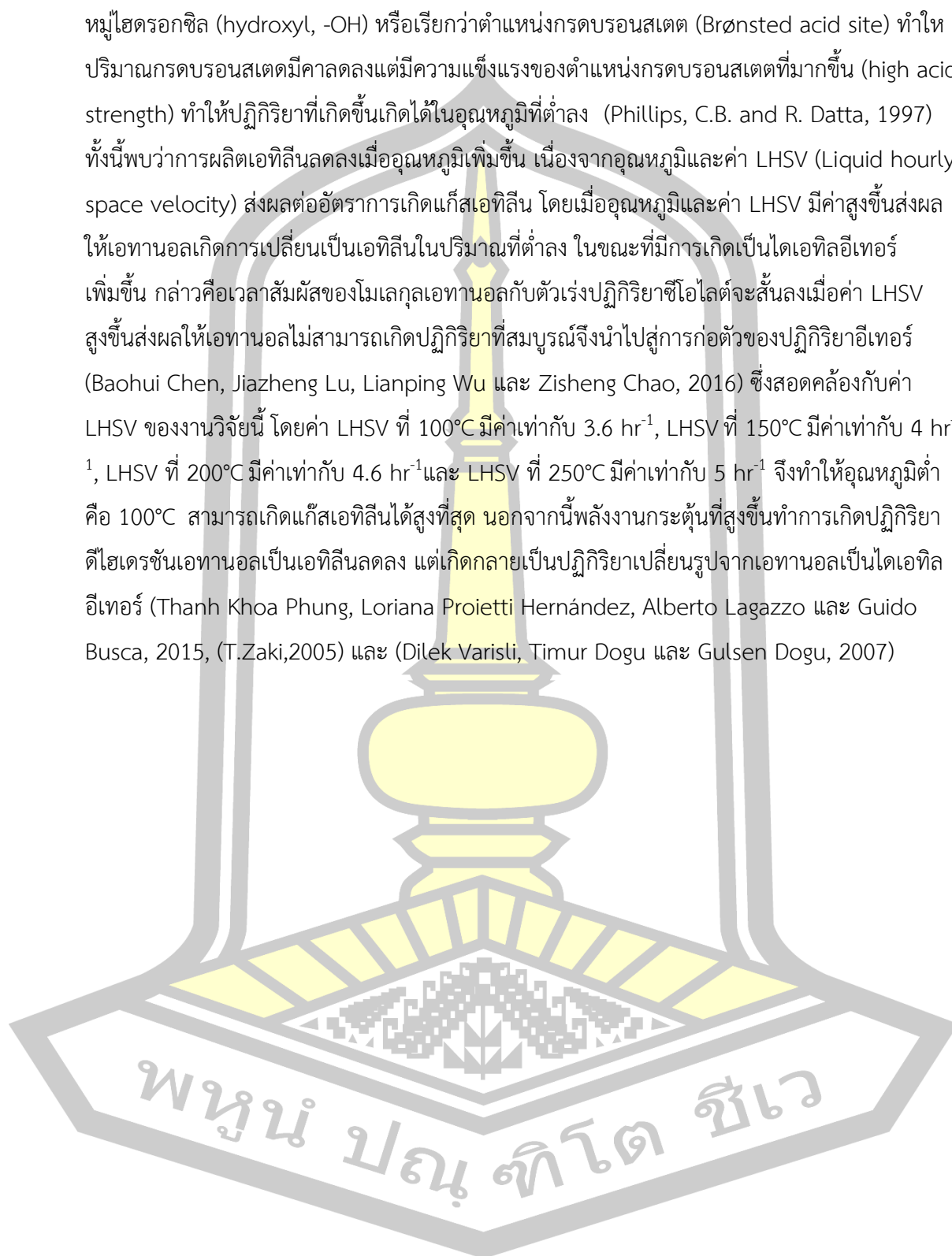
ที่มา: Pannaporn Pintavirooj, Ponlakit Jitto และ Nida Chaimoon, 2017

#### 4.3 ศึกษาปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา

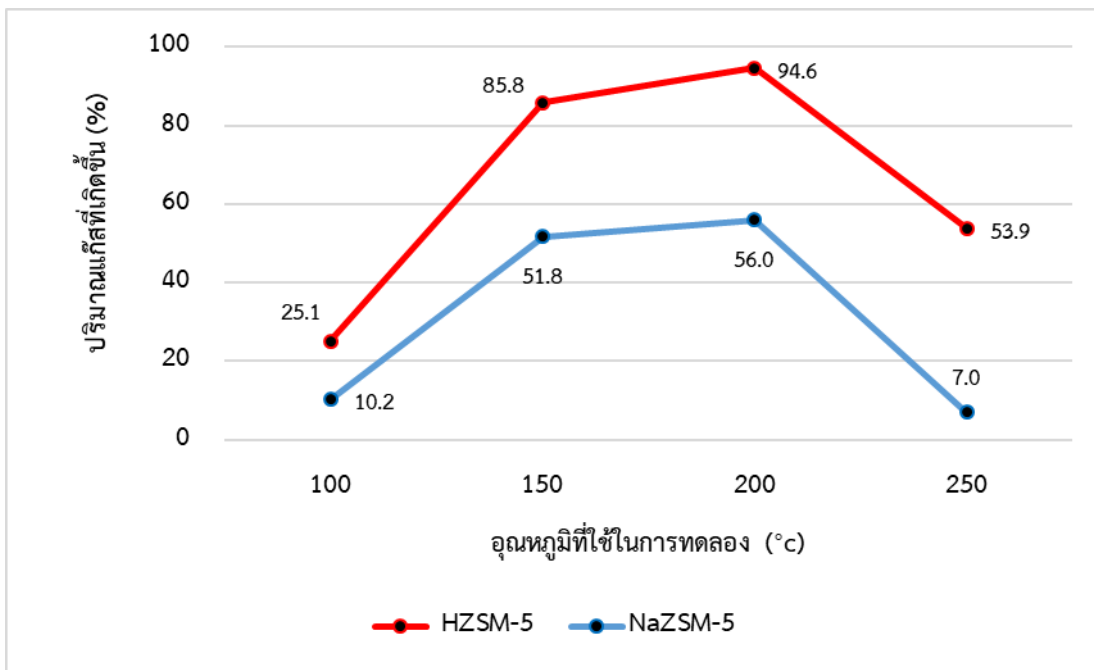
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ HZSM-5, Ag/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Fe/HZSM-5, Mo/HZSM-5, NaZSM-5, Ag/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5 และ Mo/NaZSM-5 และอุณหภูมิที่ใช้อยู่ที่ 100, 150, 200 และ 250°C ที่อุณหภูมิ 100°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 25.1% ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Fe/HZSM-5, และ Mo/HZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 24.8, 41.6, 32.5 และ 23.9% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 150°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 85.8% ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Fe/HZSM-5 และ Mo/HZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 22.2, 26.6, 21.9 และ 20% ตามลำดับที่อุณหภูมิ 200°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 94.6% ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Fe/HZSM-5 และ Mo/HZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 19.5, 23.1, 20.9 และ 17.8% ตามลำดับและที่อุณหภูมิ 250°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 53.9% ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Fe/HZSM-5 และ Mo/HZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 20.1, 22.9, 18.1 และ 17.3% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 100°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 10.2% ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5, และ Mo/NaZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 36.4, 56.8, 56.0 และ 23.4% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 150°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 51.8% ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5 และ Mo/NaZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 15.1, 39.2, 38.7 และ 18.2% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 200°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 56.0% ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5 และ Mo/NaZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 15.3, 16.9, 24.9 และ 16.4% ตามลำดับและที่อุณหภูมิ 250°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 7% ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5, และ Mo/NaZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 8.1, 9.5, 8.7 และ 8.5% ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 30 31 และ 32 แสดงผล

ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลเป็นเอทิลีนของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 คือ 100°C โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 56.8% รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/NaZSM-5, Zn/HZSM-5, Ag/NaZSM-5, Fe/HZSM-5 Ag/HZSM-5, Mo/HZSM-5 และ Mo/NaZSM-5 มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น 56, 41.6, 36.4, 32.5, 24.8, 23.9 และ 23.4% ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะ Zn และ Fe ทำให้อุณหภูมิที่ผลิตเอทิลีนได้สูงสุดลดลงจาก 200°C เป็น 100°C ทั้งนี้โลหะจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนที่ตำแหน่งกรดบนซีโอไลต์ คือ ตำแหน่งของ

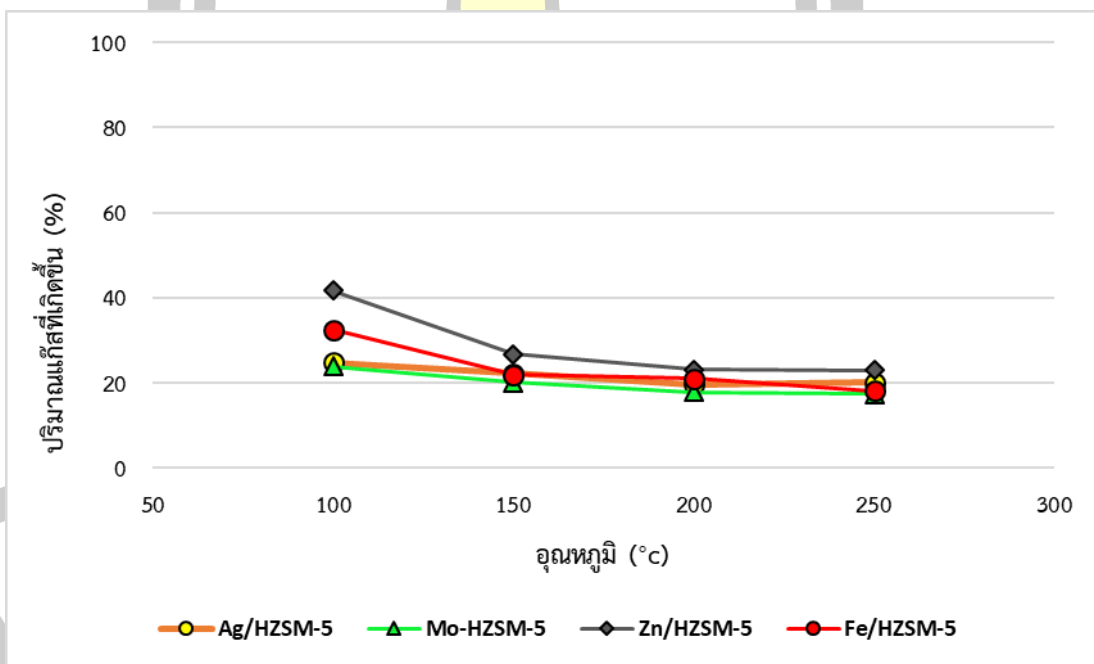
หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl, -OH) หรือเรียกว่าตำแหน่งกรดบรอนสเตด (Brønsted acid site) ทำให้ปริมาณกรดบรอนสเตดมีคาลดลงแต่มีความแข็งแรงของตำแหน่งกรดบรอนสเตดที่มากขึ้น (high acid strength) ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดได้ในอุณหภูมิที่ต่ำลง (Phillips, C.B. and R. Datta, 1997) ทั้งนี้พบว่าการผลิตเอทิลีนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิและค่า LHSV (Liquid hourly space velocity) ส่งผลต่ออัตราการเกิดแก๊สเอทิลีน โดยเมื่ออุณหภูมิและค่า LHSV มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้เอทานอลเกิดการเปลี่ยนเป็นเอทิลีนในปริมาณที่ต่ำลง ในขณะที่มีการเกิดเป็นไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้น กล่าวคือเวลาสัมผัสของโมเลกุลเอทานอลกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์จะสั้นลงเมื่อค่า LHSV สูงขึ้นส่งผลให้เอทานอลไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์จึงนำไปสู่การก่อตัวของปฏิกิริยาอีเทอร์ (Baohui Chen, Jiazheng Lu, Lianping Wu และ Zisheng Chao, 2016) ซึ่งสอดคล้องกับค่า LHSV ของงานวิจัยนี้ โดยค่า LHSV ที่ 100°C มีค่าเท่ากับ 3.6 hr<sup>-1</sup>, LHSV ที่ 150°C มีค่าเท่ากับ 4 hr<sup>-1</sup>, LHSV ที่ 200°C มีค่าเท่ากับ 4.6 hr<sup>-1</sup> และ LHSV ที่ 250°C มีค่าเท่ากับ 5 hr<sup>-1</sup> จึงทำให้อุณหภูมิต่ำคือ 100°C สามารถเกิดแก๊สเอทิลีนได้สูงที่สุด นอกจากนี้พลังงานกระตุ้นที่สูงขึ้นทำการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเอทานอลเป็นเอทิลีนลดลง แต่เกิดกลายเป็นปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปจากเอทานอลเป็นไดเอทิลอีเทอร์ (Thanh Khoa Phung, Lorian Proietti Hernández, Alberto Lagazzo และ Guido Busca, 2015, (T.Zaki,2005) และ (Dilek Varisli, Timur Dogu และ Gulsen Dogu, 2007)



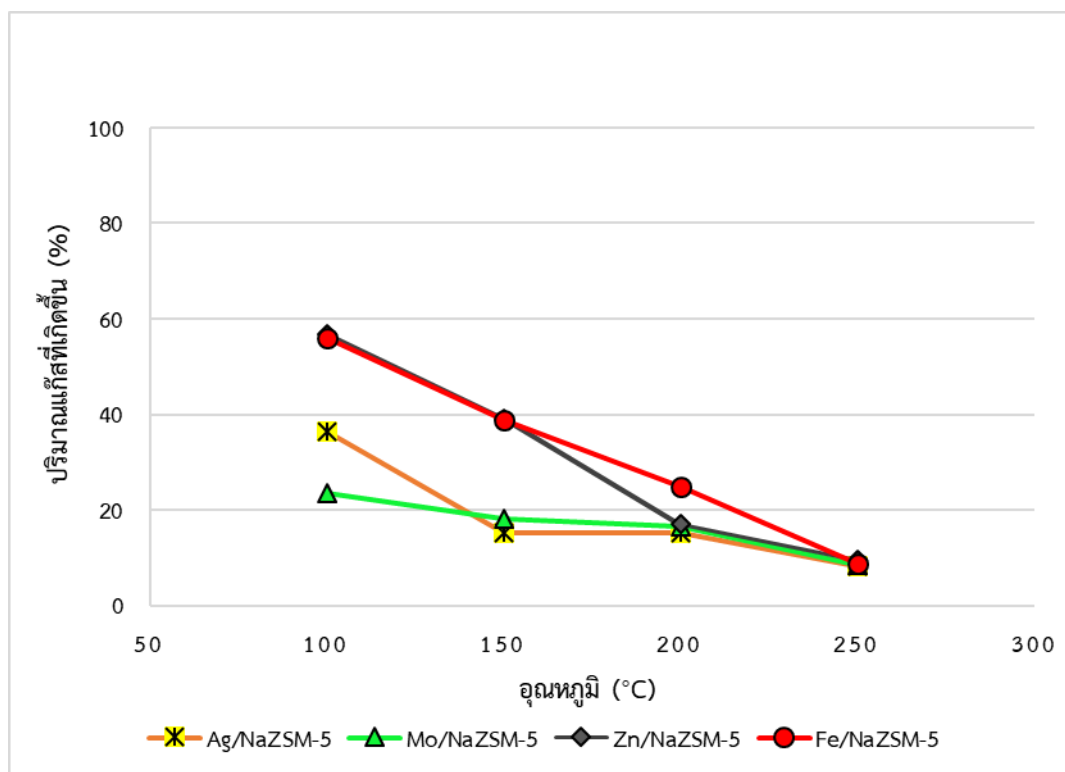




ภาพประกอบ 30 ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 และ NaZSM-5



ภาพประกอบ 31 ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะ Ag, Mo, Zn และ Fe



ภาพประกอบ 32 ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด NaZSM-5 ที่ทำการเติมโลหะ Ag, Mo, Zn และ Fe

#### 4.4 ศึกษาชนิดของแก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา

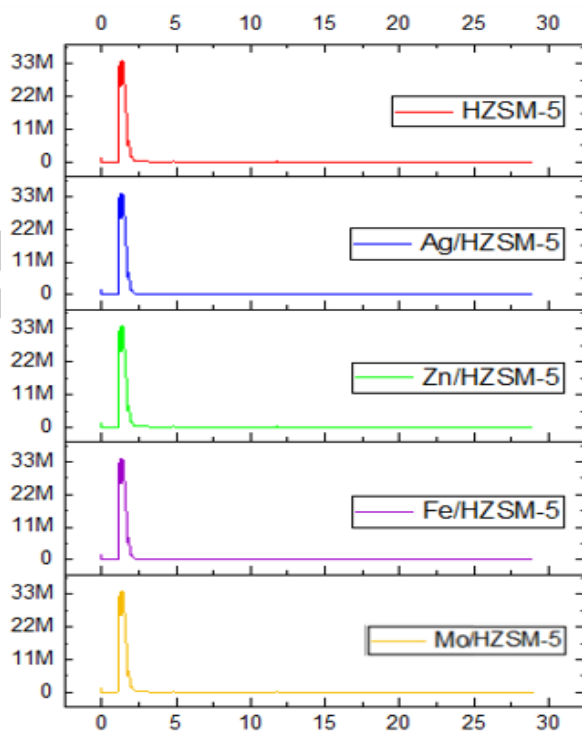
ทำการตรวจวัดแก๊สที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดีไฮเดรชันของเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 95.9% มีกรดพาลิก (1,2 Benzenedicarboxylic acid) 0.3% มีกรดปาลมิติก (n-Hexadecanoic acid) อยู่ที่ 2.3% และ 0.9% และมีกรดสเตียริก (Octadecanoic acid) อยู่ที่ 0.6% ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 93.9% มีโพรพานอลอยู่ที่ 0.1% มีเมทานอลอยู่ที่ 6% ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/HZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 100% ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/HZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 99.9% โพรพานอลอยู่ที่ 0.1% ตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/HZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 94.1% มีเมทานอลอยู่ที่ 5.9% มีไอโซโพรพานอลอยู่ที่ 0.01% ตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 91.1% มีกรดพาลิกอยู่ที่ 0.6% มีกรดปาลมิติกอยู่ที่ 5.6 และ 1.5% และมีกรดสเตียริกอยู่ที่ 1.2% ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 100% ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 100% ตัวเร่งปฏิกิริยา

Fe/NaZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 100% ตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/NaZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 94.4% และมีเมทานอลอยู่ที่ 5.6% สามารถแสดงพีคของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลเป็นเอทิลีน แสดงดังภาพประกอบ 33 และ 34 และ แสดงผลดังตารางที่ 10

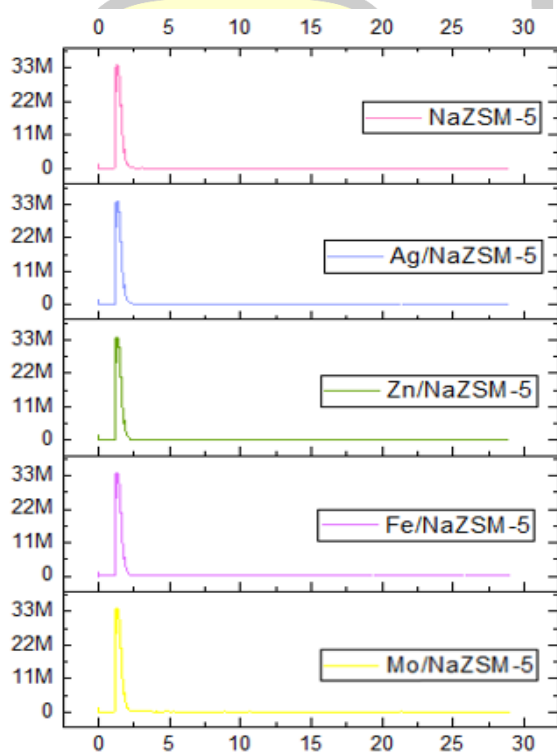
**ตารางที่ 10** แก๊สที่เกิดจากกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	เอทิลีน (%)	กรด พหาลิค (%)	กรด ปาลมิติก (%)	กรด สเตียริก (%)	โพรพานอล (%)	เมทานอล (%)	ไอโซโพรพานอล (%)
HZSM-5	95.9	0.3	2.3 / 0.9	0.6	-	-	-
Ag/HZSM-5	93.9	-	-	-	0.1	6	-
Zn/HZSM-5	100	-	-	-	-	-	-
Fe/HZSM-5	99.9	-	-	-	0.1	-	-
Mo/HZSM-5	94.0	-	-	-	-	5.9	0.01
NaZSM-5	91.1	0.6	5.6 / 1.5	1.2	-	-	-
Ag/NaZSM-5	100	-	-	-	-	-	-
Zn/NaZSM-5	100	-	-	-	-	-	-
Fe/NaZSM-5	100	-	-	-	-	-	-
Mo/NaZSM-5	94.4	-	-	-	-	5.6	-

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



ภาพประกอบ 33 พีคที่เกิดขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 HZSM-5, Ag/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Fe/HZSM-5 และ Mo/HZSM-5

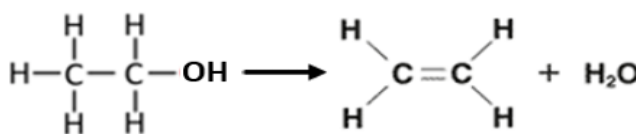


ภาพประกอบ 34 พีคที่เกิดขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5, Ag/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5 และ Mo/NaZSM-5

จากกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หลายชนิดได้แก่ เอทิลีน กรดพธาลิก กรดพาลมติก กรดสเตียริก โพรพานอล เมทานอล และไอโซโพรพานอล โดยผลิตภัณฑ์ดังกล่าวข้างต้นเกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของเอทานอล แสดงดังต่อไปนี้

#### 4.4.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอทานอลเป็นเอทิลีน

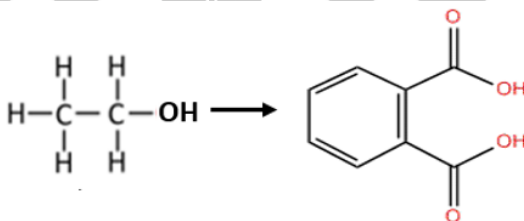
การเปลี่ยนเอทานอลให้เป็นเอทิลีนด้วยกระบวนการดีไฮเดรชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic dehydration) ปฏิกิริยา Dehydration เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic) โดยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตเอทานอลได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความดัน อุณหภูมิและการเจือจางเอทานอลด้วยไอน้ำ กระบวนการแปลงเอทานอลสามารถควบคุมด้วยพื้นผิวในการเกิดปฏิกิริยา การแพร่ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ภายในตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นเอทิลีน อาศัยปฏิกิริยาการกำจัดน้ำ (dehydration reaction) ยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) เชื่อมโดยพันธะคู่ (double bond) (สถาบันพลาสติก, 2015) โดยสูตรโครงสร้างของเอทานอลคือ  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  และสูตรโครงสร้างของเอทิลีนคือ  $\text{C}_2\text{H}_4$  แสดงดังภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นเอทิลีน

#### 4.4.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอทานอลเป็นกรดพธาลิก

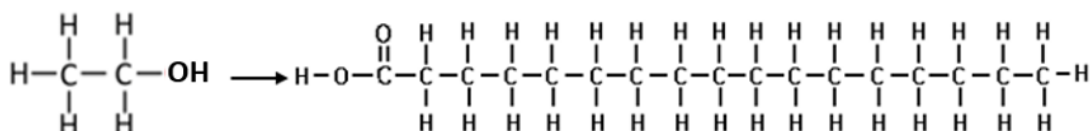
กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดพธาลิก อาศัยปฏิกิริยาการเกิดวงแหวน (cyclization) โดยสูตรโครงสร้างของเอทานอลคือ  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  และสูตรโครงสร้างของกรดพธาลิกคือ  $\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_4$  แสดงดังภาพประกอบ 36



ภาพประกอบ 36 กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดพธาลิก

#### 4.4.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอทานอลเป็นกรดปาล์มติก

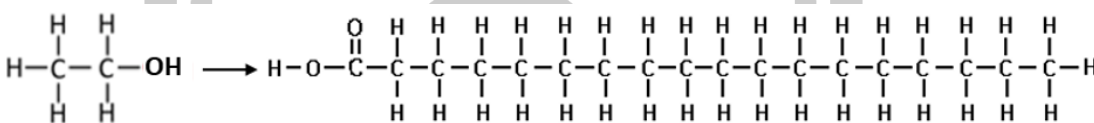
กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดปาล์มติก อาศัยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization reaction) โดยสูตรโครงสร้างของเอทานอลคือ  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  และสูตรโครงสร้างของกรดปาล์มติกคือ  $\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$  แสดงดังภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดปาล์มติก

#### 4.4.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอทานอลเป็นกรดสเตียริก

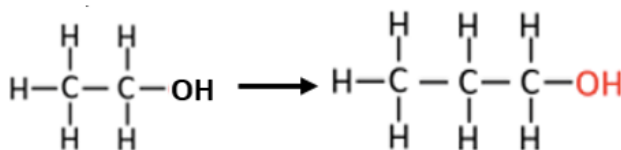
กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดสเตียริก อาศัยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization reaction) โดยสูตรโครงสร้างของเอทานอลคือ  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  และสูตรโครงสร้างของกรดปาล์มติกคือ  $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$  แสดงดังภาพประกอบ 38



ภาพประกอบ 38 กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดสเตียริก

#### 4.4.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอทานอลเป็นโพรพานอล

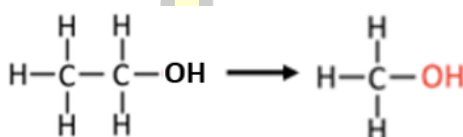
เอทานอลมีอะตอมของคาร์บอน 2 อะตอม ถูกยึดกับอะตอมของไฮโดรเจนและกลุ่มแอลกอฮอล์ การเพิ่มอะตอมของคาร์บอนจะทำให้เกิดโพรพานอล อาศัยปฏิกิริยาการเติมหมู่แอลเคน โดยยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) เชื่อมโดยพันธะเดี่ยว (single bond) โดยสูตรโครงสร้างของเอทานอลคือ  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  และสูตรโครงสร้างของโพรพานอลคือ  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$  แสดงดังภาพประกอบ 39



ภาพประกอบ 39 กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นโพรพานอล

#### 4.4.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอทานอลเป็นเมทานอล

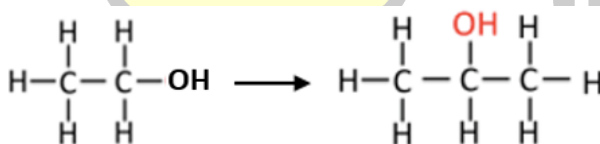
เอทานอลมีอะตอมของคาร์บอน 2 อะตอมถูกยึดกับอะตอมของไฮโดรเจนและกลุ่มแอลกอฮอล์ การกำจัดคาร์บอนหนึ่งออกจากเอทานอลทำให้เกิดเมทานอล อาศัยปฏิกิริยารีดักชัน ยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) เชื่อมโดยพันธะเดี่ยว (single bond) โดยสูตรโครงสร้างของเอทานอลคือ  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  และสูตรโครงสร้างของโพรพานอลคือ  $\text{CH}_4\text{O}$  แสดงดังภาพประกอบ 40



ภาพประกอบ 40 กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นเมทานอล

#### 4.4.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอทานอลเป็นไอโซโพรพานอล

กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นไอโซโพรพานอล อาศัยปฏิกิริยาเติมหมู่แอลเคน ยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) เชื่อมโดยพันธะเดี่ยว (single bond) โดยสูตรโครงสร้างของเอทานอลคือ  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  และสูตรโครงสร้างของไอโซโพรพานอล คือ  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$  แสดงดังภาพประกอบ 41



ภาพประกอบ 41 กระบวนการเปลี่ยนเอทานอลเป็นไอโซโพรพานอล

พหุ ประถม วิชา

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ปริมาณของโลหะ เงิน (Ag), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe) และ โมลิบดีนัม (Mo) ที่เติมลงในตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณโลหะที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/HZSM-5 มีปริมาณโลหะมากที่สุดคือ 3.5% รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5, Zn/HZSM-5 และ Fe/HZSM-5 โดยมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 0.6, 0.4 และ 2.0% ตามลำดับและปริมาณโลหะที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/NaZSM-5 มีปริมาณโลหะมากที่สุดคือ 3.5% รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5, Zn/NaZSM-5 และ Fe/NaZSM-5 โดยมีปริมาณโลหะอยู่ที่ 3.0, 0.9 และ 0.4% ตามลำดับ

5.1.2 ผลของปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C

ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลเป็นโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ NaZSM-5 เนื่องจากมีการเกิดแก๊สในปริมาณที่สูงที่สุด เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีการเกิดแก๊สรวมอยู่ที่ 94.64% และ ตัวเร่งปฏิกิริยา NAZSM-5 มีการเกิดแก๊สรวมอยู่ที่ 56% และเมื่อทำการเติมโลหะ Ag, Zn, Fe และ Mo เข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลเป็นเอทิลีนของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 คือ 100°C เนื่องจากมีการเกิดแก๊สมากกว่าอุณหภูมิ 150, 200 และ 250°C ที่อุณหภูมิ 100°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/HZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สมากที่สุดคือ 41.6% รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/HZSM-5, Ag/HZSM-5 และ Mo/HZSM-5 โดยมีอัตราการเกิดแก๊สอยู่ที่ 32.5, 24.8 และ 23.9% ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลเป็นเอทิลีนของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด NaZSM-5 คือ 100°C เนื่องจากมีการเกิดแก๊สมากกว่าอุณหภูมิ 150, 200 และ 250°C ที่อุณหภูมิ 100°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สมากที่สุดคือ 56.8% รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/NaZSM-5, Ag/NaZSM-5 และ Mo/NaZSM-5 โดยมีอัตราการเกิดแก๊สอยู่ที่ 56, 36.4 และ 23.4% ตามลำดับ

5.1.3 การเกิดแก๊สของปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการเติมโลหะ

ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 ที่อุณหภูมิ 200°C ซึ่งมีอัตราการเกิดแก๊สเยอะที่สุดดังแสดงผลดังภาพประกอบที่ 30 เมื่อนำแก๊สที่เกิดขึ้นไปวัดด้วยเครื่อง GC-MS



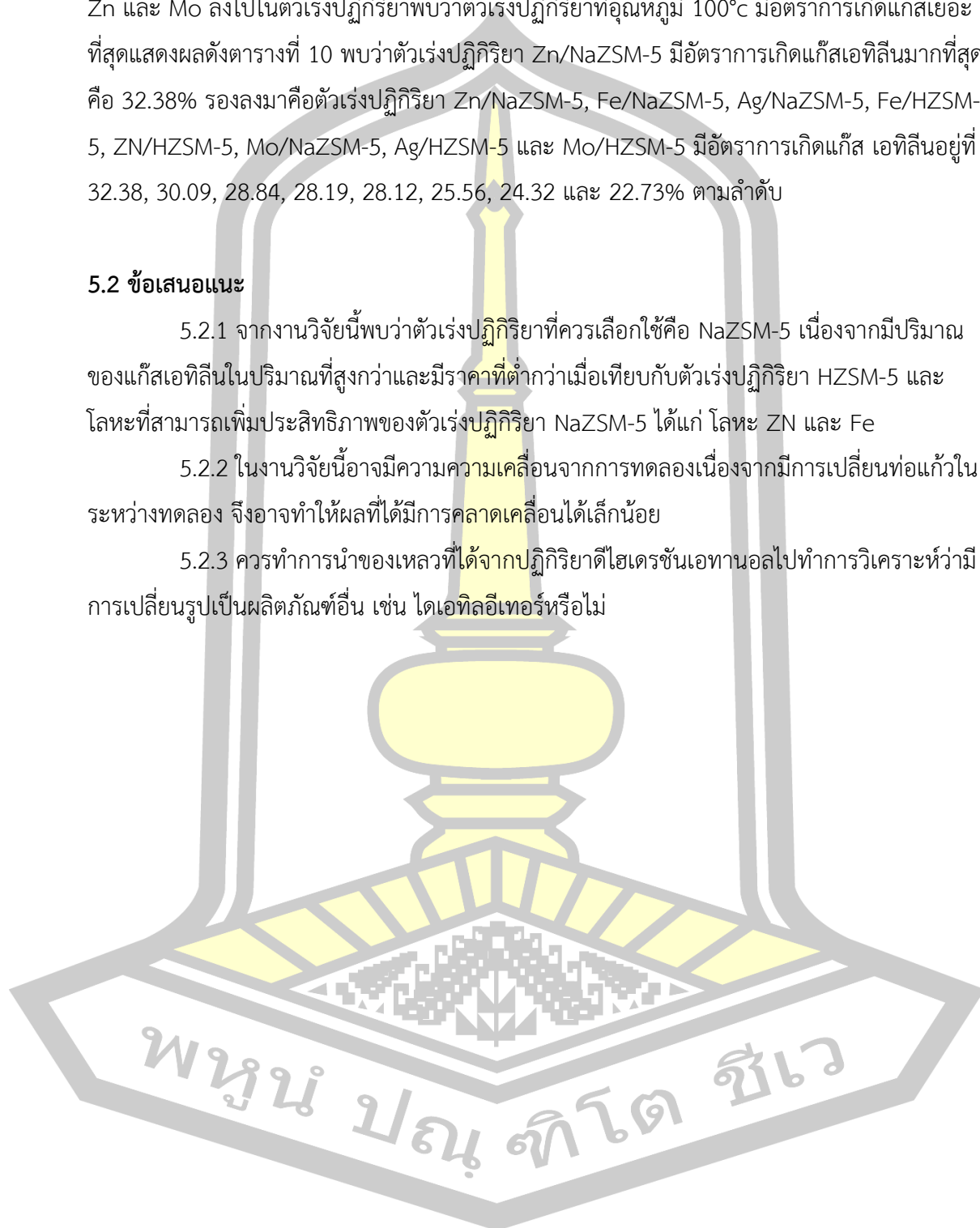
พบว่าเมื่ออัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 32.03 และ 33.6% ตามลำดับ เมื่อทำการเติมโลหะ Ag, Fe, Zn และ Mo ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100°C มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนสูงสุดแสดงผลดังตารางที่ 10 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนมากที่สุดคือ 32.38% รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5, Ag/NaZSM-5, Fe/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Mo/NaZSM-5, Ag/HZSM-5 และ Mo/HZSM-5 มีอัตราการเกิดแก๊สเอทิลีนอยู่ที่ 32.38, 30.09, 28.84, 28.19, 28.12, 25.56, 24.32 และ 22.73% ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากงานวิจัยนี้พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ควรเลือกใช้คือ NaZSM-5 เนื่องจากมีปริมาณของแก๊สเอทิลีนในปริมาณที่สูงกว่าและมีราคาต่ำกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และโลหะที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 ได้แก่ โลหะ Zn และ Fe

5.2.2 ในงานวิจัยนี้อาจมีความความคลื่อนจากการทดลองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงท่อแก้วในระหว่างทดลอง จึงอาจทำให้ผลที่ได้มีการคลาดเคลื่อนได้เล็กน้อย

5.2.3 ควรทำการนำของเหลวที่ได้จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเอทานอลไปทำการวิเคราะห์หาว่าการเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น เช่น ไดเอทิลอีเทอร์หรือไม่



บรรณานุกรม



## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2549. การนำของเสียจากการผลิตเอทานอลมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า. กรุงเทพฯ: สถาบันคนคว่าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คุณिता ทองน้อย. 2552. “แกซีพีเคชันของพลาสติกโดยใช้ไฟโรไลซ์ซาร์จากชีวมวล.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จตุพร วิทยาคุณ. 2547. การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์. 2547. “การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาศาสตร์สภาวะแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชญาณิศา เมฆพัฒน์. 2555. “Ethylene Glycol.”  
[http://www.summacheeva.org/index\\_thaitox\\_ethylene\\_glycol.htm](http://www.summacheeva.org/index_thaitox_ethylene_glycol.htm).
- ชุติมณห์ รัตนบัณฑิตสกุล. 2552. “เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐกฤตต์ เพชรนะ. 2554. “ไบโอแก๊สโซลีนจากกระบวนการคละตะไคติกแครกกิงของน้ำมันปาล์มรีไฟน์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ณัฐพงศ์ อรรถนิตย์, ปริญญา เดชโฮม และอภิญา สายันเกษ. 2549. “การผลิตซิลิกาเจลจากซีเถ้าขานอ้อย.” ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ดีไลท์อินเตอร์เนชั่นแนล (HK) จำกัด. “หลอดเก็บตัวอย่างเลือดสุญญากาศหลอดเลือดแดงเลือดแดงสำหรับการตรวจเลือดทางคลินิก.” <http://thai.bymedical.net/sale-10077803-vacuum-blood-sample-collection-tubes-red-top-blood-tube-for-clinical-blood-testing.html>.
- ทวารัฐ สุตะบุตร. 2555. นโยบายและแนวโน้มนวัตกรรมพลังงานทดแทนในอนาคต, 26 ตุลาคม 2555 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

- นิติกุล บุญมาก, วรเดช พลเดชชัญญา สุขพะณา และ จิรภา รัตนรักษ์. “สารประกอบแอลกอฮอล์ ฟีนอล และอีเทอร์.” <https://sites.google.com/site/khemuxinthryim61/sarprakxb-xaelkxhxl-fi-nxl-laea-xithexr>.
- บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด. 2557. “Acetic Acid, กรดอะซิติก.” <http://thaipolychemicals.blogspot.com/2014/01/acetic-acid.html>.
- บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน). 2555. “โรงกลั่น บางจากปิโตรเลียม.” <http://www.manuallock.com/index.php/component/content/article/41-front-page-/182-2012-07-06-18-13-37>.
- พงษ์ศักดิ์ พวงเพชร. 2560. “ทฤษฎีกรด-เบสของอาร์เรเนียส.” [http://chemistyr3.blogspot.com/2017/03/blog-post\\_10.html](http://chemistyr3.blogspot.com/2017/03/blog-post_10.html).
- พิชร์ณัฐ เสวตรัตน์. 2552. “ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์. 2556ก. “High Density Polyethylene (HDPE) / พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง.” <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1909/high-density-polyethylene-hdpe-พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง>.
- . 2556ข. “Low Density Polyethylene (LDPE) / พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.” <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1586/low-density-polyethylene-ldpe-พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ>.
- . 2556ค. “Polyvinylchloride (PVC) / พอลิไวนิลคลอไรด์.” <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1897/pvc-polyvinylchloride>.
- . 2561ก. “Palmitic Acid / กรดปาล์มิติก.” <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2038/palmitic-acid>.
- . 2561ข. “Stearic Acid / กรดสเตียริก.” <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1644/stearic-acid-กรดสเตียริก>.
- เมตตา เจริญพานิช วุฒิชัย ไข่เทียมวงศ์ และ อาสา ชินธรรมมิตร. 2541. “การพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5.”, 3-5 กุมภาพันธ์ 2541 ณ กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วัลย์พร मुखสุวรรณ. 2551ก. “พลาสติกในชีวิตประจำวัน : ตอนที่ 2 โพลีไวนิลคลอไรด์.”

<http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=12>.

———. 2551ข. “พลาสติกในชีวิตประจำวัน : ตอนที่ 4 โพลีเอทิลีน.”

<http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4%0A%09&ID=14%0A>.

วัชรกรรณ์ ปราณี. 2550. “การสังเคราะห์เอทิลีนจาก เอทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟต.”

วิศวกรรมลาดกระบัง 24(2): 19-24.

วิมลรัตน์ ตระการพฤษ และ และ ศรินภา อารีนามนารถ. 2553. “ดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็น เอทิลีนด้วยมอร์ดีไนท์ที่มี Mn และ Ni.” วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร 4(2) : 86–96.

ศิรินุช ลอยหา. 2556. “ซีโอไลต์และเทคโนโลยีซีโอไลต์. Zeolite and Zeolite Technology.”

วารสารวิทยาศาสตร์ มช 41(1): 56–66.

สกานต์ เหลืองเกรียงไกร. 2554. “การวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลในน้ำหมักด้วยเทคนิคสเปก-แก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้สารมาตรฐานภายใน” *การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 8 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน*.

สถาบันบำราศนราดูร. 2557. “รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะวัสดุวิทยาศาสตร์และการแพทย์ จำนวน 10 รายการ.” <http://bamras.ddc.moph.go.th/userfiles/Spec tube.pdf>.

สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. 2554. *สารานุกรมเปิดโลกปิโตรเคมี : Petrochemical Encyclopedia*. กรุงเทพฯ: บริษัท ดับบลิวพีเอส (ประเทศไทย) จำกัด.

สถาบันพลาสติก. 2015. “พลาสติกชีวภาพพอลิเอทิลีน (BIO-POLYETHYLENE : BIO-P.”

<http://asp.plastics.or.th:8001/ArticleKnowledgeListDetail.aspx?id=1>.

สมเนตร จันทวิชชประภา. 2554. “การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด.” In ed. การประชุมวิชาการสภาวะโลกร้อน: ความหลากหลายทางชีวภาพและการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2555. “อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมพลาสติก.”

กรุงเทพฯ: บริษัท วงศ์สว่างพับลิชชิง แอนด์พริ้นติ้ง จำกัด.

สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์และ นายเดโช ขุนนคร. 2553. “เอทานอล : พลังงานทดแทน วิถีพอเพียง.”

[http://www.csr.chula.ac.th/sufficiency\\_economy/images/stories/file/article\\_sujita.pdf](http://www.csr.chula.ac.th/sufficiency_economy/images/stories/file/article_sujita.pdf).

สุรางคณา หัตถ์. 2546. “การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนระบบตัวเร่งปฏิกิริยาแกมมาอะลูมินา.” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*.

อุณาโลม เวทย์วิวัฒน์. 2545. “การผลิตเอทิลีนจากเอทานอลบนซีโอไลต์ ZSM-5 ชนิดดัดแปลง.”

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

AXT PTY LTD. 2014. “X-Ray Diffraction for Materials Science.”

<http://www.axt.com.au/x-ray-diffraction-for-materials-science/>.

Aysegul Ciftci, Dilek Varisli, Kenan Cem Tokay, N. Aslı Sezgi, and Timur Dogu. 2012.

“Dimethyl Ether, Diethyl Ether & Ethylene from Alcohols over  
Tungstophosphoric Acid Based Mesoporous Catalysts.” *Chemical Engineering  
Journal* 207–208(1): 85–93.

Baker Ross. 2016. “Mini Washable PVA Glue.” <https://www.bakerross.co.uk/mini-washable-pva-glue>.

Baohui Chen, Jiazheng Lu, Lianping Wu และ Zisheng Chao. 2016. “Dehydration of Bio-  
ethanol to Ethylene over Iron Exchanged HZSM-5.” *Chinese Journal of Catalysis*  
37: 1941–1948.

Charles N. Satterfield. 1991. *Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice: Physical &  
Theoretical*. New York: Mcgraw-Hill.

Chemical Education Digital Library. 2014. “Textbook-Integrated Guide to Educational  
Resources.”

[http://www.chemeddl.org/alfresco/service/org/chemeddl/ttoc/ttoc\\_results?id=20942&num\\_results=3&guest=true](http://www.chemeddl.org/alfresco/service/org/chemeddl/ttoc/ttoc_results?id=20942&num_results=3&guest=true).

Chiyoda Corporation. 2014. “Ethylene Derivatives.” <https://www.chiyoda-corp.com/technology/en/chemistry/ethylene.html>.

Claudio J. A. Mota and Nilton Rosenbach Jr. 2011. “Carbocations on Zeolites. Quo  
Vadis?” *Journal of the Brazilian Chemical Society* 22: 1197–1205.

Colin S. Cundy and Paul A. Cox. 2005. “The Hydrothermal Synthesis of Zeolites:  
Precursors, Intermediates and Reaction Mechanism.” *Microporous and  
Mesoporous Materials* 82: 1–78.

Denise Fan Der-Jong Dai and Ho-Shing Wu. 2012. “Ethylene Formation by Catalytic  
Dehydration of Ethanol with Industrial Considerations.” *Materials* 6(1): 101–115.

- Dilek Varisli, Timur Dogu, Gulsen Dogu. 2007. "Ethylene and Diethyl-Ether Production by Dehydration Reaction of Ethanol over Different Heteropolyacid Catalysis." *Chemical Engineering Science* 62(18–20): 5349–52.
- Dr. Michael Fox. 2017. "Ethylene Explosion." <http://chemaxx.com/explosion17b.htm>.
- Guangwen Chen , Shulian Li, Fengjun Jiao, Quan Yuan. 2007. "Catalytic Dehydration of Bioethanol to Ethylene over TiO<sub>2</sub>/g-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts in Microchannel Reactors." *Catalysis Today*: 111–119.
- Harold H. Schobert. 1990. *The Chemistry of Hydrocarbon Fuels*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- J. Bussi ,S. Parodi, Bruno Irigaray and R. Kieffer. 1998. "Catalytic Transformation of Ethanol into Acetone Using Copper–pyrochlore Catalysts." *Applied Catalysis A General* 172(1): 117–29.
- J. Haber , Katarzyna Pamin , L. Matachowski, B. Napruszewska and J. Poltowicz. 2002. "Potassium and Silver Salts of Tungstophosphoric Acid as Catalysts in Dehydration of Ethanol and Hydration of Ethylene." *Journal of Catalysis* 207(2): 296–306.
- J.I. Di Cosimo, V.K. Díez, M. Xu, E. Iglesia and C.R. Apesteguía. 1998. "Structure and Surface and Catalytic Properties of Mg–Al Basic Oxides." *Journal of Catalysis* 178(2): 499–510.
- Jacek Gurgul , Malgorzata Zimowska , D. Mucha, Robert P. Socha and L. Matachowski. 2011. "The Influence of Surface Composition of Ag<sub>3</sub>PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub> and Ag<sub>3</sub>PMo<sub>12</sub>O<sub>40</sub> Salts on Their Catalytic Activity in Dehydration of Ethanol." *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 351: 1–10.
- Jiandong Bi , Xinwen Guo, Min Liu, Xiangsheng Wang. 2010. "High Effective Dehydration of Bio-Ethanol into Ethylene over Nanoscale HZSM-5 Zeolite Catalysts." *Catalysis Today*: 143–47.
- John Mckie. 2002. "PVC Products." <http://www.johnmckie.com/pvc.htm>.
- Kondru, Arun Kumar, Pradeep Kumar, and Shri Chand. 2009. "Catalytic Wet Peroxide Oxidation of Azo Dye (Congo Red) Using Modified Y Zeolite as Catalyst." *Journal of Hazardous Materials* 166: 342–47.

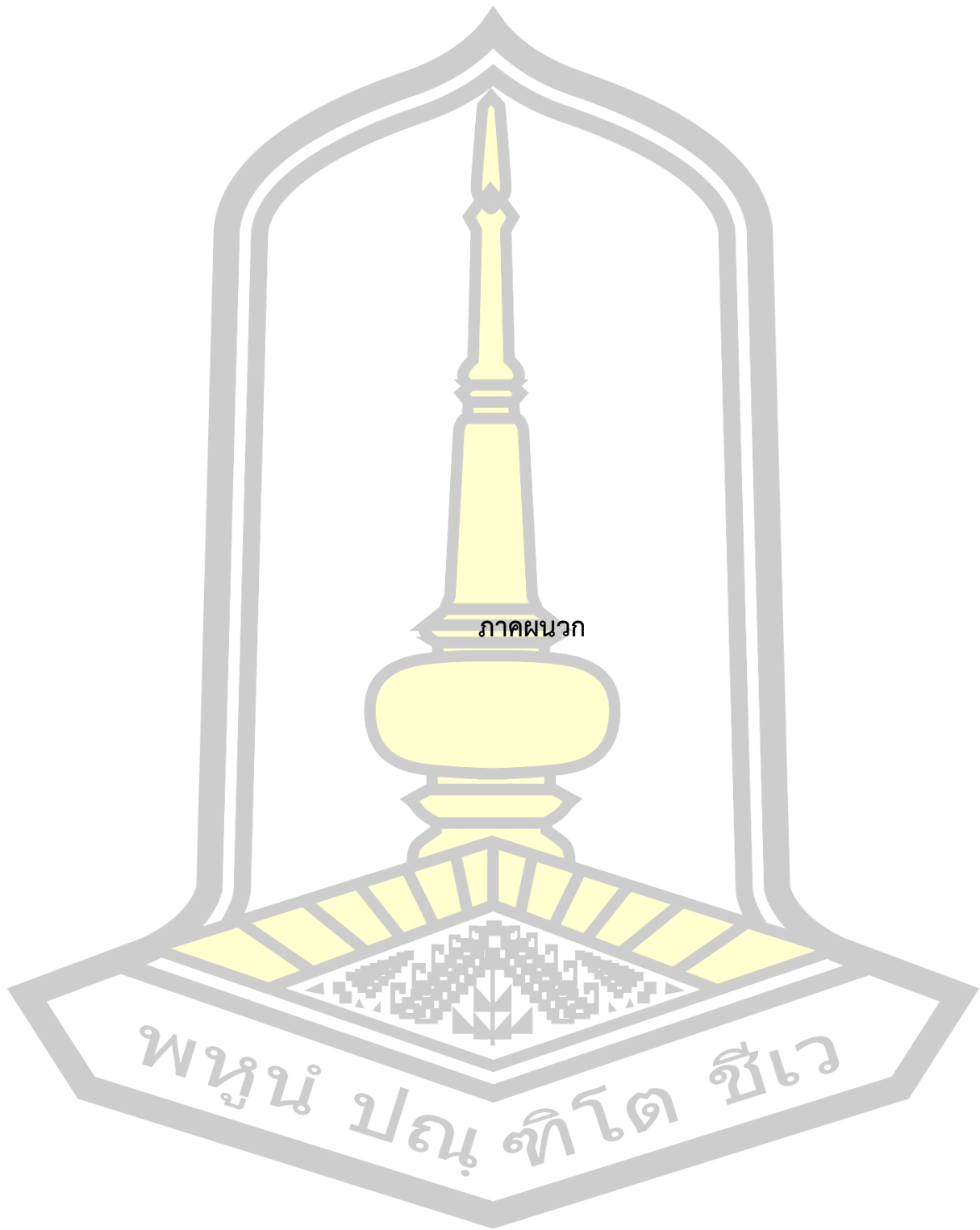
- KOST USA. 2011. "Ethylene Glycol Products."  
<http://ethyleneglycolproducts.com/asp/intro.asp?ID=100006>.
- Mark E. Davis Research Group. 2012. "Zeolite Synthesis."  
<http://www.che.caltech.edu/groups/med/catalysis.html>.
- Min Liu, Junhui Li, Wenzhi Jia, Mengjiao Qin, Yanan Wang, Kai Tong, Chen Huanhui and Zhirong Zhu. 2015. "Seed-Induced Synthesis of Hierarchical ZSM-5 Nanosheets in the Presence of Hexadecyl Trimethyl Ammonium Bromide." *RSC Advances* 5(12): 9237–40.
- Ming-Feng Hsieh, Yunwen Zhou, Hari Thirumalai, Lars C. Grabow, and Jeffrey D. Rimer. 2017. "Silver-Promoted Dehydroaromatization of Ethylene over ZSM-5 Catalysts." *Catalysis for New Energy Technology* 9: 1675 – 1682.
- N. Y. Chen, William E. Garwood, Francis G. Dwyer. 1996. *Shape Selective Catalysis in Industrial Application*. New York: Marcel Dekker.
- Nina Zhan, Yi Hu, Heng Li, Dinghua Yu, Yuwang Han, He Huang. 2010. "Lanthanum-Phosphorous Modified HZSM-5 Catalysts in Dehydration of Ethanol to Ethylene: A Comparative Analysis." *Catalysis Communications* 11(7): 633–37.
- P.L. Tan, Chak Tong Au , Suet ye Lai. 2007. "Effects of Acidification and Basification of Impregnating Solution on the Performance of Mo/HZSM-5 in Methane Aromatization." *Applied Catalysis A: General* 324: 36–41.
- Pannaporn Pintavirooj, Ponlakit Jitto , Nida Chaimoon. 2017. "Addition of Mo Zn Fe and Ag into HZSM-5 and NaZSM-5 Catalysts." *Materials Science Forum* 890: 180–83.
- Parisa Dumrongsakda and Vithaya Ruangpornvisuti. 2012. "Theoretical Investigation of Ethanol Conversion to Ethylene over H-ZSM-5 and Transition Metals-Exchanged ZSM-5." *Catalysis Letters* 142(1): 143–149.
- Pasqualino Marturano, Lucie Drozdová, Andreas Kogelbauer, and Roel Prins. 2000. "Fe/ZSM-5 Prepared by Sublimation of FeCl<sub>3</sub>: The Structure of the Fe Species as Determined by IR, 27Al MAS NMR, and EXAFS Spectroscopy." *Journal of Catalysis* 192: 236–247.
- Reliance Foundry. 2017. "Polyethylene Plastic." <http://www.reliance-foundry.com/bollard/polyethylene-plastic#gref>.



- sharinkhan. 2016. "Convert Ethanol to 2-Propanol."  
<https://brainly.in/question/1008764>.
- Stratas Advisors a hart energy company. 2016. "Global Refining Outlook: 2016-2035."
- T.Zaki. 2005. "Catalytic Dehydration of Ethanol Using Transition Metal Oxide Catalysts." *Journal of Colloid and Interface Science* 284(2): 606–13.
- Tecnogas. 2014. "ACETIC SILICONE ANTIMUFFA."  
<http://www.tecnogas.net/en/products/silicone-acetico-antimuffa>.
- Ted Cook, Susan English, Katie Lanier. 1996. "Alcohol Evaporation."  
[http://people.uncw.edu/lugo/MCP/DIFF\\_EQ/deproj/alevap/alevap.htm](http://people.uncw.edu/lugo/MCP/DIFF_EQ/deproj/alevap/alevap.htm).
- Thanh Khoa Phung, Loriana Proietti Hernández, and Alberto Lagazzo และ Guido Busca. 2015. "Dehydration of Ethanol over Zeolites, Silica Alumina and Alumina: Lewis Acidity, Brønsted Acidity and Confinement Effects." *Applied Catalysis A: General* 493: 77–89.
- Wei-Liang Fanchiang, Yu-Chuan Lin. 2012. "Catalytic Fast Pyrolysis of Furfural over H-ZSM-5 and Zn/H-ZSM-5 Catalysts." *Applied Catalysis A* 419– 420: 102– 110.
- Xian Zhang , Rijie Wang, Xiaoxia Yang and Fengbao Zhang. 2008. "Comparison of Four Catalysts in the Catalytic Dehydration of Ethanol to Ethylene." *Microporous and Mesoporous Materials* 116(1–3): 210–15.
- Xianhui Zhao, Lin Wei, Shouyun Cheng, and James Julson. 2015. "Optimization of Catalytic Cracking Process for Upgrading Camelina Oil to Hydrocarbon Biofuel." *Industrial Crops and Products* 77(516–526).
- Xiaoyin Chen Wei Li Johannes W. Schwank. 2011. "Reactivity of NH<sub>3</sub> over (Fe)/H-ZSM-5 Zeolite: Studies of Temperature-Programmed and Steady-State Reactions." *Catalysis Today* 175(1).
- Yang Liu, Xiaosong Li, Jinglin Liu, Chuan Shi, Aimin Zhu. 2014. "Ozone Catalytic Oxidation of Benzene over AgMn/HZSM-5 Catalysts at Room Temperature: Effects of Mn Loading and Water Content." *Chinese Journal of Catalysis* 35: 1465–74.
- Yiwen FANG , Ji TANG , Xiaochang HUANG , Weibin SHEN , Yibing SONG, Changyong SUN. 2010. "SHORT COMMUNICATION Aromatization of Dimethyl Ether over Zn/H-ZSM-5 Catalyst." *Chinese Journal of Catalysis* 31(3): 264–66.

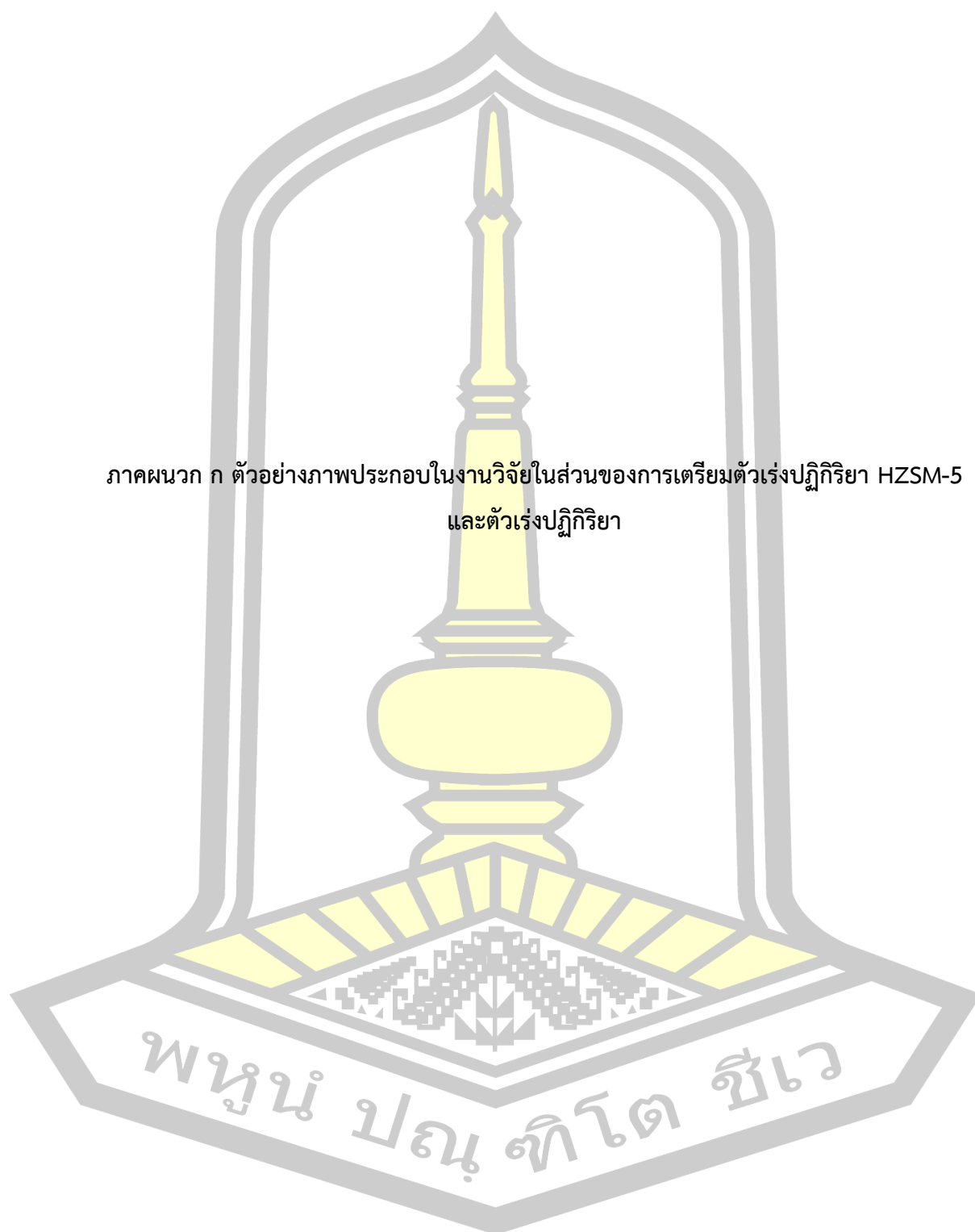
- Yoojin Lee. 2010. "Internal Assessment – Rate of Evaporation: Products from Oil." *IB Chemistry HL*.
- Zhang RR and Wang ZB. 2015. "Catalytic Cracking of 1-Butene to Propylene by Ag Modified HZSM-5." *Chinese Journal of Chemical Engineering* 23(7): 1131–37.
- Zhe Li, Ke-Chang Xie, Wei Huang and W. Reschetilowski. 2005. "Molybdenum Loaded on HZSM-5: A Catalyst for Selective Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides." *Studies in Surface Science and Catalysis* 158(b): 1741–48.
- Zhonghai Ji, Houfu Lv, Xiulian Pan, Xinhe Bao. 2018. "Enhanced Ethylene Selectivity and Stability of Mo/ZSM5 upon Modification with Phosphorus in Ethane Dehydrogenation." *Journal of Catalysis* 361: 94–104.





ภาคผนวก

พหุบัณฑิตยาลัย





HZSM-5

NaZSM-5

ภาพประกอบ ก.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5



ภาพประกอบ ก.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5



ภาพประกอบ ก.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5



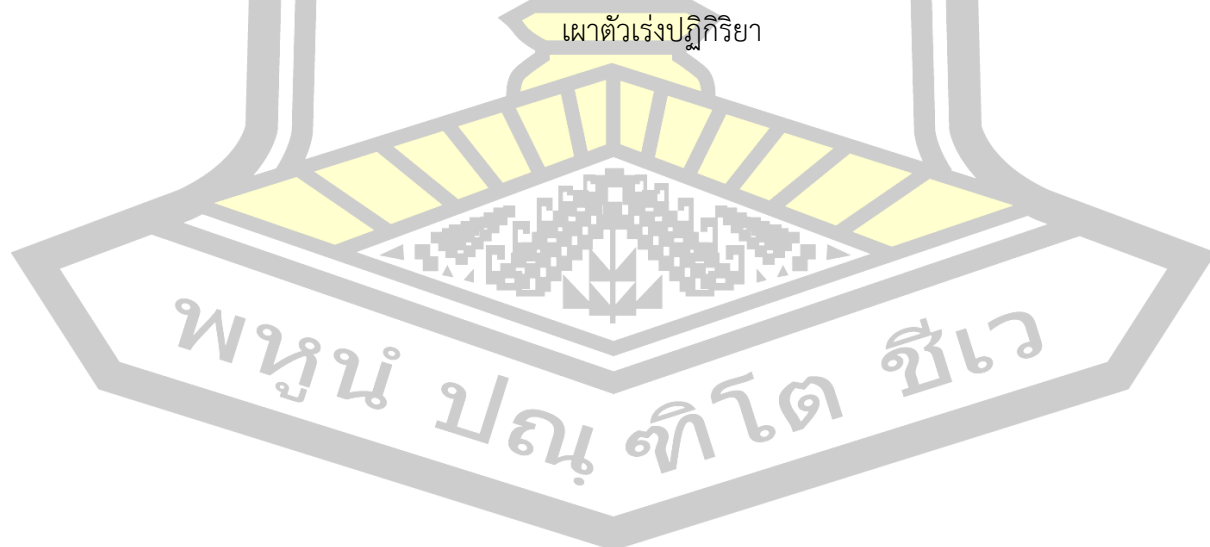
ภาพประกอบ ก.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา FeHZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/NaZSM-5

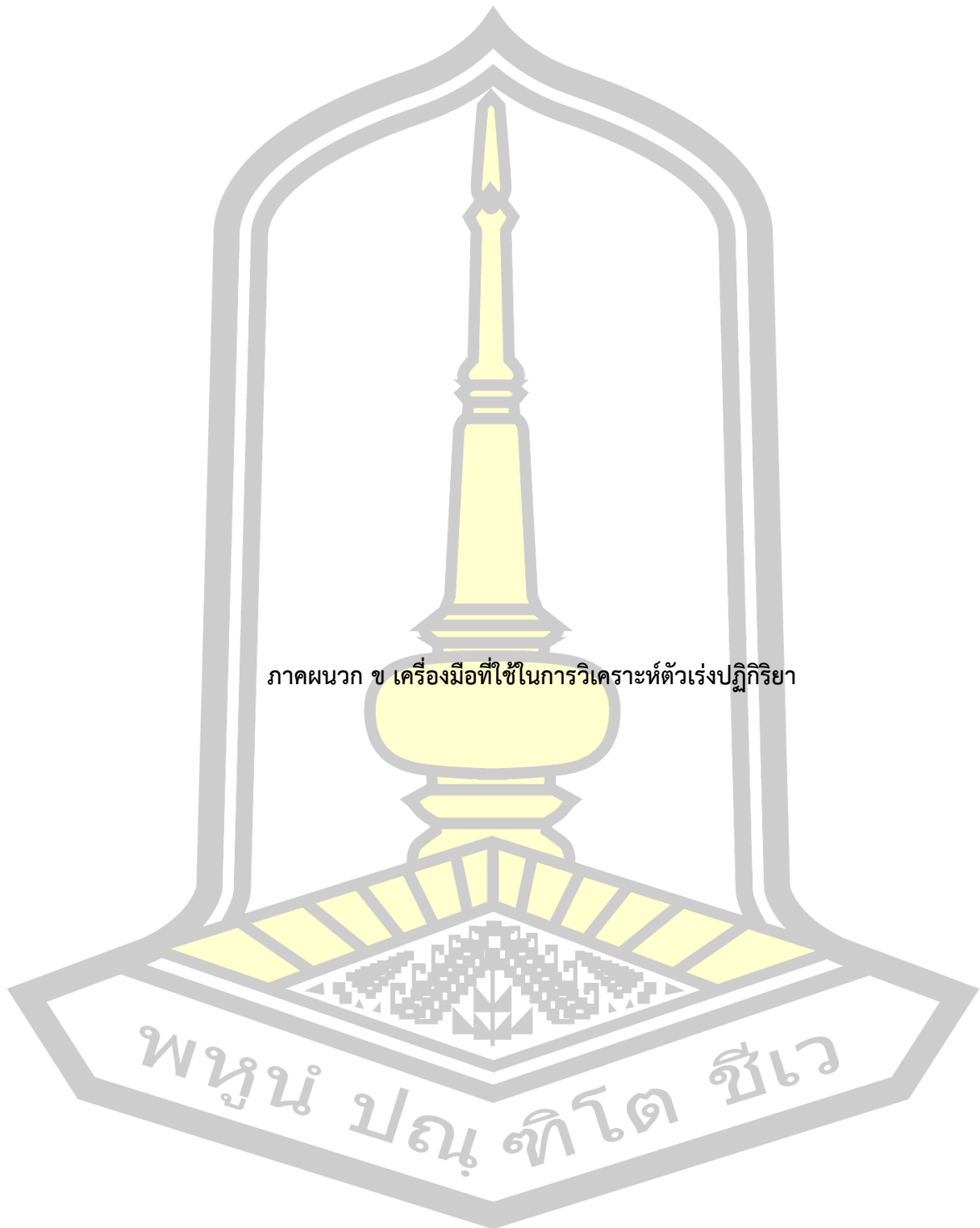


ภาพประกอบ ก.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา MoHZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/NaZSM-5



ภาพประกอบ ก.6 เตาเผาอุณหภูมิสูง Muffle Furnaces Carbolite model.CWF 12/13 สำหรับเผาตัวเร่งปฏิกิริยา





ภาคผนวก ข เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

พูน ปณฺ ทิโต ชีเว

**ข.1 เครื่องมือวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5**

วิเคราะห์ชนิดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการเติมโลหะด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ดังภาพประกอบ ข.1



**ภาพประกอบ ข.1** เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

ที่มา: ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์



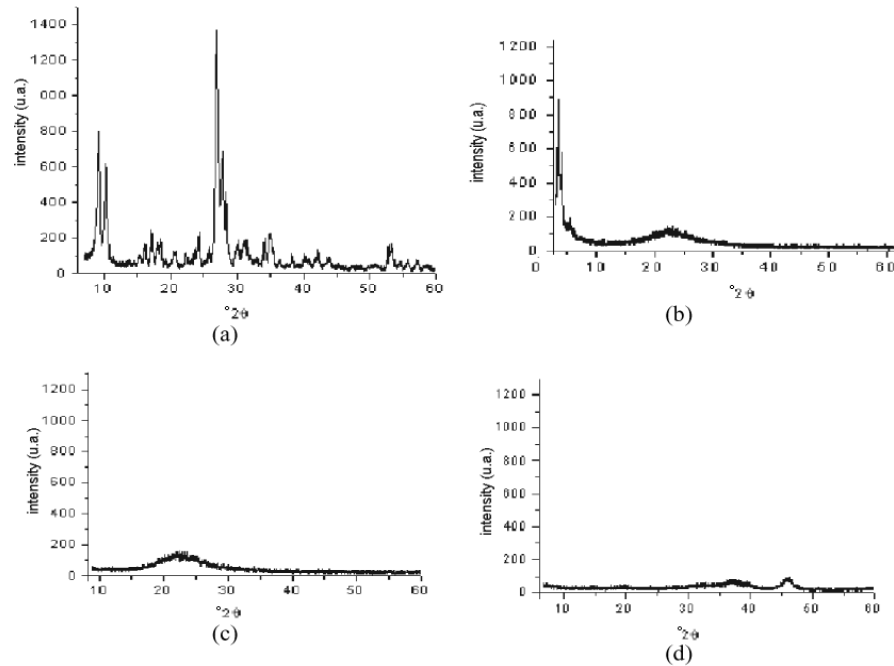
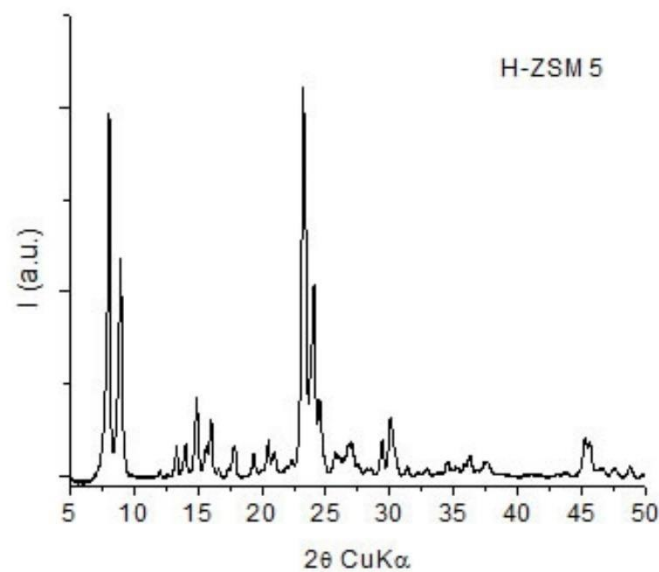


Figure 1: X-ray diffractograms for the stationary phases employed in this work. (a) ZSM-5 zeolite, (b) MCM-41 mesoporous material, (c) silica, (d) alumina.

ภาพประกอบ ข.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray diffraction (a) ซีโอไลต์ ZSM-5 (b) MCM-41 (c) ซิลิกา (d) อลูมินา

ที่มา : Application of molecular sieves in the fractionation of lemongrass oil from high-pressure carbon dioxide extraction (L. Paviani, 2006)



ภาพประกอบ ข.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray diffraction

ที่มา : ZECASIN S.A. (2013)

## ข.2 วิเคราะห์ขนาดและรูปร่างผลึกด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

เครื่อง SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดอยู่ที่ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษารายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) โดยจะทำการวิเคราะห์ ที่ 20kv (กิโลโวลต์) กำลังขยาย x 100 เท่า สเกล 100 um (ไมครอน ) และที่สเกล 600 um (ไมครอน) แสดงดังภาพประกอบ ข.4



ภาพประกอบ ข.4 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

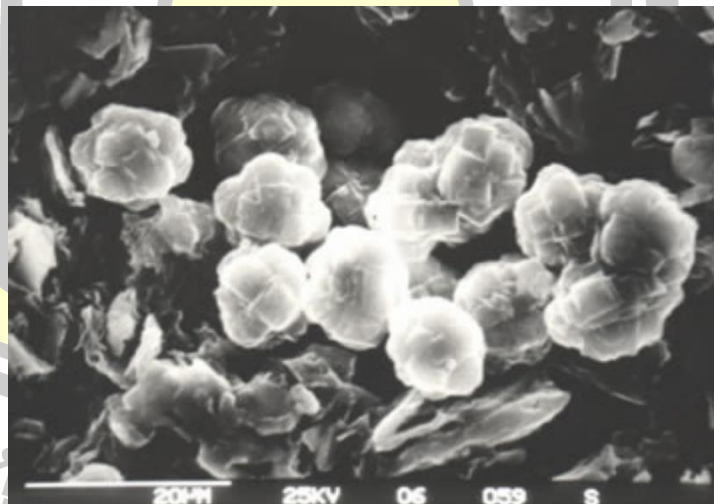
ที่มา: ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ ข.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron  
Microscope

ที่มา: California Institute of Technology, 2012



ภาพประกอบ ข.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron  
Microscope

ที่มา : ZEO MATERIALS Zeolites Supplier, 2013

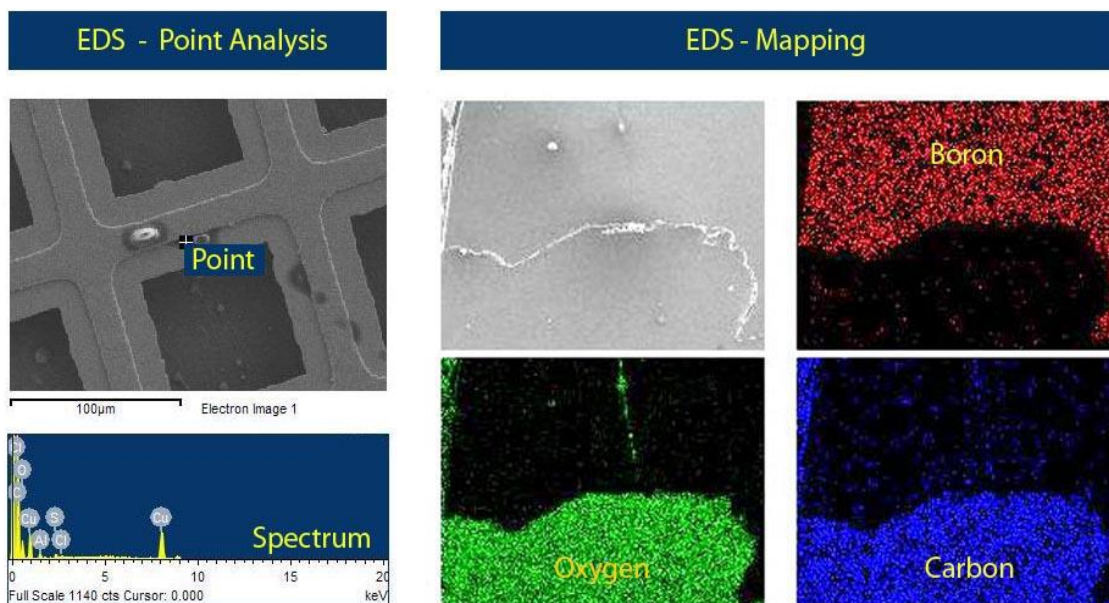
### ข.3 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์แบบ EDS

อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ( Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) ของบริษัท Oxford รุ่น INCA PentaFETx3 การทำงานอาศัยหลักการ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy ใช้การเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงพอเหมาะพุ่งเข้าชนสารตัวอย่างซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะพื้นจนทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานวงในได้รับพลังงานจากการชนจนหลุดออกไปจากอะตอม แล้วอิเล็กตรอนจากวงนอกจึงคายพลังงานออกมาบางส่วนพร้อมกับเปลี่ยนชั้นพลังงานเข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไป พลังงานที่อิเล็กตรอนคายออกมานี้จะอยู่ในรูปรังสีเอ็กซ์และมีค่าเฉพาะตามธาตุนั้น เมื่อวัดค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์นี้ด้วย EDS จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าชิ้นงานประกอบด้วยธาตุชนิดใด ดังภาพประกอบ ข.7



ภาพประกอบ ข.7 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์แบบ EDS  
ที่มา: Field Emission Scanning Electron Microscope JSM-7001F, 2014

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์



ภาพประกอบ ข.8 ตัวอย่างการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์แบบ EDS

ที่มา: Field Emission Scanning Electron Microscope JSM-7001F, 2014

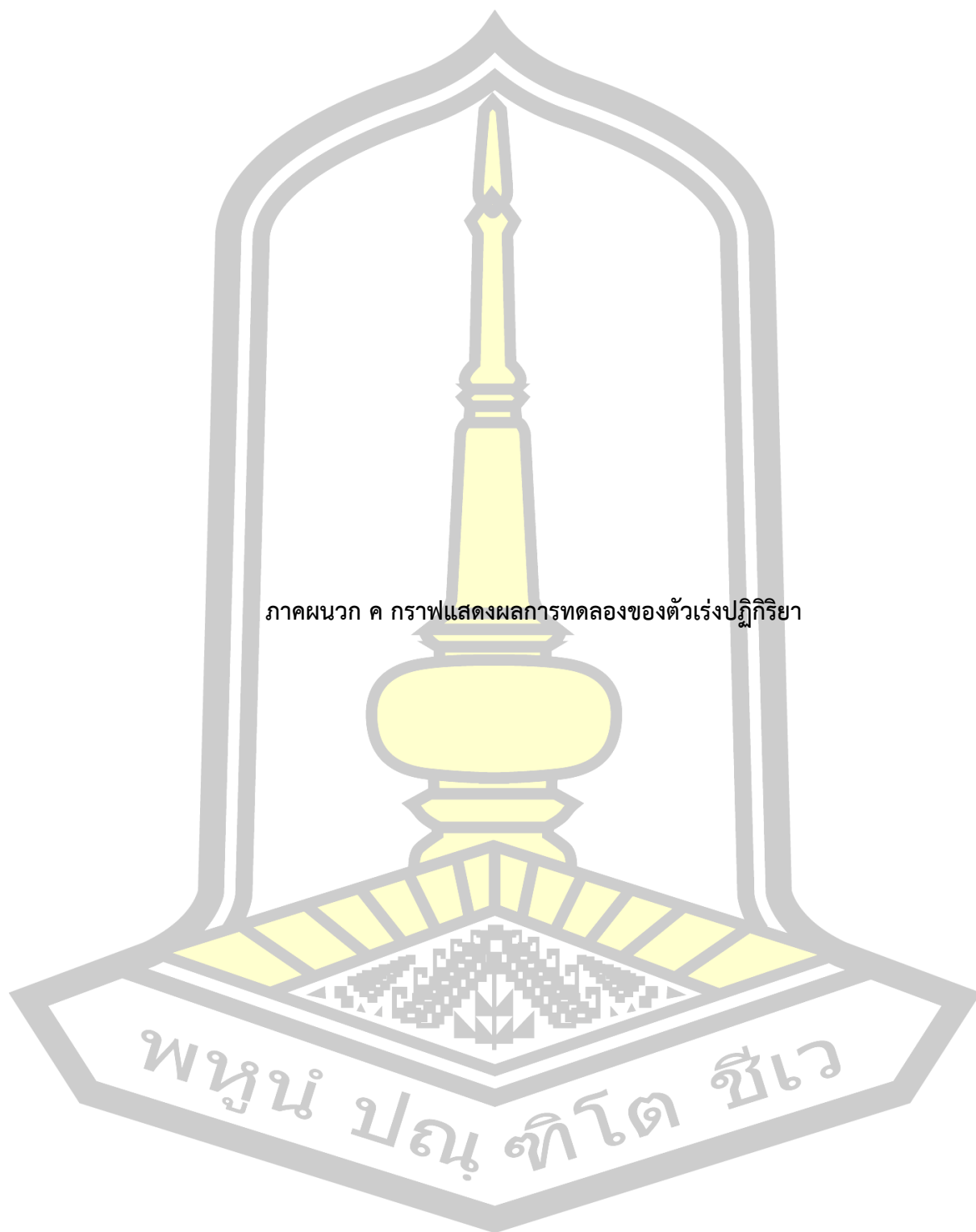
#### ข.4 เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS)

เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงมากในการวิเคราะห์หาสารประกอบอินทรีย์ประเภทต่างๆ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่ต้องการความแม่นยำสูง สามารถเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับฐานข้อมูล (Library) เพื่อความถูกต้องได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารมาตรฐาน เครื่อง GC-MS ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนของเครื่อง GC (Gas Chromatography) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างให้ออกมาทีละองค์ประกอบก่อนที่จะเข้าสู่ดีเทคเตอร์ และส่วนของเครื่อง MS (Mass Spectrometer) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นดีเทคเตอร์ในการตรวจสอบดูว่าองค์ประกอบต่างๆ ที่ผ่านออกมาจากเครื่อง GC นั้น มีเลขมวล (Mass number) เป็นเท่าไร โดยสารจะเกิดการ แตกตัวอยู่ในรูปประจุ เรียกว่า Molecular ion,  $M^+$  หรือ  $M^+$  รูปแบบการแตกตัวของแต่ละโมเลกุลมีลักษณะเฉพาะ เรียกว่าแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) โดยจะแสดงการแตกตัว (Fragmentation) ในรูปของมวลต่อประจุ เพื่อทำนายว่าสารที่ต้องการวิเคราะห์นั้นประกอบด้วยองค์ประกอบชนิดใดบ้างและมีปริมาณเท่าไร แสดงดังภาพประกอบ ข.9



ภาพประกอบ ข.9 เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS)  
ที่มา: ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



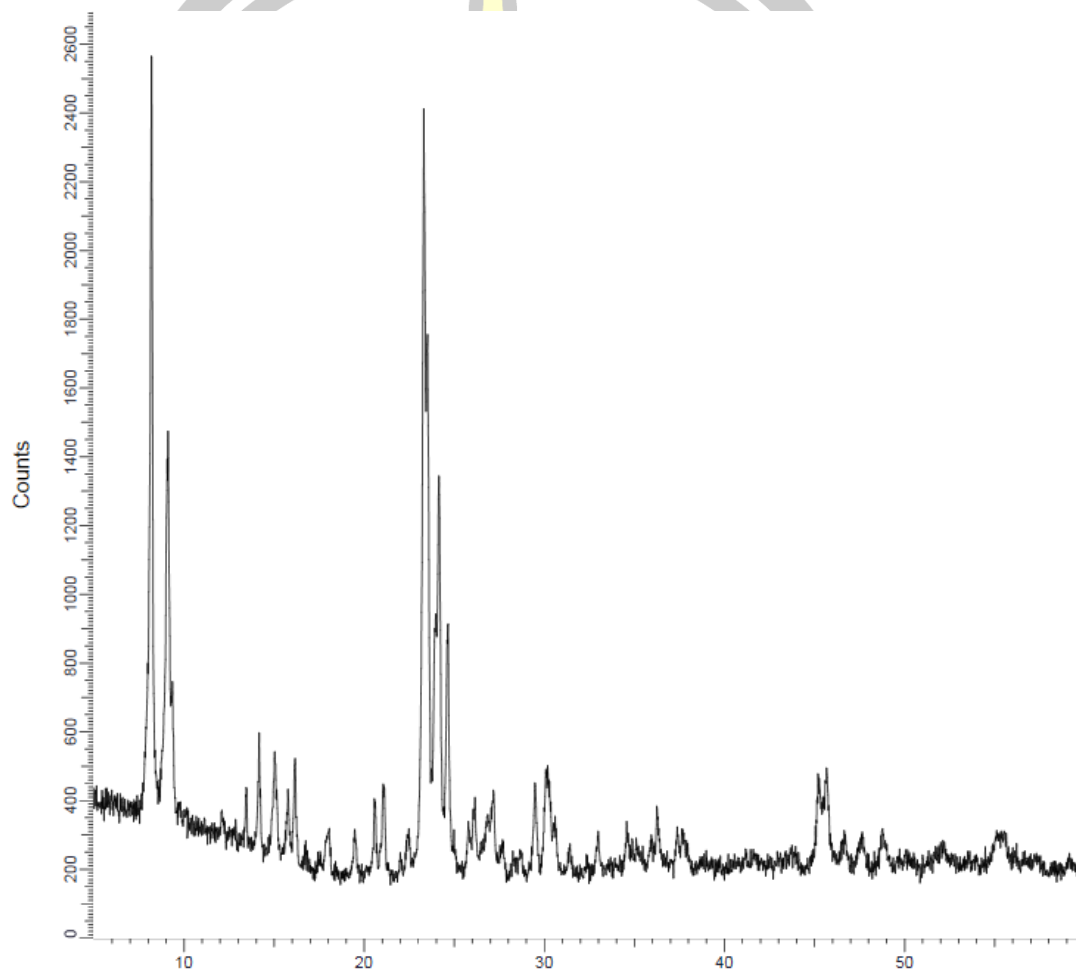


ภาคผนวก ค กราฟแสดงผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยา

พหุบัณฑิตยาลัย

### ค.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง XRD

นำตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5, NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5, Ag/NaZSM-5, Fe/HZSM-5, Zn/HZSM-5, Mo/NaZSM-5, Ag/HZSM-5 และ Mo/HZSM-5 ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในภาพประกอบที่ ค.1-ค.10

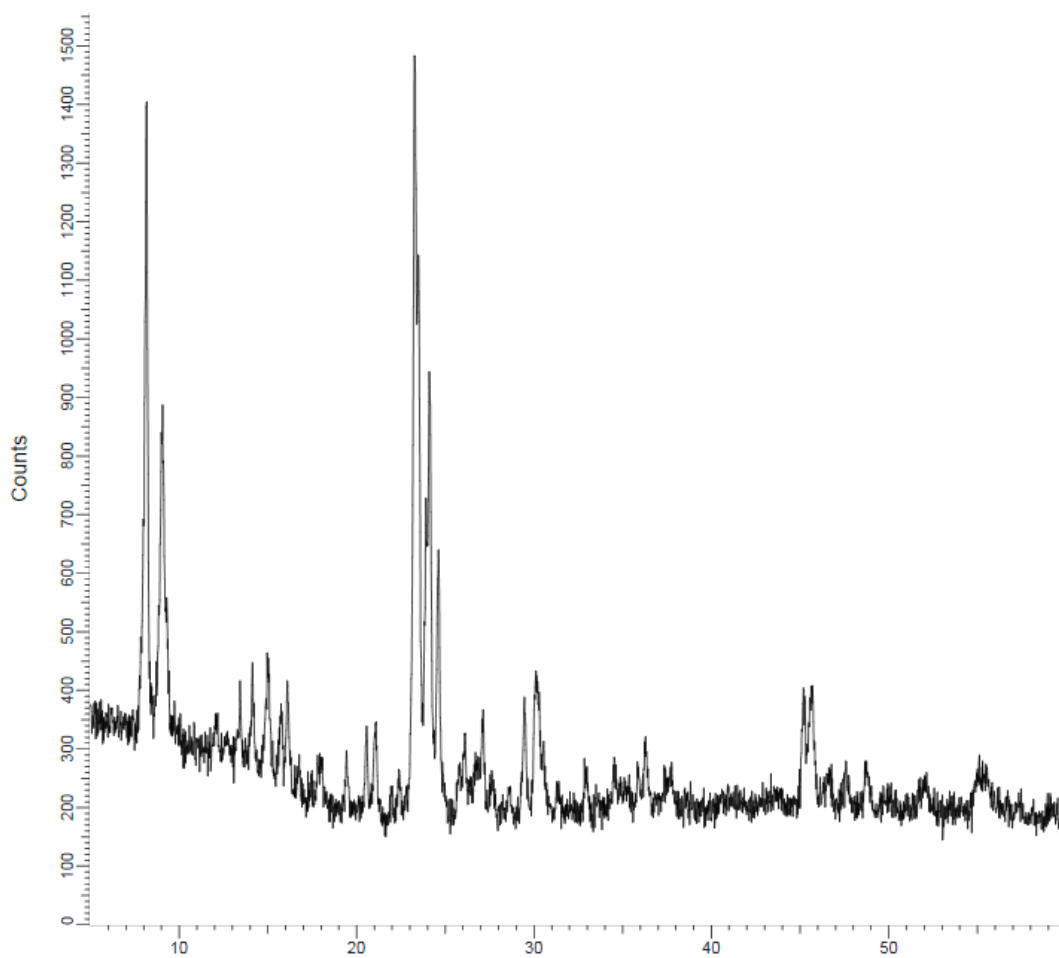


#### Experiment

User ID	329		
Instrument	Mahasarakham Uni		
Time	7/21/2016 2:11:41 PM		
Sample ID	Commander Sample ID		
Raw File ID	610		
Scan type	Coupled TwoTheta/Theta		
Scan mode	PsdFastScan		
2Theta	Start: 5.0001 [°]	Increment: 0.02043784526 [°]	Stop: 59.9983 [°]
Theta	Start: 2.50005 [°]	Increment: 0.01021892263 [°]	Stop: 29.99915 [°]

ภาพประกอบ ค.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD



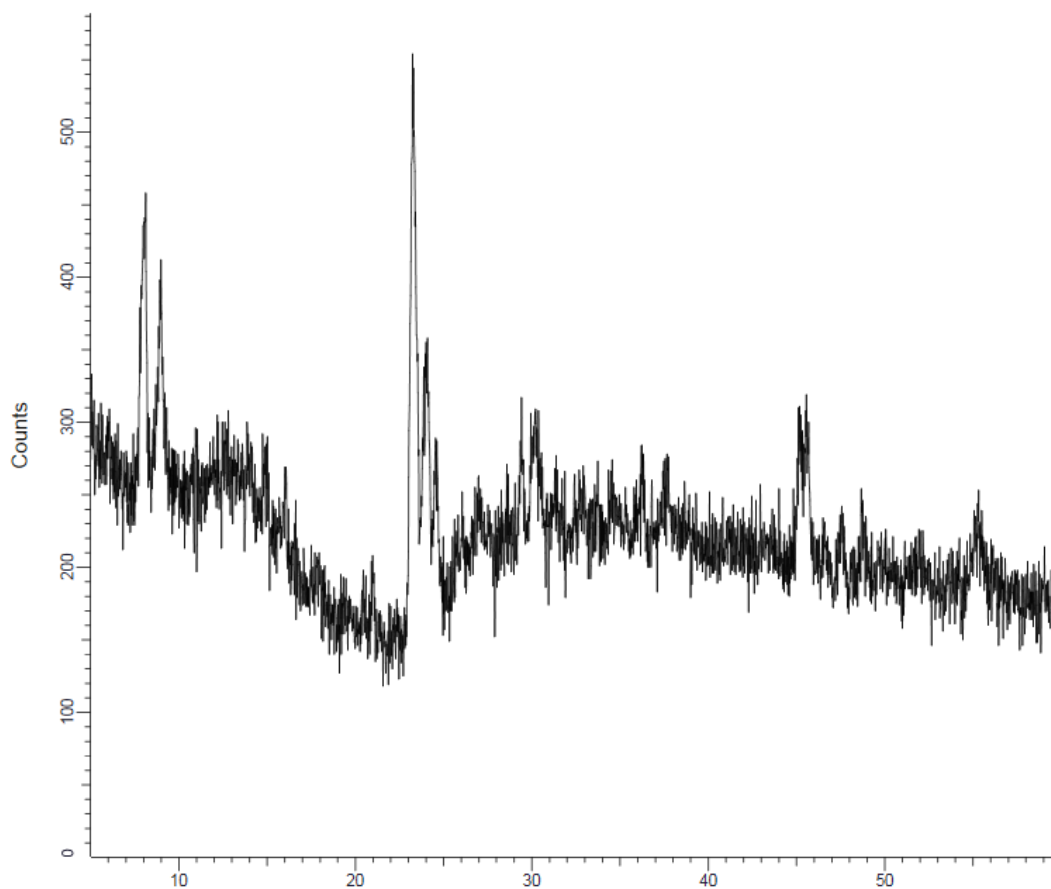


#### Experiment

User ID	329		
Instrument	Mahasarakham Uni		
Time	7/21/2016 4:07:13 PM		
Sample ID	Commander Sample ID		
Raw File ID	614		
Scan type	Coupled TwoTheta/Theta		
Scan mode	PsdFastScan		
2Theta	Start: 5.0001 [°]	Increment: 0.02043784526 [°]	Stop: 59.9983 [°]
Theta	Start: 2.50005 [°]	Increment: 0.01021892263 [°]	Stop: 29.99915 [°]

ภาพประกอบ ค.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา Na/ZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

พหุบัณฑิต ชีวะ



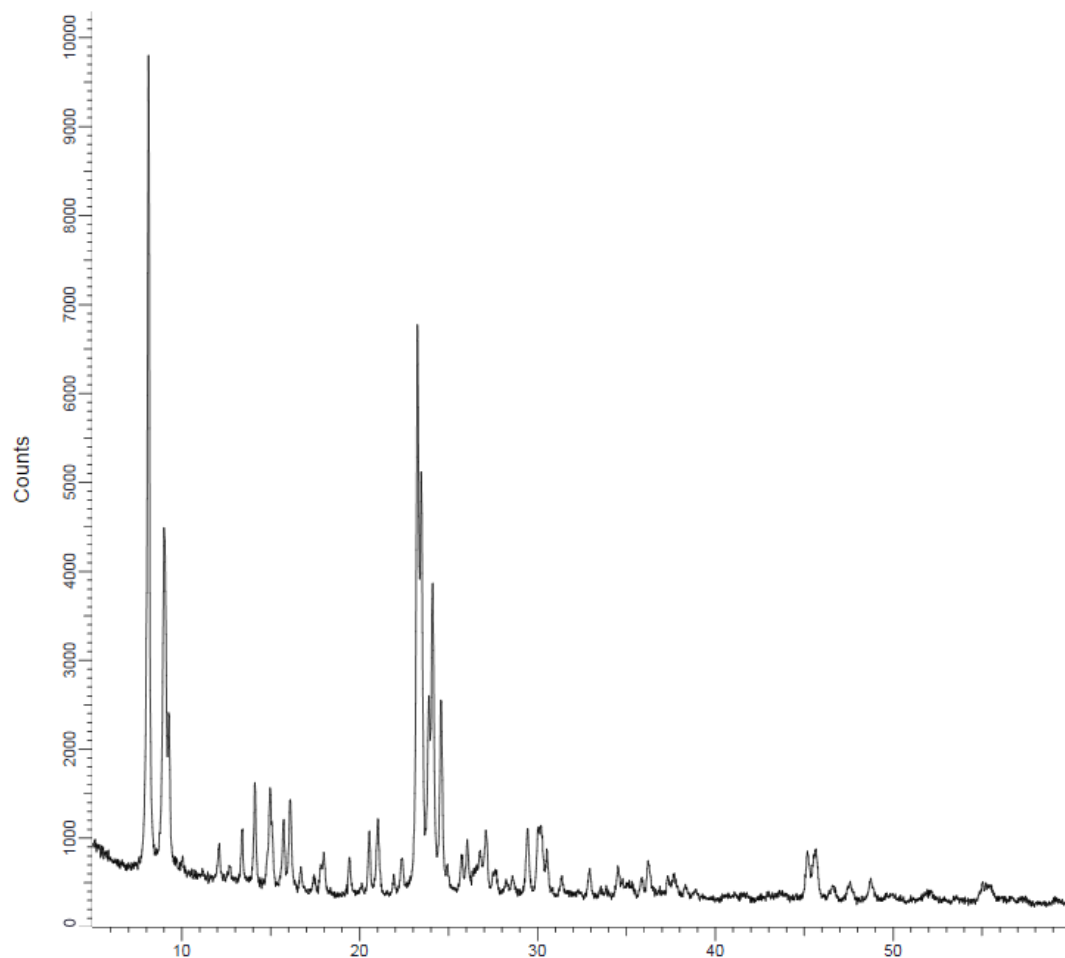
#### Experiment

```

User ID      329
Instrument    Mahasarakham Uni
Time         7/21/2016 3:08:32 PM
Sample ID    Commander Sample ID
Raw File ID  612
Scan type    Coupled TwoTheta/Theta
Scan mode    PsdFastScan
2Theta      Start: 5.0001 [°]   Increment: 0.02043784526 [°]   Stop: 59.9983 [°]
Theta       Start: 2.50005 [°]   Increment: 0.01021892263 [°]   Stop: 29.99915 [°]
  
```

ภาพประกอบ ค.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD



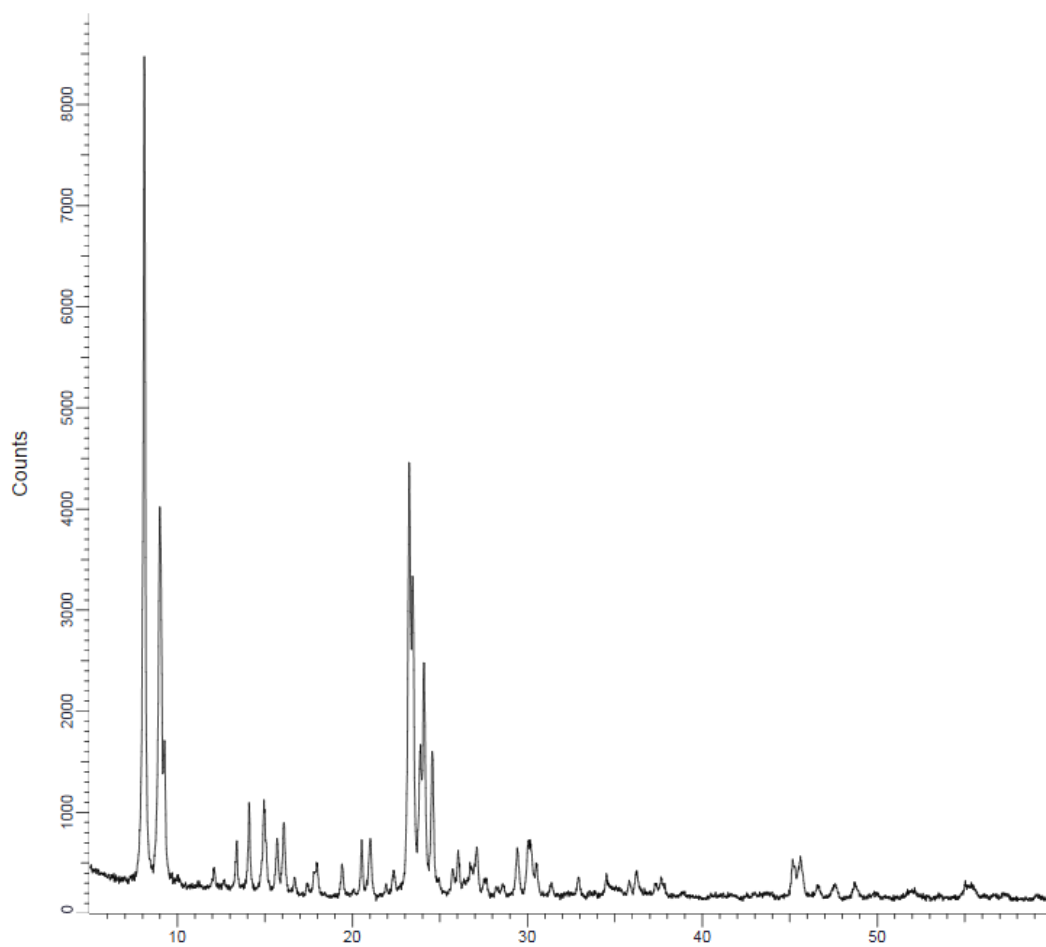


#### Experiment

User ID	329		
Instrument	Mahasarakham Uni		
Time	7/21/2016 5:00:28 PM		
Sample ID	Commander Sample ID		
Raw File ID	616		
Scan type	Coupled TwoTheta/Theta		
Scan mode	PsdFastScan		
2Theta	Start: 5.0001 [°]	Increment: 0.02043784526 [°]	Stop: 59.9983 [°]
Theta	Start: 2.50005 [°]	Increment: 0.01021892263 [°]	Stop: 29.99915 [°]

ภาพประกอบ ค.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

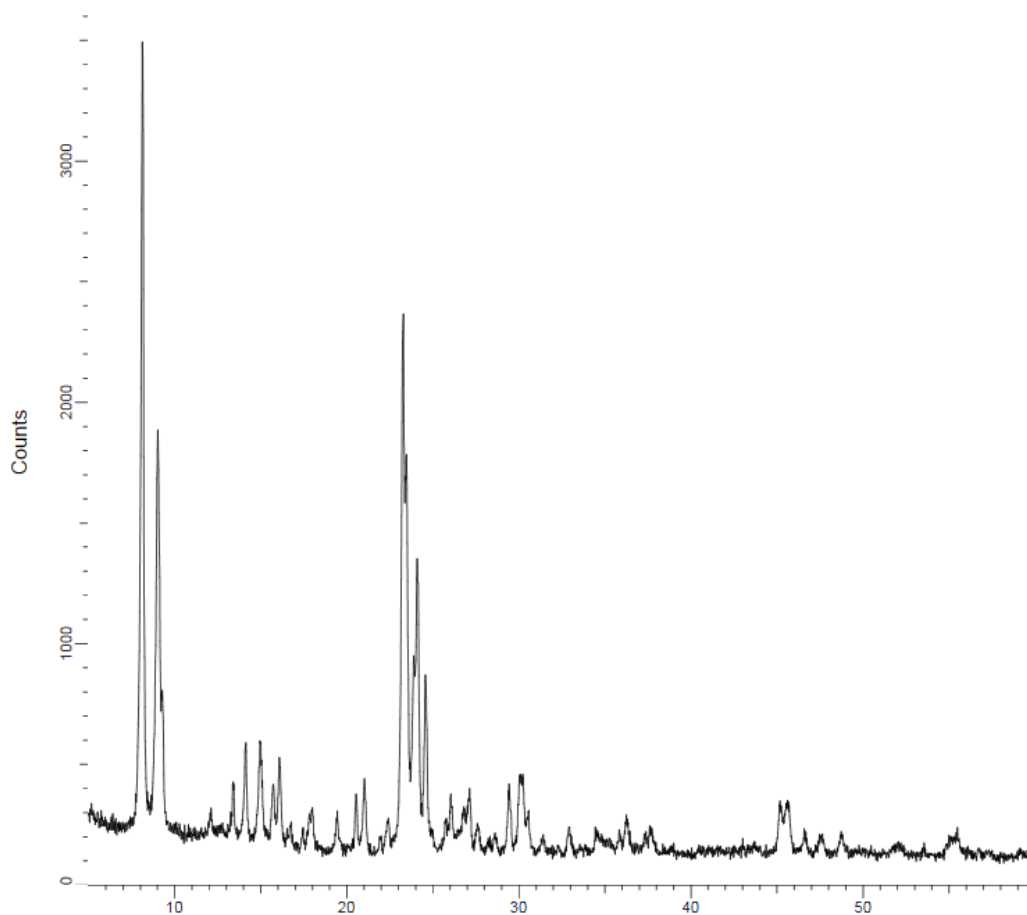
พหุบัณฑิต ชีวะ

**Experiment**

User ID 329  
Instrument Mahasarakham Uni  
Time 7/21/2016 5:57:49 PM  
Sample ID Commander Sample ID  
Raw File ID 619  
Scan type Coupled TwoTheta/Theta  
Scan mode PsdFastScan  
2Theta Start: 5.0001 [°] Increment: 0.02043784526 [°] Stop: 59.9983 [°]  
Theta Start: 2.50005 [°] Increment: 0.01021892263 [°] Stop: 29.99915 [°]

ภาพประกอบ ค.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/HZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

พหุบัณฑิต ชีวะ

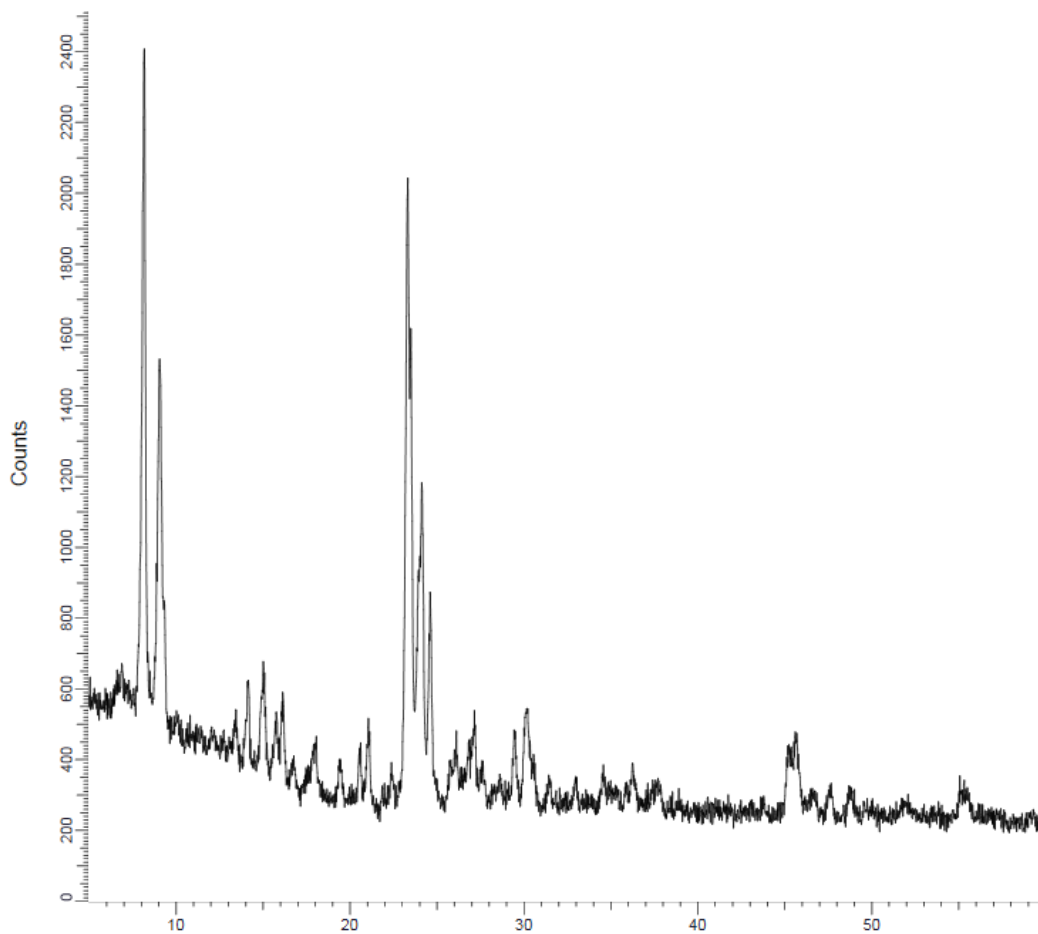


#### Experiment

User ID	329		
Instrument	Mahasarakham Uni		
Time	7/21/2016 6:28:02 PM		
Sample ID	Commander Sample ID		
Raw File ID	620		
Scan type	Coupled TwoTheta/Theta		
Scan mode	PsdFastScan		
2Theta	Start: 5.0001 [°]	Increment: 0.02043784526 [°]	Stop: 59.9983 [°]
Theta	Start: 2.50005 [°]	Increment: 0.01021892263 [°]	Stop: 29.99915 [°]

ภาพประกอบ ค.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/NaZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD



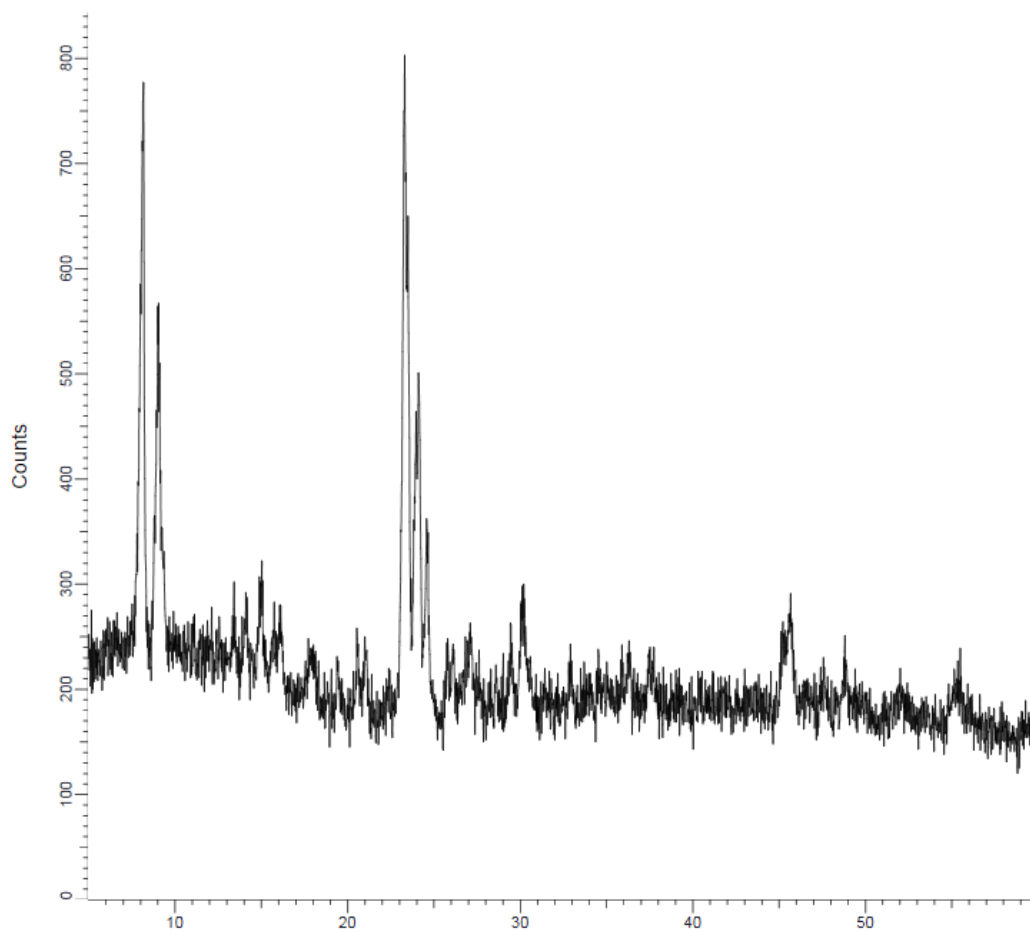


#### Experiment

```
User ID      329
Instrument    Mahasarakham Uni
Time         7/21/2016 2:41:43 PM
Sample ID    Commander Sample ID
Raw File ID  611
Scan type    Coupled TwoTheta/Theta
Scan mode    PsdFastScan
2Theta      Start: 5.0001 [°]   Increment: 0.02043784526 [°]   Stop: 59.9983 [°]
Theta       Start: 2.50005 [°]   Increment: 0.01021892263 [°]   Stop: 29.99915 [°]
```

ภาพประกอบ ค.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/HZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD



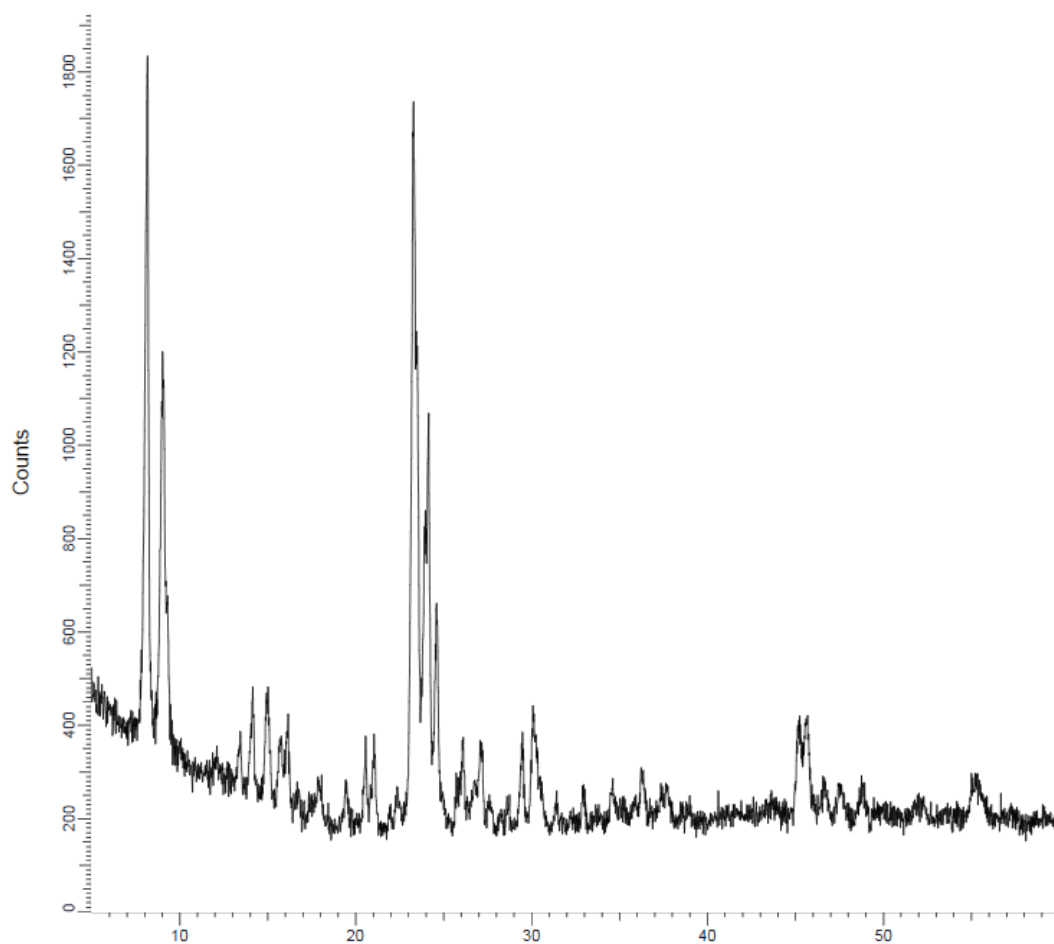


#### Experiment

User ID	329		
Instrument	Mahasarakham Uni		
Time	7/21/2016 4:33:46 PM		
Sample ID	Commander Sample ID		
Raw File ID	615		
Scan type	Coupled TwoTheta/Theta		
Scan mode	PsdFastScan		
2Theta	Start: 5.0001 [°]	Increment: 0.02043784526 [°]	Stop: 59.9983 [°]
Theta	Start: 2.50005 [°]	Increment: 0.01021892263 [°]	Stop: 29.99915 [°]

ภาพประกอบ ค.8 ตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/NaZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD





#### Experiment

```

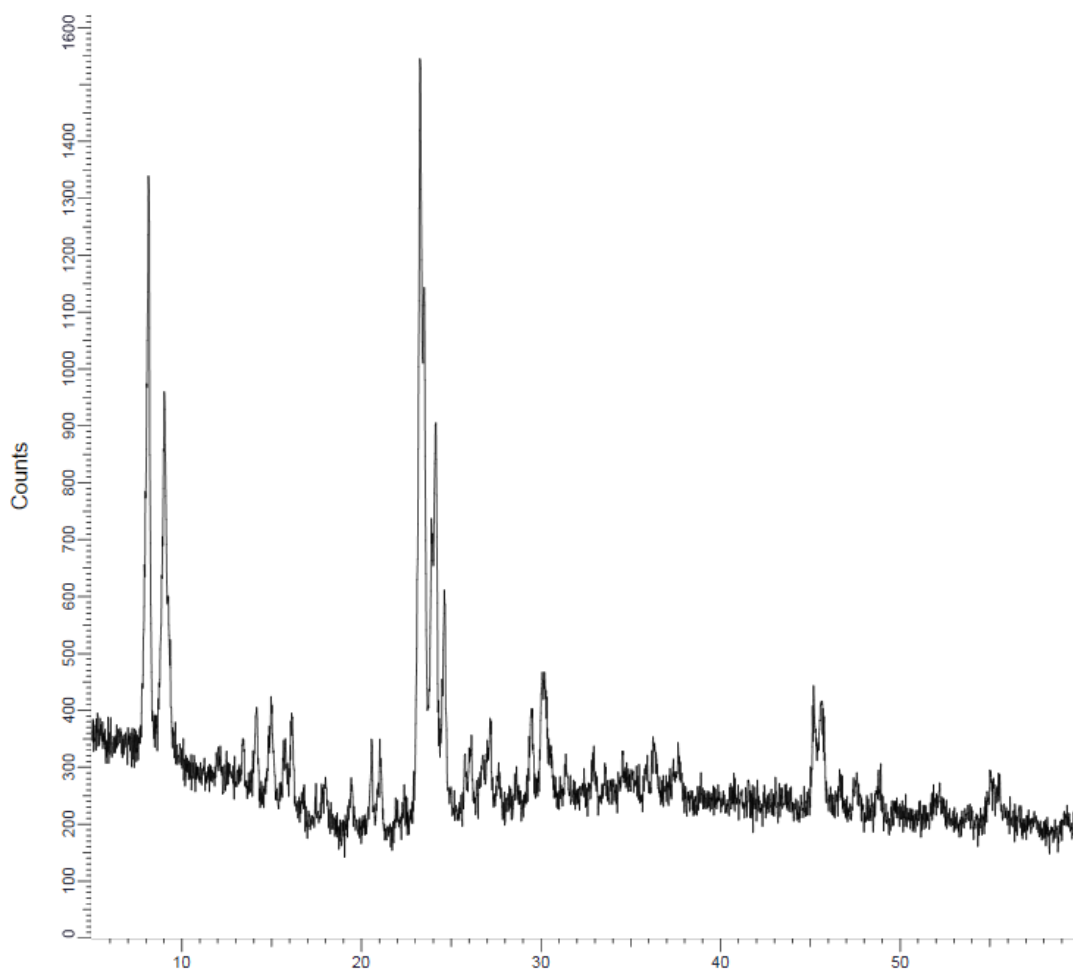
User ID      329
Instrument    Maharakham Uni
Time         7/21/2016 3:35:15 PM
Sample ID    Commander Sample ID
Raw File ID  613
Scan type    Coupled TwoTheta/Theta
Scan mode    PsdFastScan
2Theta       Start: 5.0001 [°]   Increment: 0.02043784526 [°]   Stop: 59.9983 [°]
Theta        Start: 2.50005 [°]   Increment: 0.01021892263 [°]   Stop: 29.99915 [°]

```

ภาพประกอบ ค.9 ตัวอย่างปฏิกิริยา Zn/HZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ





#### Experiment

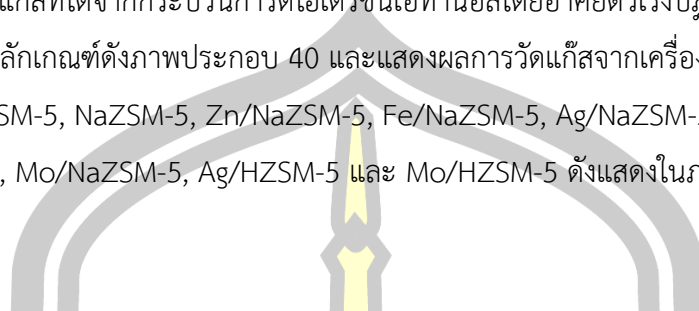
User ID	329		
Instrument	Mahasarakham Uni		
Time	7/21/2016 5:31:14 PM		
Sample ID	Commander Sample ID		
Raw File ID	618		
Scan type	Coupled TwoTheta/Theta		
Scan mode	PsdFastScan		
2Theta	Start: 5.0001 [°]	Increment: 0.02043784526 [°]	Stop: 59.9983 [°]
Theta	Start: 2.50005 [°]	Increment: 0.01021892263 [°]	Stop: 29.99915 [°]

ภาพประกอบ ค.10 ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5 ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

พหุบัณฑิต ชีวะ

## ค.2 การวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS)

นำแก๊สที่ได้จากกระบวนการดีไฮเดรชันเอทานอลโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา มาทำการวัด  
ได้ผลโดยใช้หลักเกณฑ์ดังภาพประกอบ 40 และแสดงผลการวัดแก๊สจากเครื่อง (GC-MS) ของตัวเร่ง  
ปฏิกิริยา HZSM-5, NaZSM-5, Zn/NaZSM-5, Fe/NaZSM-5, Ag/NaZSM-5, Fe/HZSM-5,  
Zn/HZSM-5, Mo/NaZSM-5, Ag/HZSM-5 และ Mo/HZSM-5 ดังแสดงในภาพประกอบที่ ค.11-ค.  
21



Method

[Comment]

==== Analytical Line 1 =====

[GC-2010]

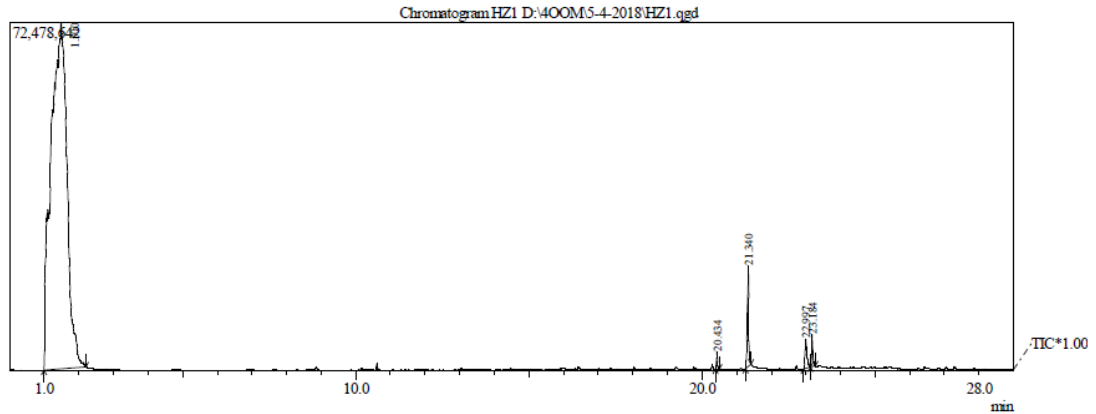
Column Oven Temp. :40.0 ?C  
 Injection Temp. :250.00 ?C  
 Injection Mode :Split  
 Flow Control Mode :Linear Velocity  
 Pressure :63.1 kPa  
 Total Flow :6.6 mL/min  
 Column Flow :1.19 mL/min  
 Linear Velocity :39.3 cm/sec  
 Purge Flow :3.0 mL/min  
 Split Ratio :2.0  
 High Pressure Injection :OFF  
 Carrier Gas Saver :OFF  
 Splitter Hold :OFF  
 Oven Temp. Program

Rate	Temperature(?C)	Hold Time(min)
-	40.0	3.00
10.00	250.0	5.00

ภาพประกอบ ค.11 หลักเกณฑ์ในการใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี  
แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC- MS)

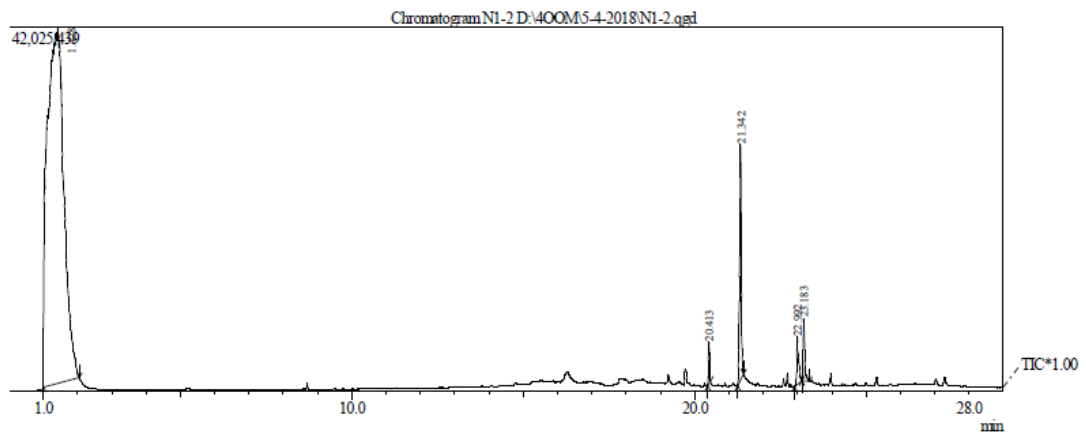


Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Peak Report TIC			A/H	Mark	Name
					Area%	Height	Height%			
1	1.500	1.000	2.217	2306735445	95.90	72025488	65.95	32.03	MI	
2	20.434	20.400	20.500	6299179	0.26	3506473	3.21	1.79	MI	
3	21.340	21.267	21.425	56277460	2.34	20848271	19.09	2.70	MI	
4	22.997	22.942	23.133	20655660	0.86	6149829	5.63	3.36	MI	
5	23.184	23.133	23.283	15299032	0.64	6689756	6.13	2.28	MI	
				2405266776	100.00	109219817	100.00			

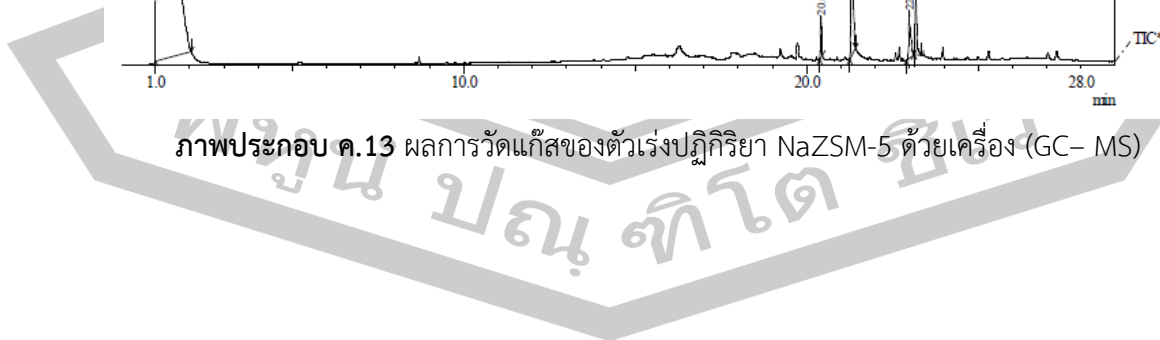


ภาพประกอบ ค.12 ผลการวัดแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ด้วยเครื่อง (GC- MS)

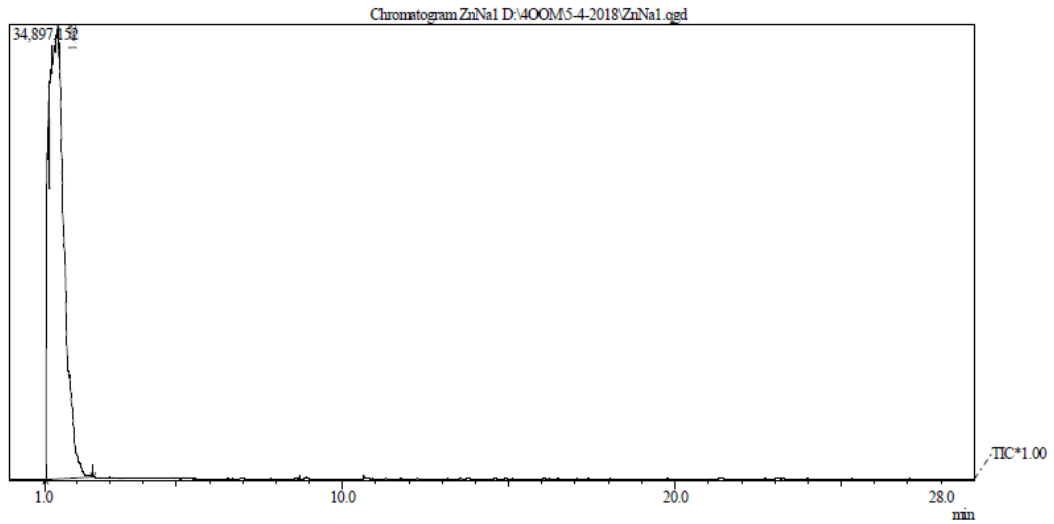
Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Peak Report TIC			A/H	Mark	Name
					Area%	Height	Height%			
1	1.428	1.000	2.050	1380901718	91.07	41094622	47.92	33.60	MI	
2	20.413	20.375	20.458	9772772	0.64	4795652	5.59	2.04		
3	21.342	21.250	21.433	84548223	5.58	27169904	31.68	3.11		
4	22.992	22.908	23.133	22063385	1.46	5482751	6.39	4.01	MI	
5	23.183	23.133	23.342	19061201	1.26	7210386	8.41	2.64	MI	
				1516347299	100.00	85753315	100.00			



ภาพประกอบ ค.13 ผลการวัดแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา NaZSM-5 ด้วยเครื่อง (GC- MS)

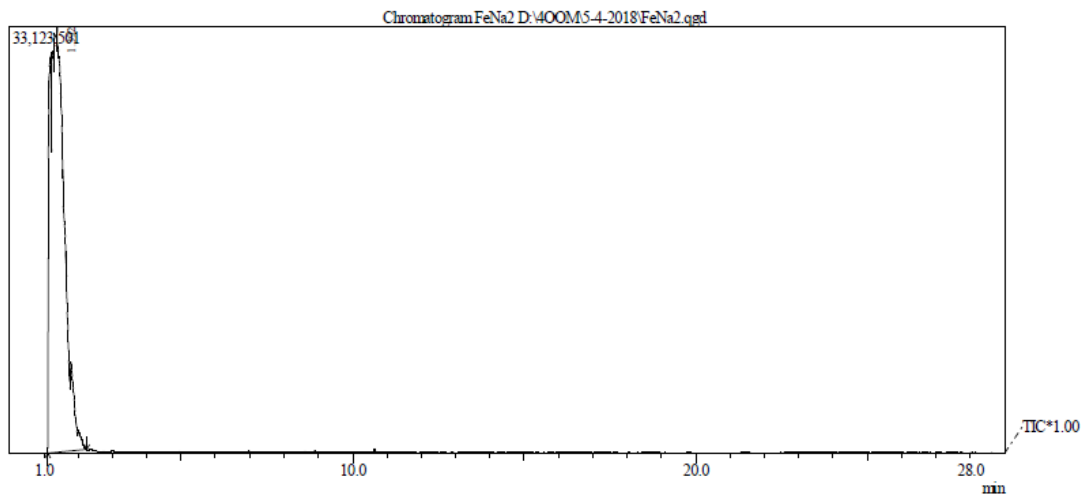


Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Peak Report TIC				A/H	Mark	Name
				Area	Area%	Height	Height%			
1	1.445	1.075	2.508	1126491835	100.00	34783266	100.00	32.38	MI	
				1126491835	100.00	34783266	100.00			



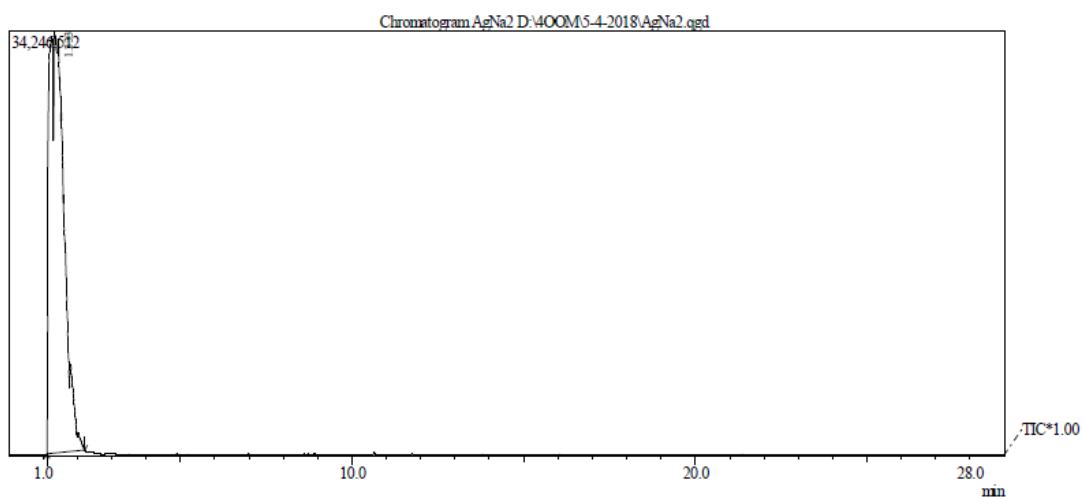
ภาพประกอบ ค.14 ผลการวัดแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/NaZSM-5 ด้วยเครื่อง (GC- MS)

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Peak Report TIC				A/H	Mark	Name
				Area	Area%	Height	Height%			
1	1.392	1.108	2.258	992562755	100.00	32990430	100.00	30.09	MI	
				992562755	100.00	32990430	100.00			



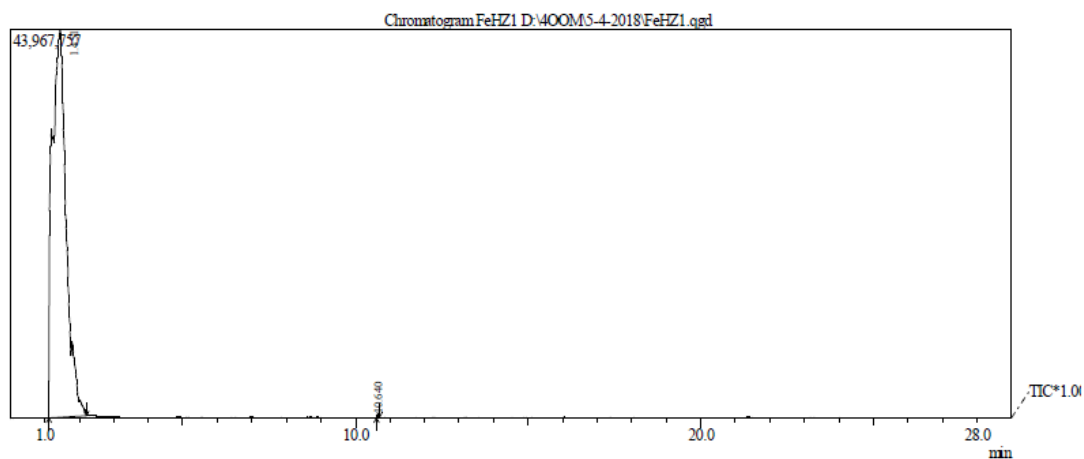
ภาพประกอบ ค.15 ผลการวัดแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/NaZSM-5 ด้วยเครื่อง (GC- MS)

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Peak Report TIC				A/H	Mark	Name
				Area	Area%	Height	Height%			
1	1.333	1.125	2.208	1045601416	100.00	33985711	100.00	30.76	MI	
				1045601416	100.00	33985711	100.00			



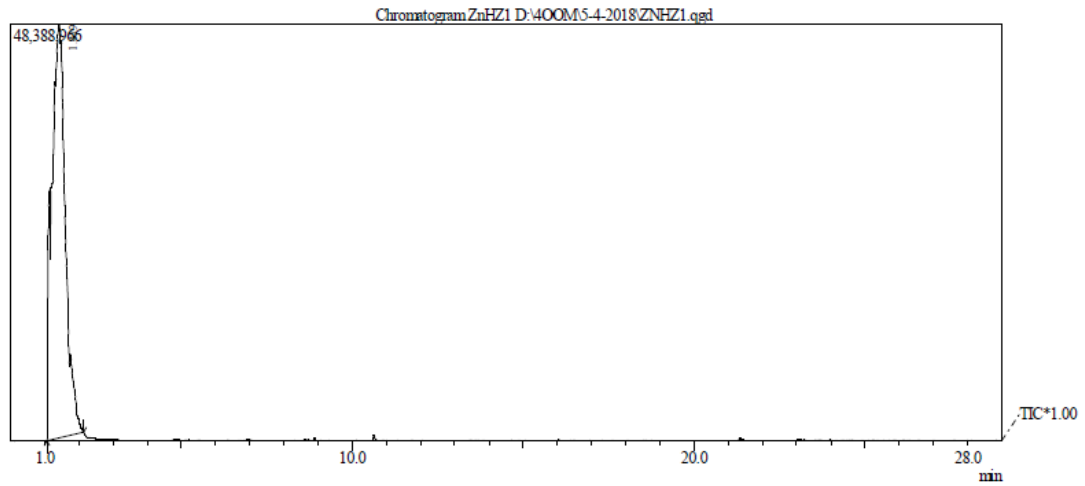
ภาพประกอบ ค.16 ผลการวัดแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/NaZSM-5 ด้วยเครื่อง (GC- MS)

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Peak Report TIC				A/H	Mark	Name
				Area	Area%	Height	Height%			
1	1.451	1.117	2.217	1235566554	99.94	43822296	99.33	28.19	MI	
2	10.640	10.608	10.700	711797	0.06	297263	0.67	2.39		
				1236278351	100.00	44119559	100.00			



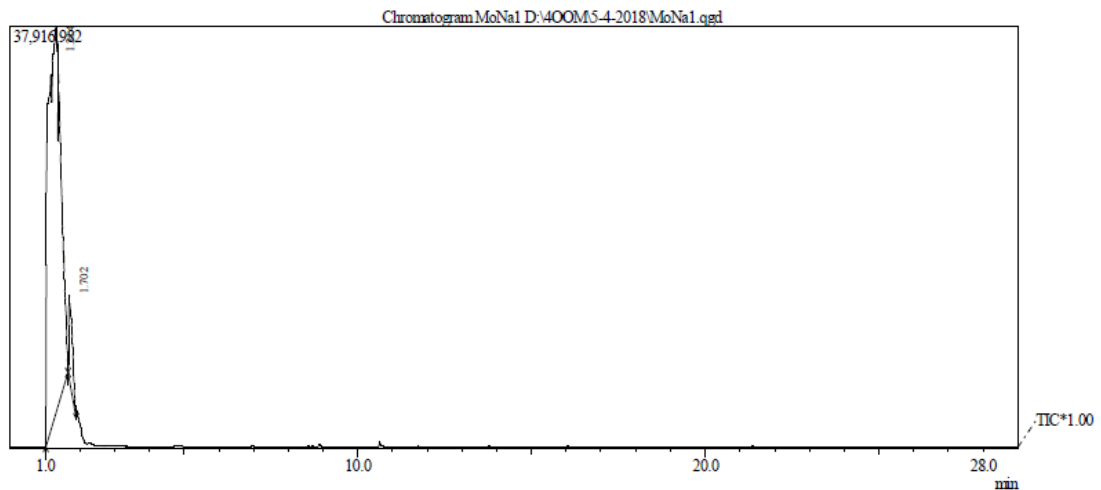
ภาพประกอบ ค.17 ผลการวัดแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/HZSM-5 ด้วยเครื่อง (GC- MS)

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Peak Report TIC				A/H	Mark	Name
				Area	Area%	Height	Height%			
1	1.419	1.067	2.142	1349062019	100.00	47965190	100.00	28.12	MI	
				1349062019	100.00	47965190	100.00			



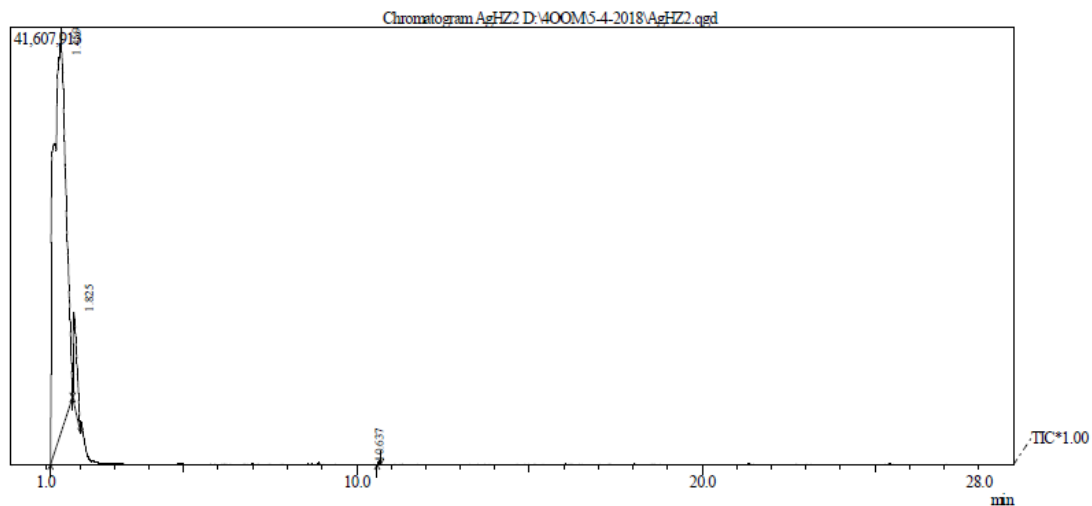
ภาพประกอบ ค.18 ผลการวัดแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/HZSM-5 ด้วยเครื่อง (GC- MS)

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Peak Report TIC				A/H	Mark	Name
				Area	Area%	Height	Height%			
1	1.314	1.017	1.667	889115374	94.36	34764870	82.07	25.56	MI	
				53152020	5.64	7595770	17.93			
2	1.702	1.667	1.900	942267394	100.00	42360640	100.00			



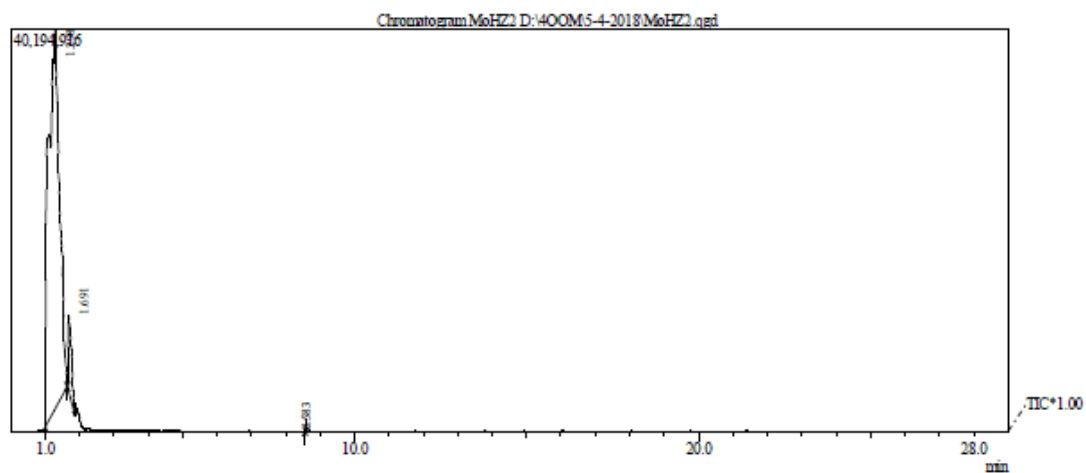
ภาพประกอบ ค.19 ผลการวัดแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/NaZSM-5 ด้วยเครื่อง (GC- MS)

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Peak Report TIC				A/H	Mark	Name
				Area	Area%	Height	Height%			
1	1.459	1.150	1.792	935767644	93.93	38422947	81.47	24.32	MI	
2	1.825	1.792	2.017	59901722	6.01	8511121	18.05	7.09	MI	
3	10.637	10.600	10.700	585794	0.06	227613	0.48	2.57		
				996255160	100.00	47161681	100.00			



ภาพประกอบ ค.20 ผลการวัดแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/HZSM-5 ด้วยเครื่อง (GC- MS)

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Peak Report TIC				A/H	Mark	Name
				Area	Area%	Height	Height%			
1	1.298	1.000	1.650	860403154	94.05	37843581	82.90	22.73	MI	
2	1.691	1.650	1.875	54349968	5.94	7732054	16.94	7.08	MI	
3	8.583	8.558	8.617	129485	0.01	75385	0.17	1.72	MI	
				914882607	100.00	45651020	100.00			



ภาพประกอบ ค.21 ผลการวัดแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/HZSM-5 ด้วยเครื่อง (GC- MS)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาว ปณณพร ปิณฑวิรุจน์
วันเกิด	วันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ.2532
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 222/11 หมู่6 ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี รหัสไปรษณีย์ 41000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล อำเภอเมือง จังหวัด อุดรธานี พ.ศ. 2554 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(เกษตรศาสตร์) (วท.บ. เกษตรศาสตร์) สาขาวิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2561 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2559 จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีงบประมาณ 2559

พณฺณ ปณฺ ทิโต ชีเว