

การผลิตสารอะโรมาติกจากอะซิโตนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 และ

Ga/HZSM5

Acetone conversion to aromatic over HZSM5 and Ga/HZSM5



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acetone conversion to aromatic over HZSM5 and Ga/HZSM5

Kornpop Intarakumhaeng

Montree Vattananiyom

Montud Thoumthong



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY**

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การผลิตสารอะโรมาติกจากอะซิโตนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 และ Ga/HZSM5

ชื่อนักศึกษา นายกรภพ อินทรกำแหง
นายมนตรี วัฒนานิยม
นายมนทัต ท่วมทอง

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจาด	
ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์	
รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งขอสงวนสิทธิ์ในวงจำกัดของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ การผลิตสารอะโรมาติกจากอะซีโตนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาHZSM-5 และ โลหะแกลเลียม

ชื่อนักศึกษา นายกรภพ อินทรกำแหง

นายมนตรี วัฒนานิยม

นายมนทัต ท้วมทอง

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

บทคัดย่อ

ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 จากวิธีการทดสอบผลิตสารอะโรมาติกผ่านปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซีโตนด้วยตัวแปรต่างๆ ได้แก่ เวลาสัมผัสชนิดของแก๊สพา และผลของการเติมโลหะแกลเลียม ที่อุณหภูมิ 673 เคลวินโดยชุดทำปฏิกิริยาที่เป็นเบดนิ่ง (Fixed bed) ในสถานะที่มีความดันเป็นเวลา 7 ชั่วโมง พบว่าสารที่ผลิตได้ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน C5-C8 เบนซีน โทลูอินเอทิลเบนซีน ไชลีน และไฮโดรคาร์บอน C9+ โดยสารผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมาจากอะซีโตน เกิดปฏิกิริยาแอลดอลคอนเดนเซชัน (Aldol condensation) ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 เกิดเป็นแอลดอลโปรดักต์ (Aldol product) จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) และปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) เป็นสารอะโรมาติกโดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 สามารถเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) ได้ดีกว่าปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) จึงทำให้ได้สารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 เป็นจำนวนมากและพบว่า การเติมโลหะแกลเลียมเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะช่วยเร่งปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ในการผลิตสารอะโรมาติก โดยที่ปริมาณโลหะแกลเลียม 1% โดยน้ำหนักนั้นสามารถให้ค่าการเลือกเกิดของสารผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) อะโรมาติก ได้สูงถึง 94% และยังพบว่าการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาสามารถลดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ซึ่งเป็นผลมาจากการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอน C9+ ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิส (Hydrogenolysis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title Acetone conversion to aromatic over Ga/HZSM5

Student Mr.Kornpop Intarakumhaeng
Mr.Montree Vattananiyom
Mr.Montud Thoumthong

Degree Bachelor of Science

Major Program Industrial Chemistry

Academic Year 2012

Advisor Assoc.Prof.Dr.Tawan Sooknoi

ABSTRACT

The effects of process variables namely contact time, gallium loading and type of gas on the conversion of acetone to aromatic chemicals have been investigated. After loading gallium, no significant change in crystallinity, pore size and surface area was observed suggesting an incorporation of gallium species into the zeolite framework. The reaction was carried out in a fixed bed reactor under atmospheric pressure at 673 K using nitrogen as a carrier gas for 7 hours. It was found that acetone conversion produced C5-C8 hydrocarbons, benzene, toluene, xylene, ethylbenzene and C9+ aromatics as major products. Over HZSM5, the reaction proceeded via aldol condensation of acetone to aldol products that undergoes deoxygenation to hydrocarbons in parallel with the aromatization. Gallium significantly boosts up dehydrogenation activity that promotes aromatization to C9+ aromatics. Aromatics selectivity (94%) from the reaction using 1%wt. gallium and hydrogen as carrier gas was higher than that of HZSM5 (84%). An increase in gallium content and the presence of hydrogen as carrier gas reduced deactivation of the catalyst by promoting hydrogenolysis of C9+ aromatics before the coke formation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่ายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการนี้ ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือและอนุเคราะห์ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ตะวัน สุชน้อย ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาเป็นอย่างดีในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ตลอดมา

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ ที่ช่วยในการตรวจสอบแก้ไขให้โครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ พี่นักศึกษาปริญญาโทและเอกสาขาปิโตรเคมีและเคมีของไฮโดรคาร์บอนทุกท่านที่กรุณาแนะนำสั่งสอนเป็นอย่างดี และเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำการทดลองโดยเฉพาะชุดอุปกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยาและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี(GC) และเตาเผา (Vecstar Furnace)

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาเคมี ทุกท่าน โดยเฉพาะคุณปราณี และคุณสุภัทร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบคุณ เจ้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ให้บริการการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (XRF)

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา และขอบคุณกำลังใจจากบิดา มารดา อาจารย์ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่ทำให้โครงการพิเศษนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นายกรภพ อินทรกำแหง

นายมนตรี วัฒนานิยม

นายมนทัต ท้วมทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	[I]
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	[II]
กิตติกรรมประกาศ	[III]
สารบัญ	[IV]
สารบัญรูป	[VI]
สารบัญตาราง	[IX]
บทที่ 1	
ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตงานวิจัย	3
ประโยชน์ที่ได้รับ	4
บทที่ 2	
ลักษณะทั่วไปของอะซิโตน	5
การผลิตอะซิโตนจากวิธีชีวมวล โดยการหมักมันสำปะหลัง	6
การผลิตอะซิโตนโดยวิธีไพโรไลซิส	7
ตัวเร่งปฏิกิริยา	7
การสังเคราะห์ซีโอไลด์ชนิด ZSM-5	18
การเปลี่ยนอะซิโตนไปเป็นสารอะโรมาติกโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น HZSM-5	19
การผลิตและสารอะโรมาติกส์โดยรติมโลหะที่มีหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาคีไฮโดรจิเนชัน	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
บทที่ 3	
สารเคมี	21
อุปกรณ์	21
การเตรียมสารละลายมาตรฐาน	23
การเตรียมสภาวะการทดลองและการผลิตสารอะโรมาติกจากอะซิโตน	24
การทดสอบผลิตสารอะโรมาติกจากอะซิโตน	28
การทดสอบปริมาณและชนิดของสารอะโรมาติกที่ได้	31
บทที่ 4	
การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา (Characterization)	33
การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5	36
ผลของการเพิ่มโลหะแก่เลี่ยมบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5	47
ผลของปริมาณโลหะแก่เลี่ยมบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5	58
บทที่ 5	
สรุปผลการทดลอง	60
ข้อเสนอแนะ	62
อ้างอิง	63
ภาคผนวก ก.	66
ภาคผนวกข.	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกง.

85

สารบัญรูป

รูปภาพ	หน้า
รูปภาพที่ 2.1, 2.2 โครงสร้างของอะซิโตน	5
รูปภาพที่ 2.3 Pyrolysis process	7
รูปภาพที่ 2.4 โครงสร้างของซีโอไลต์	8
รูปภาพที่ 2.5 โครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์	10
รูปภาพที่ 2.6 โครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์	10
รูปภาพที่ 2.7 ซีโอไลต์ธรรมชาติ	11
รูปภาพที่ 2.8 ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด Clinoptilolite	12
รูปภาพที่ 2.9 แนวลำแสงรับรังสีเอกซ์	17
รูปภาพที่ 3.1 ภาพการเทียบมาตรฐานปัม	25
รูปภาพที่ 3.2 การแพ็คแท่งปฏิกรณ์แก้วแบบไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา	26
รูปภาพที่ 3.3 ฟังของเครื่องชุดทำปฏิกิริยา	26
รูปภาพที่ 3.4 ที่เก็บไนโตรเจนเหลว	27
รูปภาพที่ 3.5 ชุดวัดอัตราการไหล	27
รูปภาพที่ 3.6 ส่วนบนของเฟอเนส	28
รูปภาพที่ 3.7 การแพ็คแท่งปฏิกรณ์แก้วแบบใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา	30
รูปภาพที่ 3.8 ชุดเก็บสาร	31
รูปภาพที่ 3.9 ชุดทำปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง	32
รูปภาพที่ 3.10 คอลัมน์ DB-WAX ที่อยู่ภายในเครื่อง GC	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ทำปฏิกิริยาเคมีของหน่วยงานนี้ ไปลงบอกตึกหน้าไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
รูปภาพที่ 4.1 XRD Pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 กับ 1%Ga/HZSM5 34
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปภาพที่ 4.2 (%Conversion) ของอะซีโตนกับเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C ที่เวลาสัมผัส 6.1, 12.2, 18.3 และ 24.4g.h/mol โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min	36
รูปภาพที่ 4.3 ภาพแสดงลักษณะการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5	37
รูปภาพที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ด้วย GC-FID และ GC-MS	39
รูปภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ (%Yield) กับเวลาสัมผัส 6.1, 12.2, 18.3 และ 24.4 g.h/mol ที่ชั่วโมงที่ 1 ของการทำปฏิกิริยาผ่าน HZSM5 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min	41
รูปภาพที่ 4.6 ลำดับการเกิดสารผลิตภัณฑ์ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5	46
รูปภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละการเปลี่ยนแปลง(%Conversion) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาของHZSM5 กับ 1%Ga/HZSM5 ที่เวลาสัมผัส 18.3 g.h/molที่อุณหภูมิ 400 °C โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่ อัตราการไหล 30 ml/min	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลง(%Conversion) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาของการทำปฏิกิริยาผ่าน0.5%Ga/HZSM5 ที่ใช้แก๊สไนโตรเจน และไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C	49
รูปภาพที่ 4.9 แสดงสมการปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวของเนฟทาซีน โดย	50
รูปภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ (%Yield) กับเวลาสัมผัส 6.1, 12.2, 18.3 และ 24.4g.h/mol ที่ชั่วโมงที่ 1 ของ 1% Ga/HZSM-5 ที่อุณหภูมิ 400C° โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min	53
รูปภาพที่ 4.11 ลำดับการเกิดสารผลิตภัณฑ์ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาGa/HZSM5	55
รูปภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือกเกิด(%Selectivity) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา 1%Ga/HZSM5 โดยน้ำหนักอุณหภูมิ 400 °C โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min	56
รูปภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือกเกิด(%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์เทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ปริมาณโลหะแกลเลียม 0.5%, 1% และ 2% โดยน้ำหนัก เวลาสัมผัส 18.3 g.h/molที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางคุณสมบัติอะซิโตน	5
ตารางที่ 3.1 ตารางการเตรียมสารละลายมาตรฐาน	23
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสภาวะของเครื่อง GC	23
ตารางที่ 3.3 ตารางผลการคำนวณโลหะแกลเลียม	30
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลของการหาปริมาณที่แท้จริงของโลหะแกลเลียมที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ผ่านเทคนิค X-Ray Fluorescence ปริมาณ 0.5%, 1% และ 2% โดยน้ำหนัก	33
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลของพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET surface	35
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ประมาณ 60% ที่เวลาสัมผัสต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5	40
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา	48
ตารางที่ 4.5 ตารางผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของโค้กในตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 ที่ใช้แก๊สพาต่างกันด้วยเทคนิค TGA	50
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) เปรียบเทียบระหว่าง	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะแก๊สพาไฮโดรเจนกับไนโตรเจน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ประมาณ 88% ที่เวลาสัมผัสต่างๆ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5เติม โลหะแกลเลียม 1% โดยน้ำหนัก	57
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ที่ปริมาณโลหะแกลเลียม 0.5, 1 และ 2% โดยน้ำหนัก	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1) ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันสารอะโรมาติก (Aromatic) มีความต้องการนำไปใช้ในปริมาณสูง โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมพอลิเมอร์ และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี แต่สารอะโรมาติกนั้นในปัจจุบันสามารถหาได้จากอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งน้ำมันดิบนั้นเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดและกำลังจะหมดไป จึงได้ทำการศึกษาค้นหาแหล่งทดแทนโดยได้ทำการศึกษาการใช้อะซิโตน (Acetone) เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารอะโรมาติก เนื่องจากอะซิโตนนั้นสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก ทั้งยังเป็นสารที่สามารถสังเคราะห์ได้จากการหมัก หรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) ชีวมวล

กระบวนการไพโรไลซิสนับว่าเป็นกระบวนการเริ่มต้นซึ่งโดยทั่วไปขั้นตอนโดยรวมนั้นเริ่มจากกระบวนการทำแห้งโดยชีวมวลวัตถุดิบที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่มีความชื้นผ่านอุณหภูมิประมาณ 120–150 °C หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสโดยชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 500–600 °C เพื่อทำลายพันธะทางเคมีของโมเลกุลซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สต่างๆ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน, และไฮโดรเจนและผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถกลั่นตัวได้เช่น น้ำ, กรดอะซิติก, กรดฟอร์มิก, อะซิโตน, เมทานอล, เมทิลอะซิเตทและฟีนอล เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการใช้สารตั้งต้นเป็นอะซิโตนในการทำปฏิกิริยา โดยทำปฏิกิริยาผ่านปฏิกิริยาแอลดอลคอนเดนเซชัน (Aldol Condensation) ของอะซิโตน จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) เปลี่ยนเป็นอะโรมาติก ซึ่งงานวิจัยที่นี้พบว่าสารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีบางส่วนเป็นแก๊สไฮโดรคาบอนที่ไม่ต้องการ เช่น แก๊สมีเทน, อีเทนและโพรเพน เป็นต้น ทำให้ได้สารอะโรมาติกที่ต้องการลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 โดยเติมโลหะแกลเลียม (Galium) เข้าไปเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา ให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะโรมาติกเพิ่มขึ้นซึ่งได้ทำการศึกษาอิทธิพลและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชันของอะซิโตนไปเป็นอะโรมาติกโดยทำการศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เวลาสัมผัส 6.1g.h/mol, 12.2g.h/mol, 18.3g.h/mol และ 24.4g.h/mol อุณหภูมิ 400 °C ด้วยแก๊สตัวพา 2 ชนิดคือ ไนโตรเจนและไฮโดรเจนที่อัตราการไหล 30 ml/min จากนั้นทำการศึกษาค่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เติมโลหะแกลเลียมปริมาณ 0.5 , 1 และ 2 % โดยน้ำหนักด้วยสภาวะเช่นเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและความเสถียรของกระบวนการผลิต

1.2) วัตถุประสงค์

1.2.1) เพื่อทดสอบความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

- ความสามารถในการผลิตสารอะโรมาติก
- อัตราการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา
- กลไกในการผลิตสารอะโรมาติกที่ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

1.2.2) เพื่อทดสอบความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เติมโลหะแกลเลียม

- ผลของโลหะแกลเลียมในการผลิตสารอะโรมาติก
- ผลของปริมาณโลหะแกลเลียมต่อปริมาณผลิตภัณฑ์อะโรมาติก
- กลไกในการผลิตสารอะโรมาติกที่ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมโลหะแกลเลียม

1.2.3) ผลของการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาต่ออัตราการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่เติมโลหะแกลเลียม

1.3) ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1) ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ของอะซิโตนและ ค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารอะโรมาติก
- ทดสอบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เวลาสัมผัส 6.1g.h/mol, 12.2g.h/mol, 18.3g.h/mol และ 24.4g.h/mol
 - ทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เติมโลหะแกลเลียมปริมาณ 0.5, 1 และ 2 % โดยน้ำหนัก
 - ทดสอบที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 400°C
 - ทดสอบด้วยแก๊สตัวพาไฮโดรเจนที่อัตราการไหล 30 ml/min
 - ทดสอบด้วยแก๊สตัวพาไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30 ml/min
- 1.3.2) ตรวจสอบวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่อง GC โดยใช้ Detector คือ FID
- 1.3.4) ตรวจสอบวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่อง GC-MS เพื่อวิเคราะห์และยืนยันสารในผลิตภัณฑ์
- 1.3.3) ตรวจสอบวิเคราะห์โค้กในตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้งานเพื่อศึกษาเสถียรภาพของโค้กด้วยเทคนิค TGA
- 1.3.5) ตรวจสอบวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRF เพื่อวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยา
- 1.3.6) ตรวจสอบวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 1.3.7) ตรวจสอบวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับของก๊าซ (Gas Adsorption (BET)) เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4) ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1) กระบวนการผลิตอะโรมาติกจากปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชันของอะซิโตนด้วยมีประสิทธิผลภาพมากขึ้น
- 1.4.2) พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาHZSM5ให้มีความสามารถ และความเสถียรมากขึ้นในการทำปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชันของอะซิโตน
- 1.4.3) ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชันของอะซิโตนเพื่อสังเคราะห์สารอะโรมาติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อะซิโตน

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของอะซิโตน

อะซิโตน (อังกฤษ: acetone มีชื่ออีกหลายชื่อดังนี้ propanone, dimethyl ketone, 2-propanone, propan-2-one และ beta-ketopropane) เป็นสารเคมีที่พื้นฐานที่สุดของคีโตน (ketone)

อะซิโตน เป็นของเหลวที่ระเหยง่าย ไม่มีสีมีจุดหลอมเหลวที่ $-95.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ และจุดเดือดที่ $56.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ เท่ากับ 0.819 (ที่ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) ละลายได้ดีใน น้ำ เอทานอล อีเทอร์ ฯลฯ และเป็นตัวทำละลายที่สำคัญมาก การใช้งานอะซิโตนที่คุ้นเคยกันมากที่สุดคือใช้ในน้ำยาล้างเล็บ อะซิโตน ยังใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม พลาสติก ไฟเบอร์ ยา และ สารเคมีอื่นๆ



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของอะซิโตนรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของอะซิโตนแบบ 3 มิติ

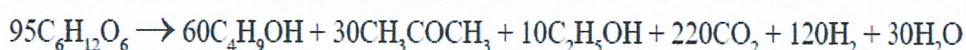
ตารางที่ 2.1 ตารางคุณสมบัติอะซิโตน

คุณสมบัติ	
สูตร โมเลกุล	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$
มวล โมเลกุล	58.08 g mol^{-1}
ลักษณะทางกายภาพ	Colorless liquid

ความหนาแน่น	0.79 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	-94.9 °C, 178 K, -139 °F
จุดเดือด	56.53 °C, 330 K, 134 °F
ความสามารถละลาย ได้ในน้ำ	miscible
ความหนืด	0.32 cP at 20 °C

2.1.2 การผลิตอะซิโตนจากวิธีชีวมวลโดยการหมักมันสำปะหลัง¹

วิธีนี้เป็นการผลิตอะซิโตนโดยใช้แป้งมันสำปะหลังและมันสดเป็นวัตถุดิบ ชั้นแรกนำแป้งมันสำปะหลังและมันสดถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็นน้ำตาลกลูโคส หลังจากนั้นจึงทำการหมักน้ำตาลกลูโคสที่ได้โดยใช้แบคทีเรีย *Cl. Butylivum* NRRL B592 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการหมักแบบไม่ต่อเนื่องของแป้งมันสำปะหลังและมันสด พบว่าที่อุณหภูมิ 30-35 deg c pH 5.5-6.5 และความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ใช้ในการหมัก 50 กรัม/ลิตร ให้ความเข้มข้นรวมของตัวทำละลายเท่ากับ 12.56, 14.64 กรัม/ลิตร ตามลำดับ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและอัตราการสร้างตัวทำละลายจำเพาะของแป้งมันสำปะหลังและมันสดเท่ากับ 0.247, 0.174 /ชั่วโมง และ $0.090 \cdot 10^{**(-12)}$, $0.032 \cdot 10^{**(-12)}$ กรัม/จำนวนเซลล์-ชั่วโมง ตามลำดับ และยังพบว่า การหมักแบบต่อเนื่อง ให้ความเข้มข้นรวมของตัวทำละลาย 2.9 กรัม/ลิตร ด้วยอัตราการผลิต 0.44 กรัม/ลิตร-ชั่วโมง ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราการผลิตแบบ ไม่ต่อเนื่อง 2.2 เท่าที่สภาวะการหมักเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือเผยแพร่เอกสารฉบับนี้โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*สมการแสดงปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็น Acetone

2.1.3 การผลิตอะซิโตนโดยวิธีไพโรไลซิสⁱⁱ

เราผลิตอะซิโตนด้วยวิธีไพโรไลซิสโดยการนำวัตถุดิบชีวมวลที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่มีความชื้นประมาณร้อยละ20–30โดยน้ำหนักผ่านอุณหภูมิประมาณ 120–150C หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสโดยชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ500 – 600 C เพื่อทำลายพันธะทางเคมีของโมเลกุลซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สต่างๆ ได้แก่คาร์บอนมอนอกไซด์,มีเทน,และไฮโดรเจนและผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถกลั่นตัวได้เช่นน้ำ,กรดอะซิติก,กรดฟอร์มิก,เมทานอล,เมทิลอะซิเตท,ฟีนอลและอะซิโตนที่เราต้องการรวมทั้งพวกทาร์และชาร์หลังจากนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นไปอีกจนมีอุณหภูมิประมาณ900–1,100 C ประกอบกับมีการเติมตัวออกซิไดซ์ให้แก่ระบบจะทำให้ทาร์และชาร์เกิดการแตกตัวได้ผลิตภัณฑ์แก๊สต่อไปซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั่นเอง



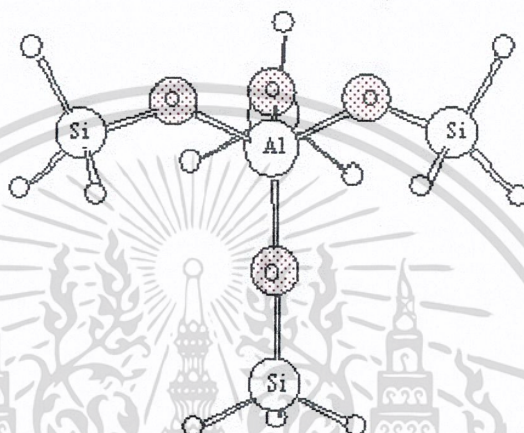
รูปที่ 2.3 Pyrolysis process

2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2.1 คุณสมบัติของซีโอไลต์ (zeolite)

ซีโอไลต์คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตหน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สูงจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (เตตระฮีดรอล) โดยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบไม่ว่ากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

ด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่ง โครงสร้างสามเหลี่ยมที่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมใช้ ออกซิเจนร่วมกันก่อให้เกิดเป็น โครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่าง โมเลกุล ทำให้ซี โอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร)



รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ เป็นสารในรูปแร่ลูมิโนซิลิเกตชนิดหนึ่งที่มีสมบัติดูดน้ำได้ดี ดังนั้นเมื่อนำไปใช้ โดยใส่ลงไปในดินจึงช่วยให้ดินมีความสามารถอุ้มน้ำได้สูงขึ้น และทำให้พืชที่ปลูกสามารถใช้น้ำในดินได้ขึ้น นอกจากนั้นซีโอไลต์ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่มีคุณค่าอีกหลายประการ เช่น มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงมากรวมทั้งความสามารถในการดูดซับ โมเลกุล สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นสารที่ไม่มีพิษภัยหรือสารพิษต่างๆที่อาจก่อให้เกิดภาวะปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม

ซีโอไลต์นั้นมีมากกว่า 600 ชนิดซึ่งความแตกต่างในโครงสร้างนี้มีผลต่อสมบัติต่างๆของซีโอไลต์ เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่นขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น การจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้นอาศัยขนาดและรูปร่างของ โพรงซีโอไลต์เป็นหลัก ซึ่งจะทำให้หน้าซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันไป

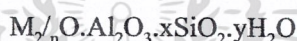
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นแร่ที่ประกอบด้วย ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีน้ำผลึกของ โลหะอัลคาไลน์ หรือโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทซึ่งโดยมากจะเป็น โลหะโซเดียม, โพแทสเซียม, แมกนีเซียม, แคลเซียม, สตรอนเชียมและเบเรียม โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็น โครงสร้าง 3 มิติ

ของอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ซึ่งประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกตโดยมีการเชื่อมต่อของอะตอมออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือเป็น โคลอติเมอร์

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์เป็นดังนี้



n = คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) โดยมาก เท่ากับ 1 และ 2 ของโลหะอัลคาไล หรือ โลหะอัลคาไลน์เอิร์ทตามลำดับ

x = คือ จำนวน โมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

y = คือ จำนวน โมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

โครงสร้างซีโอไลต์แบ่งออกเป็น

2.2.1.2 โครงสร้างปฐมภูมิ

SiO_4 และ AlO_4 แต่ละหน่วย จะจัดเรียงตัวในลักษณะรูปทรงสี่หน้า(เตตระฮีดรอล) เชื่อมต่อกัน โดยอะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางส่วนอะตอมของออกซิเจนอยู่ที่จุดยอดมุมสามเหลี่ยมทรงสี่หน้า

2.2.1.3 โครงสร้างทุติยภูมิ

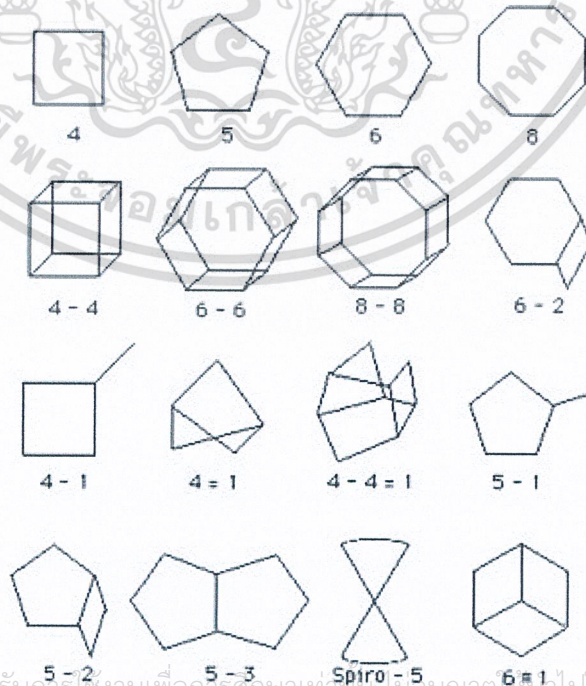
จะเกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิแต่ละหน่วยมาเชื่อมต่อกัน โดยอาศัยจุดยอดมุมทั้งสี่เป็นจุดเชื่อมต่อ เพื่อให้ได้เป็น โครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น โครงสร้างที่เกิดจากโครงสร้างชั้นปฐมภูมิมาเชื่อมต่อกันเป็นวงขนาดเล็กในรูปแบบต่างๆกันเช่น สี่เหลี่ยม ห้าเหลี่ยม และแปดเหลี่ยมโดยเป็นวงเดี่ยว หรือวงซ้อนก็ได้ เรียกว่า โครงสร้างทุติยภูมิ

2.2.1.4 โครงสร้างรูปทรงหลายหน้า

เมื่อนำโครงสร้างทศนิยม มาเชื่อมต่อกันจะเกิดเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่ ซีโอไลต์ต่างชนิดกันจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ทำให้คุณสมบัติของซีโอไลต์นั้นๆ มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ด้วยองค์ประกอบอีกส่วนหนึ่งของซีโอไลต์ คือ ไอออนบวก ซึ่งทำหน้าที่ดุลประจุลบที่เกิดจากอะลูมิเนียมในรูปทรงหลายหน้า เมื่ออะลูมิเนียมที่มีประจุบวกสามเข้ามาแทนที่ซิลิกอนที่มีประจุบวกในทรงสี่หน้า จึงจำเป็นต้องมีประจุบวกจากภายนอกเข้ามาดุลประจุ ซึ่งทำให้ซีโอไลต์มีคุณสมบัติเป็นกรด

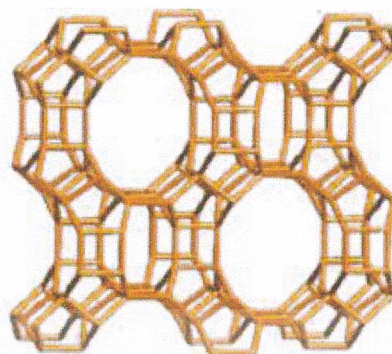


รูปที่ 2.5 แสดงหน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตระะฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดต่อและต่อท้ายถึงแม้ว่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างทศนิยมของซีโอไลต์



รูปที่ 2.7 แสดงซีโอไลต์ธรรมชาติ

2.2.1.5 คุณสมบัติของซีโอไลต์

เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์ที่เป็นแบบเปิดประกอบด้วยช่องว่าง และการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก ซึ่งมีแคทไอออน และ โมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ภายใน โดยสามารถแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนอื่นได้ คือมีคุณสมบัติเป็น ไอออนเอ็กซ์เชนจ์นำไปใช้ขบวนการและกำจัดน้ำออกนอกจากนี้ โลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ปรีท แคดเมียม ซิลเวอร์ ไอออนก็สามารถแลกเปลี่ยนได้ เช่นเดียวกันและยังแสดงคุณสมบัติเป็น สารดูดซับที่ดีสามารถแยกแก๊สและ ไอของผสม เช่น แอมโมเนีย ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ด้วย เนื่องจากโครงสร้าง โมเลกุลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน

โครงสร้าง โมเลกุลของซีโอไลต์จะมีความสัมพันธ์กับสมบัติต่างๆ ดังนี้

1. ความสามารถในการดูดน้ำ
2. ความหนาแน่นของปริมาตรเมื่อทำการคายน้ำ
3. เสียรภาพของ โครงสร้าง
4. คุณสมบัติของการแลกเปลี่ยน โปรตรอน

5. ขนาดช่องว่างของโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าห้ามหรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

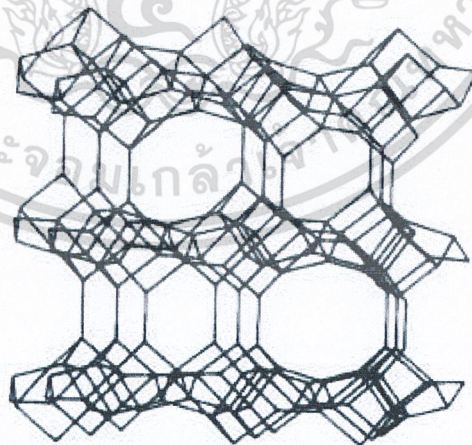
6. คุณสมบัติทางกายภาพ

7. การดูดซับแก๊สและไอ

2.2.1.6 ชนิดของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ ซีโอไลต์ที่พบตามธรรมชาติ (natural or mineral zeolite) และที่สังเคราะห์ขึ้น (synthetic zeolite) ซีโอไลต์แต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ที่พบตามธรรมชาติมีมากกว่า 35 ชนิด ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นมีถึงประมาณ 100 ชนิด

2.2.1.6.1 ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Mineral zeolites or Naturally occurring zeolites) ซึ่งส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ เป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของโมโนหรือไดวาเลนต์เบส (mono and divalent bases) อาจมีการสูญเสียผลึกบางส่วนหรือทั้งหมด โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างซีโอไลต์ธรรมชาติเดิมนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง ในทางอุตสาหกรรมใช้เป็นตัวกรองในอุตสาหกรรมกระดาษ หลังจากได้ค้นพบคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนจึงได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมแยกก๊าซธรรมชาติและแยกแอมโมเนียในขบวนการกำจัดน้ำทิ้ง



รูปที่ 2.8 แสดงซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด clinoptilolite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.6.2 ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (synthetic zeolite) เกิดจากการทำปฏิกิริยาเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot Na_2O$ และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ที่มีน้ำในผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่เป็นเจล (gelatin) จนถึงรูปที่เป็นรูพรุน (porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (sandlike) ได้แก่ Zeolite A, Zeolite Y, Zeolite F, Zeolite M เป็นต้น

2.2.1.7 ประโยชน์ของซีโอไลต์

2.2.1.7.1 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น ไฮโดรจิเนชันแอลคิลเลชันอะโรมาไทเซชัน และ ไอโซมาไรเซชัน เป็นต้น

2.2.1.7.2 ใช้เป็น Sorption agent เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถ ดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาดและ โครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด เช่น ใช้ในขบวนการยับยั้งของแก๊สธรรมชาติแยก CO_2 และสารประกอบซัลเฟอร์จากแก๊สธรรมชาติแยกสารที่ทำให้เกิดสาร มลภาวะ เช่น SO_2 , NO_2 และ O_2 จากอากาศ เป็นต้น

2.2.1.7.3 ซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออนได้จึงช่วยลดความกระด้างของน้ำ

2.2.1.7.4 จากคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเรซิน เพื่อแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกของซีโอไลต์

พฤติกรรมของการแลกเปลี่ยนไอออนบวกจะขึ้นอยู่กับ

- ธรรมชาติของไอออนบวก เช่น ขนาด ประจุ
- อุณหภูมิ
- ความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลาย
- ชนิดของไอออนบวกที่รวมตัวกับไอออนบวกในสารละลาย

- ตัวทำละลาย (การแลกเปลี่ยนส่วนมากเกิดขึ้นได้ดีใน Aqueous solution)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าจะโดยวิธีใดก็ตาม ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลักษณะ โครงสร้างของซีโอไลต์

2.2.1.7.5 ใช้เป็น Detergent builder ซีโอไลต์เป็นที่นิยมในต่างประเทศที่เจริญแล้ว โดยใช้เป็นส่วนผสมของผงซักฟอกเนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับทำผงซักฟอก คือมีค่า Capacity และ Kinetics ซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยน ไอออนบวกเป็นไปได้อย่างมากและเร็ว นอกจากนี้

ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วย ซึ่งฟอสเฟตทำให้พีชน้ำหรือพวกสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้มีปัญหาในการกำจัดและเมื่อมีการตายแล้วทับถมกันเข้าจึงทำให้ น้ำเน่าเสียและสัตว์น้ำที่จำเป็นลดจำนวนลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย โครงสร้างของซีโอไลต์เป็นแบบเปิดประกอบไปด้วย channel หรือ interonected void จำนวนมาก ซึ่งมีไอออนบวกและโมเลกุลของน้ำเกาะเชื่อมอยู่ภายใน ไอออนบวกนี้สามารถเปลี่ยนกับไอออนบวกอื่นได้ คือมีคุณสมบัติเป็น ion exchanger เมื่อ โมเลกุลของน้ำผ่านเข้ามาในช่องว่างทำให้ไอออนที่อยู่ในสารละลายสามารถแลกเปลี่ยนกับ ไอออนที่อยู่ใน โครงสร้าง ได้คุณสมบัติ ดังกล่าว นำไปใช้ในกระบวนการ water softening และ water tretment ฏิกิริยานี้ซีโอไลต์ จะแลกเปลี่ยน Na^+ กับ Ca^{+2} ที่มีอยู่ในน้ำกระด้าง ในขณะที่ปล่อยให้ น้ำกระด้าง ไหลผ่านเม็ดของซีโอไลต์ ดังนั้นน้ำที่ผ่านออกมาจะมีปริมาณ Na^+ เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการป้องกันการเกิดตะกรันขึ้น นอกจากนี้ โลหะหนักอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม ซิลเวอร์ ไอออนก็สามารถแลกเปลี่ยน ได้เช่นเดียวกัน

ซีโอไลต์ เมื่อได้รับความร้อน โมเลกุลของน้ำภายในช่องว่างจะหลุดออกมาและน้ำจะระเหยออกมาอย่างต่อเนื่องโดยโครงสร้าง โมเลกุล (Dehydrated structure) ไม่เปลี่ยนแปลงหรือยุบสลายหลังจากที่มีการ dehydration แล้วช่องว่างใน โครงสร้าง โมเลกุลสามารถถูกเติมด้วยน้ำได้ เช่นเดิมซึ่งเรียกว่า reversible dehydration

ซีโอไลต์ ได้ชื่อว่าเป็น Molecular sieve เนื่องจาก โมเลกุลมีช่องว่างที่สม่ำเสมอจำนวนมาก ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติคล้าย sieve บน โมเลกุลที่มีช่องว่างที่สม่ำเสมอ

2.2.1.8 การตรวจสอบซีโอไลต์

2.2.1.8.1 สีของซีโอไลต์ ความเป็นจริงแล้วตัวอะลูมิเนียมซิลิเกต $\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_3$ ซึ่งเป็นแร่ที่มีคุณสมบัติเป็นซีโอไลต์ขาวบริสุทธิ์ เช่น ที่ใช้ในผงซักฟอกยี่ห้อเปาปุ้นจิ้น แต่ซีโอไลต์ที่เรานำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เรานำมาจากธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์ของ Al_2O_3 และ SiO_2 อยู่ประมาณ 65-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยที่เรากำลังศึกษาอยู่ เป็นความลับที่มีค่า ไม่ควรเปิดเผยให้ผู้อื่นได้ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้วิจัยที่รับผิดชอบงานวิจัยนี้

โอไลต์ เช่น สีนํ้าตาลจะเกิดออกไซด์ของเหล็ก เพราะฉะนั้นสีจึงไม่ใช่ตัวบ่งบอกว่าซีโอไลต์นั้นเป็นของจริงหรือของปลอม มีประสิทธิภาพดีหรือไม่ดี

2.2.1.8.2 ความฟูหรือความหนักเบาของซีโอไลต์ ก็ไม่ได้บ่งบอกถึงความแท้และประสิทธิภาพของซีโอไลต์ เพราะประสิทธิภาพของซีโอไลต์จะวัดเป็นความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกต่อนํ้าหนักซีโอไลต์ (C.E.C.) ซีโอไลต์ปีนแร่ประเภท “หิน” จึงมีนํ้าหนักพอสมควรไม่เบาหรือฟูตามที่เข้าใจกัน

2.2.1.8.3 การปลอมปนซีโอไลต์ในท้องตลาดนั้นมิจริง โดยการนำเอาดินพวกที่ใช้ทำเซรามิก ดินเผา เทคัม ดินขาว เบนโทไนท์ หรือพวกวัสดุมาบรรจุขาย

2.2.1.8.4 การตรวจสอบโดยการเอ็กซ์เรย์ (X-Ray Diffraction) เท่านั้นที่จะบอกได้ว่าเป็นซีโอไลต์แท้ และมีโครงสร้างเป็นชนิดใด

2.2.1.8.5 การวัดคุณสมบัติในการลดปริมาณแอมโมเนียในนํ้า โดยซีโอไลต์ที่ดีจะลดปริมาณแอมโมเนียได้มากกว่า และมีค่าเป็นกลางไม่มีผลต่อพีเอช

2.2.1.9 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) การดูดซับเป็นขบวนการที่โมเลกุลของสารที่เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ซึ่งในตัวกลางใดๆ ไปเกาะบนผิวของสารอีกชนิดหนึ่งถูกนำไปอยู่ในตัวกลางนั้น เรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbant)

การดูดซับมี 2 ชนิด

2.2.1.9.1 Physical Adsorption

เป็นการดูดซับที่สารถูกดูดซับเกาะที่ผิวของตัวดูดซับด้วยอันตรกิริยาที่อ่อน หรือแรงแวนเดอร์วาลส์และ electrostatic เกิดได้ง่ายใช้พลังงานในการทำให้เกิดการดูดซับน้อย สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ

2.2.1.9.2 Chemical Adsorption

เป็นการดูดซับทางเคมี ที่โมเลกุลของตัวดูดซับทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของตัวถูกดูดซับ โดยสร้างพันธะเคมี ทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้นและเกี่ยวข้องกับการ transfer of electron ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ พลังงานที่ทำให้เกิดการดูดซับทางเคมีมีค่าสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ คือ มีค่าประมาณ -200 kJ/mol ปริมาณการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ หลายประการ คือ พื้นที่จำเพาะของของแข็ง ความเข้มข้นที่สมดุลของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายสามารถเกิดในอุณหภูมิสูงกว่าที่เกิด physical adsorption และแรงที่เกี่ยวข้องก็มากกว่า

2.2.1.10 คุณสมบัติที่มีผลต่อการดูดซับ

2.2.1.10.1 พื้นที่ผิวจำเพาะสำหรับการดูดซับ

2.2.1.10.2 ใช้สารดูดซับต้องคุณสมบัติในการชอบสารประกอบโพลาร์หรือนอนโพลาร์

2.2.1.10.3 การดูดซับจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับก๊าซและสารละลายที่ต้องการจับ

2.2.1.10.4 ความจุของสารดูดซับควรมีค่าแน่นอน และสูงกว่าปริมาณก๊าซและสารละลายที่ต้องการจับแต่หลังจากที่เต็มความจุของมันแล้ว ก๊าซและสารละลายจะดูดซับเพียงบางส่วนจนอิ่มตัวแล้วจะไม่ดูดซับก๊าซและสารละลาย

2.2.1.10.5 อุณหภูมิในการดูดซับ ประสิทธิภาพจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำ โดยเฉพาะก๊าซที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ไม่สามารถดูดซับได้ สมบูรณ์ที่อุณหภูมิปกติ แต่การให้ความเย็นจะเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดี

การศึกษาการดูดซับโดยใช้ซีโอไลต์ที่กำลังได้รับความนิยมมาก เพราะซีโอไลต์มีคุณสมบัติในการดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออน จึงได้มีการใช้ซีโอไลต์ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากสารปนเปื้อนต่างๆ เป็นอย่างมาก และเนื่องจากซีโอไลต์สังเคราะห์นั้นมีราคาสูงมาก จึงมีการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติกันมากขึ้นแต่ในซีโอไลต์ธรรมชาตินั้นไม่บริสุทธิ์ 100% และที่มีขายตามท้องตลาดไม่สามารถรู้ได้ว่าเป็นซีโอไลต์ชนิดไหนคั้งนั้นจึงมีการศึกษา โครงสร้างและชนิดของซีโอไลต์

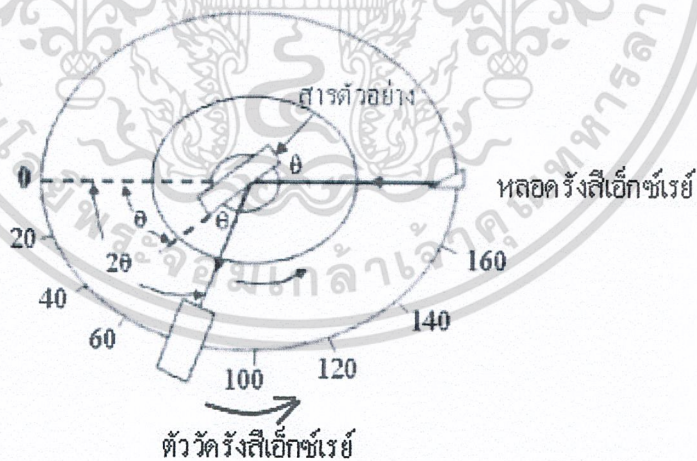
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีเมอร์โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน การวิเคราะห์ธาตุในสารประกอบที่มีรูปผลึกในสารตัวอย่างที่เป็นผงด้วยเทคนิค X-ray diffraction (X-ray powder diffraction analysis)

รังสีเอกซ์เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหลายมีช่วงคลื่นแตกต่างกันมาก นับจากคลื่นวิทยุซึ่งเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นยาวหลายพันเมตร ต่อเนื่องไปจนถึงรังสีคอสมิกซึ่งเป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นนับเป็นเศษส่วนของล้านล้านเมตร (10-12) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่เหมือนกันอยู่หลายประการ

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หมายถึงกระบวนการที่อนุภาคในผลึกกระเจิง (scatter) รังสีเอกซ์ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ใช้รูปแบบของการกระเจิงหรือการเลี้ยวเบนที่ได้นี้ในการหาการจัดเรียงตัวของอนุภาคในผลึก

หลักการของเทคนิคนี้สารตัวอย่างที่ถูกบดเป็นผงละเอียดและถูกวางไว้ในแนวลำแสงรับรังสีเอกซ์ที่จะไปกระทบบนผงสารตัวอย่างซึ่งทำมุม θ ต่อลำรังสีเอกซ์ ลำรังสีเอกซ์จะหักเหออกจากผงสารตัวอย่างเป็นมุม 2θ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2.9 แสดงแนวลำแสงรับรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

2.2.2.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากไดอะทอมไมต์ⁱⁱⁱ

เราสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากไดอะทอมไมต์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลโดยสังเคราะห์โพพิล-แอมโมเนียมโบรไมด์ (TPABr) เป็นสารโครงสร้าง ทำการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาอะลูมินา 20-100 อัตราส่วนโดยโมลของไฮดรอกไซด์ต่อซิลิกา 0.35 และ 0.45 อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 200, 210 และ 220 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 และ 3 บรรยากาศของไนโตรเจน และระยะเวลาที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาทิจากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จาก ไดอะทอมไมต์คืออัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 80 เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของไฮดรอกไซด์ต่อซิลิกา 0.35 อุณหภูมิไฮโดร-เทอร์มัล 210 องศาเซลเซียสและความดันเริ่มต้น 3 บรรยากาศของไนโตรเจน โดยสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ได้ 88 % และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 142 ตารางเมตรต่อกรัม

2.2.2.2 การพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5^{iv}

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยทั่วไปประกอบ 3 ขั้นตอนใหญ่ กล่าวคือ การเตรียมอสัญฐานเจล Hydrothermal Treatment และ Calcination Hydrothermal Treatment เป็นการดำเนินการภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง ขั้นตอนนี้ใช้เวลานานที่สุดเมื่อเทียบกับการเตรียมอสัญฐานเจล และการ Calcination ดังนั้น โครงการนี้จึงมุ่งศึกษาการลดเวลาที่ใช้ในขั้นตอน Hydrothermal Treatment เพื่อลดต้นทุนการผลิตซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ในที่นี้ตัวแปรคืออัตราการให้ความร้อน โดยอัตราที่ใช้คือ 1.2, 1.6, 2.0 และ 2.5 องศาเซลเซียส/นาทิจากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 160 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราช่วงหลัง (จาก 160 องศาเซลเซียส ถึง 210 องศาเซลเซียส) เป็น 0.2 องศาเซลเซียส/นาทิจและอัตรา 1.6, 2.0 และ 2.5 องศาเซลเซียส/นาทิจ (จาก 30 องศาเซลเซียส ถึง 210 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิในอุณหภูมิ 2 ช่วง ได้แก่ อุณหภูมิช่วงแรก และช่วงหลัง ทั้งนี้โดยควบคุมอัตราส่วนโมลของ Si/Al แรกเริ่มที่ 40:1 โดยมี pH ของสารละลายที่ใช้เท่ากับ 10 และอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการ Calcination เท่ากับ 540 องศาเซลเซียส และ 3.5 ชั่วโมง

โดยลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถเตรียมได้โดยใช้อัตราการให้ความร้อนทุกค่ายกเว้นที่ 1.2 องศาเซลเซียส/นาทิจ (โดยควบคุมอัตราช่วงหลังที่ 0.2 องศาเซลเซียส/

นาที) และเวลาที่ใช้ในขั้นตอน Hydrothermal Treatment สามารถลดลงจาก 5.5 ชั่วโมงลงเหลือ 1.2 ชั่วโมงได้โดยใช้อัตรา 2.5 องศาเซลเซียส/นาที ทั้ง 2 ช่วงอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามที่อัตรา 2 องศาเซลเซียส/นาที ทั้ง 2 ช่วงอุณหภูมิให้ปริมาณซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สูงสุด และผลึกที่ได้มีสมบัติทางกายภาพสม่ำเสมอที่สุด

2.3 ปฏิกริยาผลิตสาร Monoaromatic

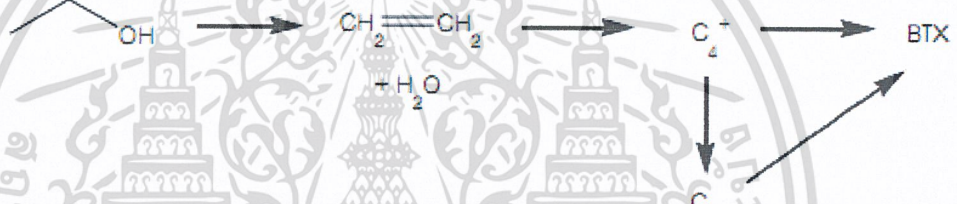
2.3.1 การเปลี่ยนอะซิโตนไปเป็นสารอะโรมาติกโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกริยาเป็น HZSM-5

ในปัจจุบันเราสามารถผลิตสารอะโรมาติก(Aromatic) ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบที่มาจากซากพืชซากสัตว์ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่จำกัด จึงมีการคิดค้นหาทางเลือกในการผลิตสารอะโรมาติก ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยา HZSM-5 มาทำปฏิกริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ภายใต้สภาวะที่มีความดันเพื่อเปลี่ยนอะซิโตน(Acetone) เป็นสารอะโรมาติกจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิ,ความเร็วสัมพัทธ์(space velocity),การเพิ่มของน้ำและสัดส่วนของ Si/Al ในตัวเร่งปฏิกริยามีผลต่อการเปลี่ยนอะซิโตนไปเป็นสารอะโรมาติกเมื่อพิจารณาถึงความสามารถของตัวเร่งปฏิกริยา HZSM-5 พบว่า รูปร่างของตัวเร่งปฏิกริยา HZSM-5 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารอะโรมาติก มากและสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำปฏิกริยาอะโรมาไทเซชันคือที่ อุณหภูมิ 673 เคลวิน โดยที่สเปซเวโรซิตี อยู่ที่ 4 h⁻¹ซึ่งที่สภาวะนี้จะได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (Conversion) 100% และได้ค่าการเลือกเกิด (selectivity) ที่ประมาณ 71% และน้ำไม่มีผลต่อปฏิกริยาด้วยและอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญคือสัดส่วนของ Si/Al ในตัวเร่งปฏิกริยาพบว่าภายใต้การเกิดปฏิกริยาที่สภาวะที่อุณหภูมิเท่ากับ 673K สเปซเวโรซิตี ที่ 4 h⁻¹เป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง และสัดส่วนของ Si/Al ในตัวเร่งปฏิกริยาที่ 25 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสารมากกว่าสัดส่วนของ Si/Al ที่ 75 กับ 100 ซึ่งหมายถึงค่าความเป็นกรดมีผลต่อการเปลี่ยน อะซิโตนไปเป็นสารอะโรมาติก

2.3.2 การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงและสารอะโรมาติกส์โดยรเติมโลหะที่มีหน้าที่ในการเร่งปฏิกริยาดีไฮโดรจิเนชัน

“การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงและสารอะโรมาติกส์จากเอทานอล” คือการนำทรัพยากรที่มีอยู่ภายในประเทศ หรือผลิตได้ภายในประเทศคือ เอทานอลมาใช้ประโยชน์ในการเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงและสารอะโรมาติกส์ เพื่อลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ โดยมุ่งเน้นการศึกษา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมซึ่งจะใช้เปลี่ยนเอทานอลให้เป็นสารอะโรมาติกส์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM5 ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเติมโลหะที่มีหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) เช่น แพลททินัม (Platinum, Pt) แกลเลียม (Gallium, Ga) และเงิน (Silver, Ag) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับการปรับปรุงนี้มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเบาให้เป็นสารอะโรมาติกส์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่าอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) และเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM5 ที่มีเพียงตำแหน่งกรดเป็นตำแหน่งที่ว่างไว้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา (HZSM5)



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังต่อไปนี้

ในขั้นตอนเอทานอลจะเกิดปฏิกิริยาการกำจัดน้ำ (Dehydration) เกิดเป็นเอททิลีน (C₂) และน้ำ จากนั้นเอททิลีนสามารถเกิดปฏิกิริยาโพลิโกเมอร์ไรเซชัน (Oligomerization) เกิดเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (C₄⁺) ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนี้อาจเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิง (Reforming) เกิดเป็นสารอะโรมาติกส์จำพวก เบนซีน (B) โทลูอิน (T) และไซลีน (X) หรืออาจเกิดปฏิกิริยาแครกกิง (Cracking) เป็นเป็นโพรเพน (C₃) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชันเป็นเบนซีน โทลูอิน และไซลีนต่อไป

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

3.1 สารเคมี

1. อะซิโตน (Acetone) เกรด AR 99.97% จากบริษัท Fisher Scientific
2. เมทานอล (Methanol) เกรด AR 99.9% จากบริษัท CARLO ERBA
3. โทลูอิน (Toluene) เกรด AR 99.99% จากบริษัท Fisher Scientific
4. เอทิลเบนซีน (Ethyl Benzene) เกรด GC 99.0% จากบริษัท Fluka
5. พาราไซลีน (P-xylene) เกรด GC 99.0% จากบริษัท Fluka
6. ออโทไซลีน (O-xylene) เกรด GC 99.0% จากบริษัท Fluka
7. เมตาไซลีน (M-xylene) เกรด GC 99.0% จากบริษัท Fluka
8. โลหะแกเลียม (Gallium) เกรด AR 99.9% จากบริษัท ALDRICH
9. NH₄ZSM5 ซีโอไลท์ (ZSM5 Zeolite) จากบริษัท ZELOYST International
10. ก๊าซแอร์ซีโร (Air-Zero) จากบริษัท Praxair
11. แก๊สไนโตรเจน (N₂) จากบริษัท Praxair
12. แก๊สไฮโดรเจน (H₂) จากบริษัท Praxair
13. น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, (TGA))
2. เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, (GC))
3. เครื่องตรวจวัดเอกภักษ์ณด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, (XRD))
4. เครื่องตรวจวัดเอกภักษ์ณด้วยการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence (XRF))
5. เครื่องตรวจวัดการดูดซับก๊าซ (Gas Adsorption (BET))
6. เครื่องอัลตราโซนิกจากบริษัท ULTRASONIK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับหน่วยงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เครื่องฉีดสารอัตโนมัติ จากบริษัท kd Scientific
8. หลอดฉีดสารแบบคูด ขนาด 50 มิลลิลิตร จากบริษัท SGE
9. เทอร์โมคอปเปอร์จากบริษัท Kane-may
10. เครื่องชั่งไฟฟ้าละเอียด3ตำแหน่งจากบริษัท Sartorius
11. เครื่องอัดเม็ดสารจากบริษัท Shimadzu
12. ตะแกรงกรองบดสาร จากบริษัท U.S.A. STARDARD SIEVE
13. เม็ดแก้วขนาดเล็กพิเศษ (0.6 มิลลิเมตร) จากบริษัท TECHNICAL
14. เส้นใยแก้วจากบริษัท TECHNICAL
15. เครื่องให้ความร้อน จากบริษัท CarBolite
16. เครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซ จากบริษัท Dwyer
17. แท่งปฏิกรณ์แก้ว ขนาด 6มิลลิเมตร
18. เข็มฉีดสารยาว ขนาด 20 กรัม* 12 นิ้ว
19. บีกเกอร์ขนาด 10,25 และ 50 มิลลิลิตร
20. ขวดเก็บสาร ขนาด10 มิลลิลิตร
21. ภาชนะเก็บความเย็นพิเศษสำหรับใส่ไนโตรเจนเหลว(Dewars)
22. แท่งแก้ว
23. หลอดหยดสาร
24. กระดาษฟอยล์

3.3 การทดลองแบ่งเป็น3ช่วง

1. การเตรียมสารละลายตัวอย่าง
2. การเตรียมสภาวะการทดลองและการผลิตสารอะโรมาติกจากอะซีโตน
3. การทดสอบปริมาณและชนิดของสารอะโรมาติกที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

ทำการชั่งสารละลายมาตรฐานดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

สารละลายมาตรฐาน	น้ำหนัก (กรัม)
อะซีโตน	0.116
โทลูอิน	0.184
เอทิลเบนซีน	0.212
พาราไซลีน	0.212
ออโทไซลีน	0.212
เมตาไซลีน	0.212

ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นชั่งเมทานอล 5.74 กรัม (5:1 ของน้ำหนักสารละลายมาตรฐานทั้งหมดในตอนแรก) ผสมสารทั้งหมดเข้าด้วยกันในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายผสมที่ได้ไปฉีด GC ที่สภาวะดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสภาวะของเครื่อง GC

Detector Type	FID
Column	DB-WAX
Split Ratio	150
Linear reaction (cm/sec)	16.5
Initial Temp (°C)	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hold Time (min)	2
Heating Rate ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	8
Final Temp ($^{\circ}\text{C}$)	200
Detector Temp ($^{\circ}\text{C}$)	200
Injection Temp ($^{\circ}\text{C}$)	230

ด้วยเข็มฉีดยาขนาด 5 ไมโครลิตร โดยฉีดสารปริมาณ 0.1 ไมโครลิตรและเก็บไว้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการทดลอง(สามารถคำนวณ Response Factor ของสารมาตรฐาน ได้ดังภาคผนวก ก.)

3.3.2 การเตรียมสถานะการทดลองและการผลิตสารอะโรมาติกจากอะซิโตน

3.3.2.1 การเตรียมอะซิโตน

ทำการไล่อากาศที่ตกค้างอยู่ในอะซิโตนเกรดวิเคราะห์ปริมาณ 100 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรด้วยวิธีอัลตราโซนิกจนหมดฟองอากาศ (ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง) จากนั้นดูดอะซิโตนที่ทำการอัลตราโซนิกแล้ว ด้วยหลอดฉีดยาแบบดูดขนาด 50 มิลลิลิตรและต่อเข้ากับเครื่องฉีดสารอัตโนมัติเพื่อนำมาวัดอัตราการไหลก่อนใช้งาน ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปิดเครื่องฉีดสารอัตโนมัติทิ้งไว้ก่อนทำการวัดอัตราการไหลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเป็นการปรับสภาพเครื่องฉีดสารอัตโนมัติ จากนั้นทำการเก็บอะซิโตนที่ได้ผ่านเข็มฉีดยาแบบดูดที่ประกอบเข้ากับขวดเก็บสารขนาด 10 มิลลิลิตร (รูปที่ 3.1) ทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นจำนวน 2-3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยอัตราการไหลของอะซิโตนจากเครื่องฉีดสารอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

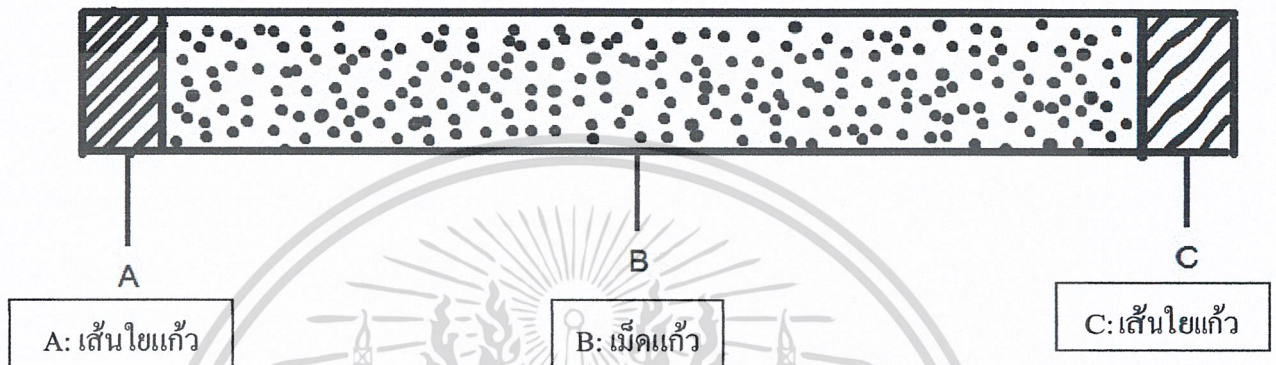


รูปที่3.1ภาพการเทียบมาตรฐานเครื่องฉีดสารอัดโนมิติ

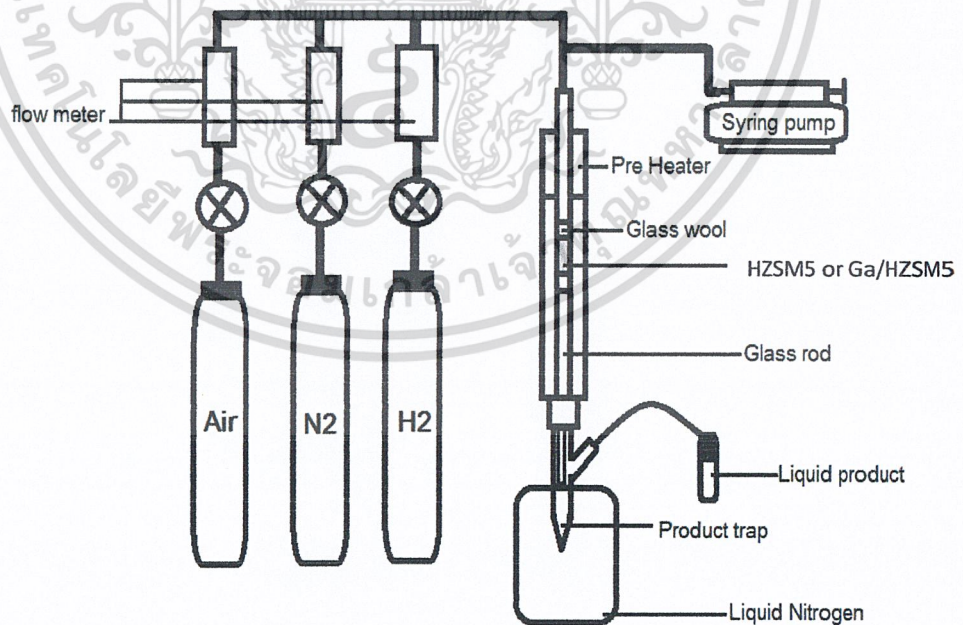
3.3.2.2 การเตรียมสภาวะการทดลองเพื่อทดสอบสมดุลมวล (Mass balance)

ทำการบรรจุแท่งปฏิกรณ์แก้ว โดยใส่เส้นใยแก้ว (ที่ผ่านการแช่ล้างด้วยอะซิโตนและกรดไนตริกเข้มข้นในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรเป็นเวลาอย่างละ 1 คืน) ลงไปในแท่งปฏิกรณ์แก้วที่ส่วนล่างสุดหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร(ส่วนaที่3.2)ตามด้วยเม็ดแก้วขนาดเล็กพิเศษ (ขนาด 0.6 มิลลิเมตร) (ที่ผ่านการแช่ล้างด้วยอะซิโตนและกรดไนตริกเข้มข้นในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรเป็นเวลาอย่างละ 1 คืน) โดยให้ความสูงประมาณเกือบครึ่งของแท่งปฏิกรณ์แก้ว (ส่วนbรูปที่3.2) และชั้นสุดท้ายด้วยเส้นใยแก้วอีกชั้นหนึ่งด้วยความหนาเท่าเดิม (ส่วนcรูปที่3.2)ทำการประกอบแท่งปฏิกรณ์แก้วเข้ากับเครื่องให้ความร้อน (รูปที่3.3) และชุดเก็บสารที่มีสารละลายเมทานอล 4 กรัมเป็นตัวดักจับผลิตภัณฑ์ โดยมีการให้ความเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวที่อยู่ภายในภาชนะเก็บความเย็นแบบพิเศษ (รูปที่3.4) ทำการเปิดแก๊สไนโตรเจนและทำการปรับอัตราการไหลเป็น 30 มิลลิลิตร/นาที (โดยดูจากฟองสบู่ที่ไหลขึ้นผ่านท่อวัดการไหลเป็นเวลา 1 นาที) (รูปที่3.5) จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องให้ความร้อนเป็น400 °Cด้วยอัตราการให้ความร้อน 1 °C/นาที เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้ว ทำการต่อหลอดฉีดสารแบบคูลที่ต่ออยู่กับเครื่องฉีดสารอัด โนมิตี (ทำการวัดอัตราการไหลแล้ว)เข้ากับส่วนบนแท่งปฏิกรณ์แก้ว (รูปที่3.6) เพื่อปล่อยอะซิโตนผ่านแท่งปฏิกรณ์แก้วที่ต่ออยู่กับเครื่องให้ความร้อนและชุดเก็บสาร ทำการเก็บสารที่ได้จากการทดลองทุกๆ 1 ชั่วโมงด้วยการดูดสารละลายที่อยู่ในชุดเก็บสารและใส่ไว้ในขวดเก็บสารขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นฉีดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งไปไว้สำหรับภาควิชาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สารละลายเมทานอล 4 กรัมที่เตรียมไว้ลงในชุดเก็บสารอีกครั้ง เพื่อเป็นสารดักจับผลิตภัณฑ์ต่อไป ทำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดิมซ้ำกันเป็นเวลา 7 ชั่วโมงโดยนำสารที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องGC ตามสภาวะข้างต้น เพื่อหาว่าเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการบ้างหรือไม่ในสภาวะที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้



รูปที่ 3.2 การบรรจุแท่งปฏิกรณ์แก้วแบบไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3.3 ผังเครื่องชุดทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.4ที่เก็บไนโตรเจนเหลว (Dewars)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่3.5ชุดวัดอัตราการไหลของก๊าซ



รูปที่3.6ส่วนบนของเตาเผาความร้อนสูง

3.3.2.3 การทดสอบผลิตสารอะโรมาติกจากอะซิโตน

ตอนที่1 การทดสอบผลิตสารอะโรมาติกจากอะซิโตนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

นำตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่จะใช้ในการทดสอบผลิตสารอะโรมาติกจากอะซิโตน ไปทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์ต่างๆดังนี้ วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคตรวจวัดเอกลักษณ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction (XRD)) และ วิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคตรวจวัดการดูดซับก๊าซ (Gas Absorption (BET))

จากนั้นทำการอัดเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่ตรวจวิเคราะห์แล้ว โดยการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 0.05 กรัม ลงไปในเบ้าของเครื่องอัดเม็ดสาร ทำการอัดเม็ดด้วยความดันประมาณ 4 ตัน รอประมาณ 30 วินาที จึงทำการปล่อยความดันเพื่อนำเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากเครื่องอัดเม็ด จากนั้นนำเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มาบดและคัดขนาดด้วยตะแกรงกรองบดสารขนาด 600-850 ไมครอน เก็บเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาที่บดและทำการคัดแยกขนาดแล้วไว้ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษพอลิเพื่อรอใช้งานในขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการบรรจุแท่งปฏิกรณ์แก้ว โดยใส่เส้นใยแก้วหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตรลงไปเป็นฐานรองก่อน (ส่วนรูปที่3.7) ตามด้วยเม็ดแก้วความสูงประมาณเกือบครึ่งหนึ่งของแท่งปฏิกรณ์แก้ว (ส่วนรูปที่3.7) ขึ้นชั้นด้วยเส้นใยแก้วหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร (ส่วนรูปที่3.7) จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการอัดเม็ดและบดแล้วแล้วลงไปประมาณ 0.1 กรัม (เวลาสัมผัส 6.1 g.h/mol) (ส่วนรูปที่3.7) ขึ้นชั้นด้วยเส้นใยแก้วหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตรอีกครั้งหนึ่ง (ส่วนรูปที่3.7) ใส่เม็ดแก้วลงไปจนเกือบเต็มแท่งปฏิกรณ์แก้ว (ส่วนรูปที่3.7) จากนั้นจึงปิดชั้นสุดท้ายด้วยเส้นใยแก้วหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตรอีกครั้ง (ส่วนรูปที่3.7) ต่อแท่งปฏิกรณ์แก้วเข้ากับเครื่องให้ความร้อนและชุดเก็บสาร และทำการเผาเพื่อไล่น้ำที่อุณหภูมิตั้งที่ 500°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน $1^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ ค้างไว้เป็นเวลา ชั่วโมงด้วยอัตราการไหลของแก๊สพาอากาศ 30 มิลลิลิตร/นาท เมื่อทำการเผาเพื่อไล่น้ำครบ 5 ชั่วโมงแล้วจึงเปลี่ยนเป็นแก๊สพาเป็นไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30 กรัม/นาท (ปรับอัตราการไหลดังตอนที่2.2) และทำการลดอุณหภูมิลงมาที่ 400°C ด้วยอัตรา $1^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ เมื่อได้อุณหภูมิตั้งที่กำหนดแล้ว ทำการต่อหลอดชนิดสารแบบชุดที่ต่ออยู่กับเครื่องฉีดสารอัตโนมัติ (ทำการวัดอัตราการไหลแล้ว)เข้ากับส่วนบนแท่งปฏิกรณ์แก้วแล้วทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบตอนที่ 3.3.2.2 จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการทดสอบไปทำการวิเคราะห์หาเสถียรภาพของโค้กด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) และเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็น 0.2, 0.3 และ 0.4 กรัม (เวลาสัมผัส 12.2, 18.3 และ 24.4 g.h/mol) ตามลำดับ

ตอนที่2 การทดสอบผลิตสารอะโรมาติกจากอะซิโตนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เติมโลหะแกลเลียม

ทำการเติมโลหะแกลเลียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำการทดลองขั้นต่อไป โดยทำการเอ็บซุ่ม (Impregnation) ตัวเร่งปฏิกิริยา เริ่มจากชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5หนัก 10.713 กรัม ใส่ไว้ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นทำการชั่งแกลเลียมไนเตรดหนัก 0.1825 กรัมใส่ไว้ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตรอีกใบหนึ่ง ละลายแกลเลียมไนเตรดด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร และทำการหยดสารละลายแกลเลียมไนเตรดที่ได้ประมาณ 5 มิลลิลิตรลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ ทำการผสมกวนซีโอไลต์ที่หยดด้วยสารละลายแกลเลียมไนเตรดจนทั่ว จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที ทำซ้ำจนสารละลายแกลเลียมไนเตรดหมด จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่มีร้อยละ โดยน้ำหนักของแกลเลียมเป็น 0.5 ตามต้องการทำการปรับเปลี่ยนปริมาณแกลเลียมไนเตรดและตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ดังตารางที่ 3.3

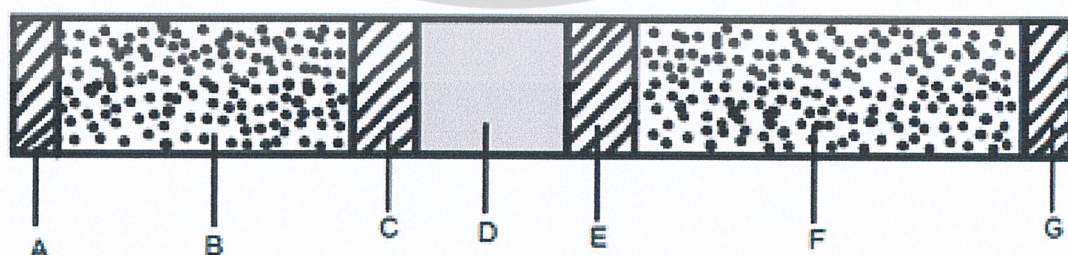
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้ได้ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแคลเซียมเป็น 1 และ 2 (คำนวณดังภาคผนวก ก.) ตามขอบเขตการทดลองที่กำหนดไว้

ตารางที่ 3.3 ตารางผลการคำนวณโลหะแคลเซียม

ปริมาณโลหะแคลเซียม	น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	น้ำหนักแคลเซียม (กรัม)
แคลเซียม 0.5% โดยน้ำหนัก	10.713	0.1825
แคลเซียม 1 % โดยน้ำหนัก	10.659	0.365
แคลเซียม 2 % โดยน้ำหนัก	10.551	0.730

นำตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เติมโลหะแคลเซียมแล้ว ไปทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์ต่างๆ ดังนี้ วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคตรวจวัดเอกลักษณ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction (XRD)) วิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคตรวจวัดการดูดซับก๊าซ (Gas Adsorption (BET)) และ วิเคราะห์หาปริมาณโลหะองค์ประกอบที่แท้จริงด้วยเทคนิคตรวจวัดเอกลักษณ์ด้วยการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence (XRF)) จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มาทำการอัดเม็ด และทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบตอนที่ 3.3.2.2



A: เส้นใยแก้ว	B: เม็ดแก้ว	C: เส้นใยแก้ว	D: ตัวเร่งปฏิกิริยา	E: เส้นใยแก้ว	F: เม็ดแก้ว	G: เส้นใย
---------------	-------------	---------------	---------------------	---------------	-------------	-----------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.7 การแพ็คแท่งปฏิกรณ์แก้วแบบใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

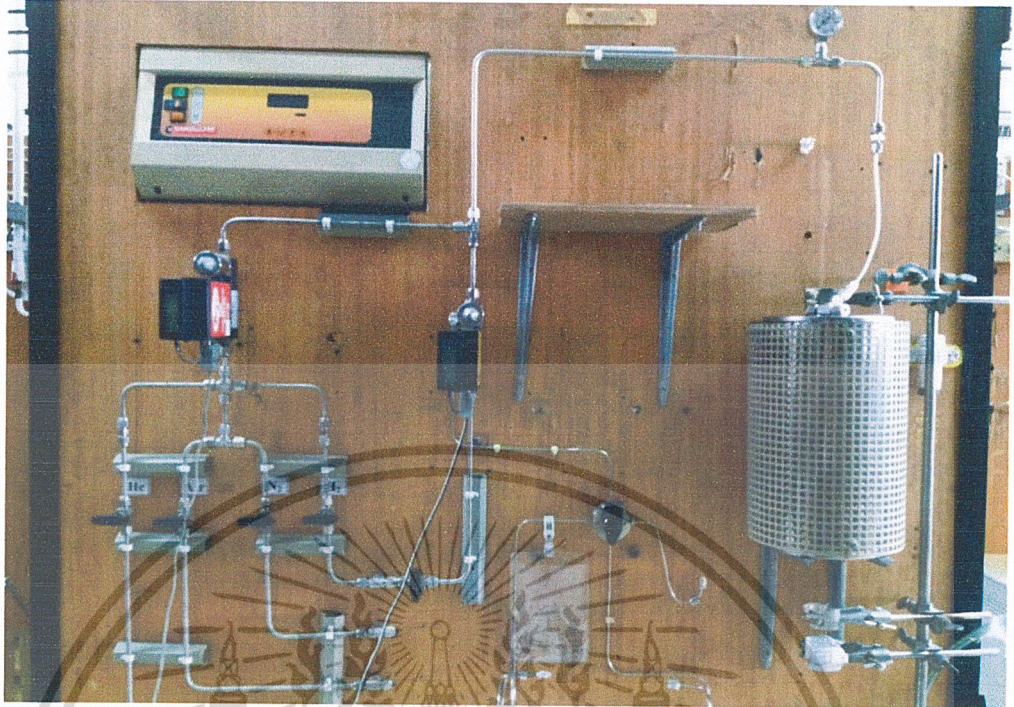
3.3.2.4 การทดสอบปริมาณและชนิดของสารอะโรมาติกที่ได้

นำสารที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์ ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) และเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) ดังสภาวะการทดสอบที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยการฉีดสารที่ได้จากการทดสอบปริมาณ 0.1 ไมโครลิตรด้วยเข็มฉีดสารขนาด 5 ไมโครลิตร ก่อนทำการฉีดให้ดูว่ามีฟองอากาศค้างอยู่ภายในเข็มฉีดสารหรือไม่ หากยังมีฟองอากาศค้างอยู่ให้ทำการไล่ฟองอากาศออกโดยการดูดสารเข้าออกหลายๆครั้งจนฟองอากาศหายไป จากนั้นฉีดปลายเข็มเพื่อทำการไล่หยดสารที่อาจเกาะอยู่ที่ปลายเข็มออกไปก่อนทำการฉีดสารเข้าเครื่อง GC โดยกำหนดหาปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยวิธีนอร์มอลไลต์ (Normalization) (ดังภาคผนวก ก.)

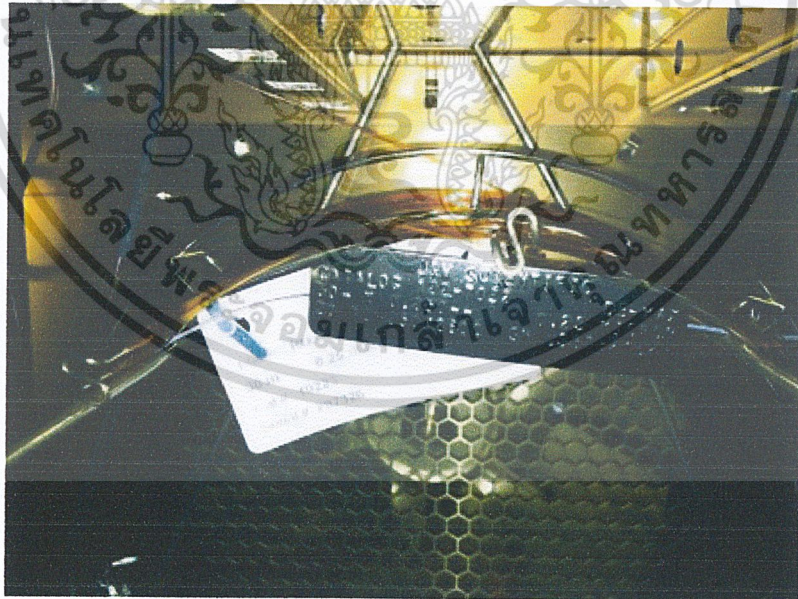


รูปที่ 3.8 ภาพแสดงการเก็บสารผลิตภัณฑ์ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.9 ชุดทำปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่3.10 คอลัมน์DB-WAX ของGC-FID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา (Characterization)

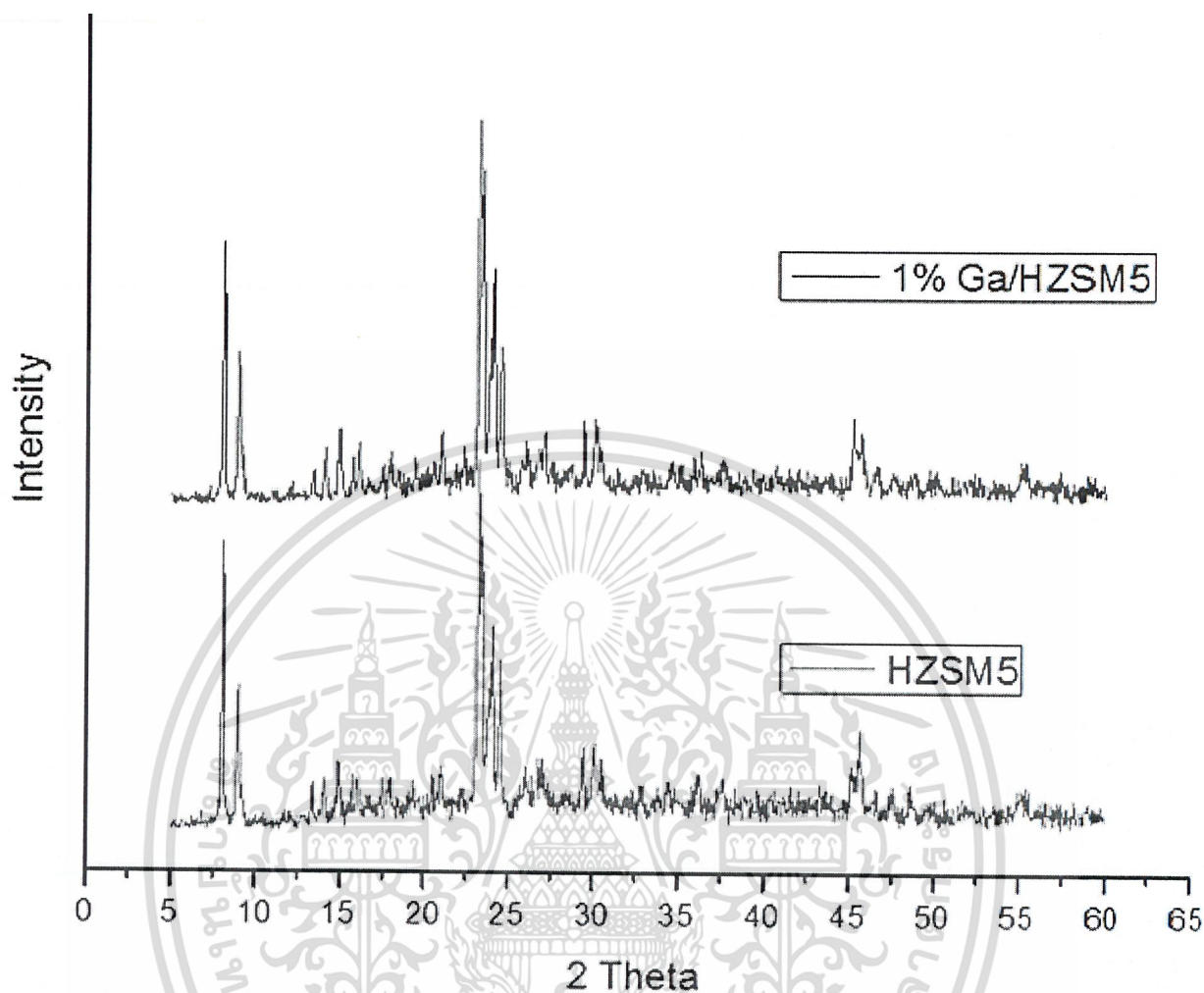
เมื่อทำการดัดแปลงตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 เพื่อเพิ่มความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน โดยการเติมโลหะแกลเลียมเป็นปริมาณ 0.5%, 1% และ 2% โดยน้ำหนัก (โดยมีวิธีการคำนวณดังภาคผนวก ก.) แล้ว จึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะองค์ประกอบที่แท้จริง โดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลของการหาปริมาณที่แท้จริงของโลหะแกลเลียมที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ผ่านเทคนิค X-Ray Fluorescence ปริมาณ 0.5%, 1% และ 2% โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบ	Ga/HZSM5 0.5%wt.	Ga/HZSM5 1%wt.	Ga/HZSM5 2%wt.
%wt. Al ₂ O ₃	1.4	1.4	1.5
%wt. SiO ₂	68.2	65.6	65.7
%wt. Ga	0.3	1.0	2.0
Si/Al	39.9	38.9	36.1
Si/Ga	265.2	73.4	38

จากผลการวิเคราะห์ (ตารางที่ 4.1) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ทุกตัวมีอัตราส่วน Si/Al ประมาณ 38 และเมื่อใส่โลหะแกลเลียมเพิ่มขึ้น ปริมาณโลหะแกลเลียมในองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการในการอิมเพรคเนชัน (Impregnation) มีความเหมาะสมสำหรับการเพิ่มโลหะแกลเลียมในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันดังรูปที่ 4.1

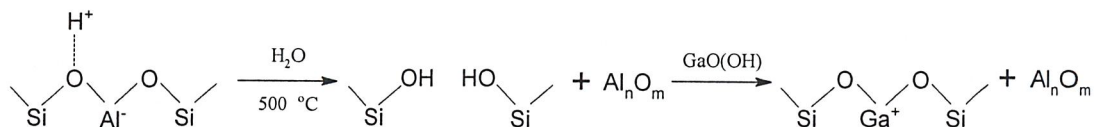
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



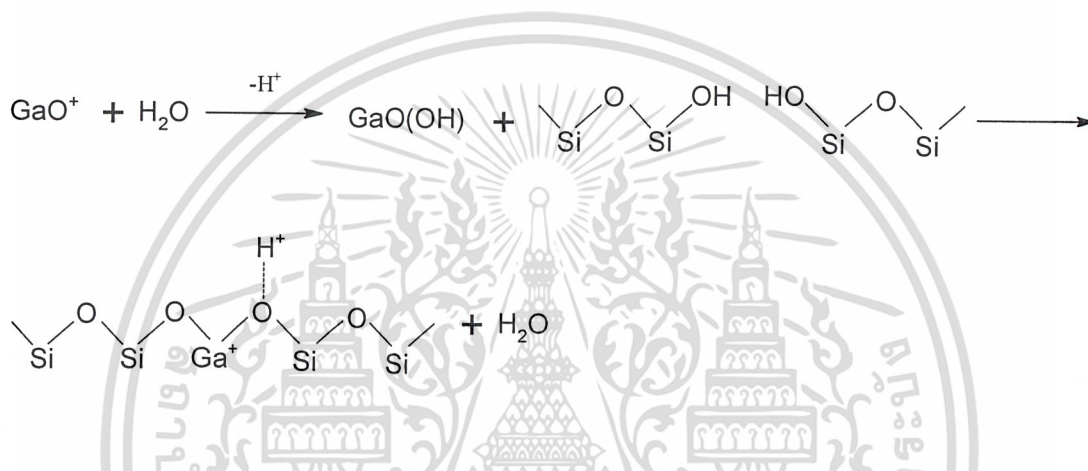
รูปที่ 4.1 XRD Pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 กับ 1%Ga/HZSM5

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 กับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เติมโลหะแกลเลียม 1% โดยน้ำหนัก (1%Ga/HZSM5) นั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยยังคงความเป็นผลึกของ MFI อยู่ ดังนั้นโลหะแกลเลียมที่เพิ่มเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแต่อย่างใด ทั้งลักษณะของรูพรุน (ตำแหน่ง 2θ) และความสมบูรณ์ของผลึก (ความเข้มของรังสี; Intensity) ทำให้อาจยืนยันได้ว่าโลหะแกลเลียมที่เพิ่มเข้าไปส่วนใหญ่ไม่ได้เกิดเป็นกลุ่มก้อนของโลหะออกไซด์อยู่ในบริเวณรูพรุนแต่เข้าไปแทนที่อะลูมิเนียม

(Aluminium) ที่อยู่ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ดังในสมการนี้ ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อีกทั้งโลหะแกลเลียมในรูปออกไซด์ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้เกิดแกเลียมออกซีไฮดรอกไซด์ (Gallium oxyhydroxides: GaO(OH)) แล้วทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิล (Silanol group) ที่อยู่ในโครงสร้างซีโอไลต์โดยไม่มีผลต่อขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ดังสมการ^{vii}



ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยายังคงมีพื้นที่ผิวสูง ดังจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับของก๊าซ (Gas Adsorption (BET)) ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลของพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET surface

สารที่วิเคราะห์	พื้นที่ผิว (m ² /g)
HZSM5	363
0.5%Ga/HZSM5	372
1%Ga/HZSM5	371
2%Ga/HZSM5	370

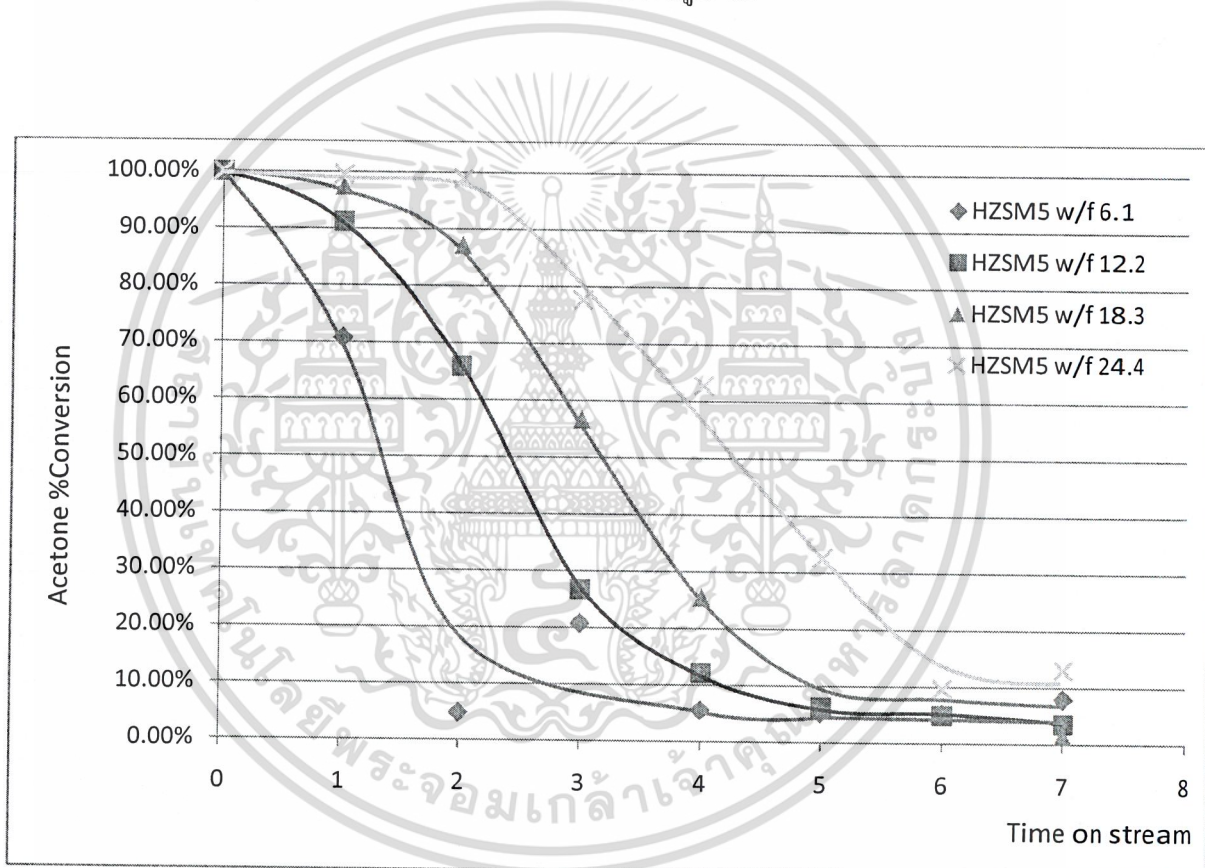
จากผลการวิเคราะห์พบว่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 4 นั้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ประมาณ 370 m²/g) แม้เพิ่มโลหะแกลเลียมมากขึ้น พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก็ไม่ลดลงหรือ

เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างไร จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของโลหะแกลเดียมนั้นไม่มีผลต่อลักษณะโครงสร้าง (Structure) และความเป็นรูพรุน (Porosity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

ตอนที่ 2 การผลิตสารอะโรมาติก

4.2.1 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

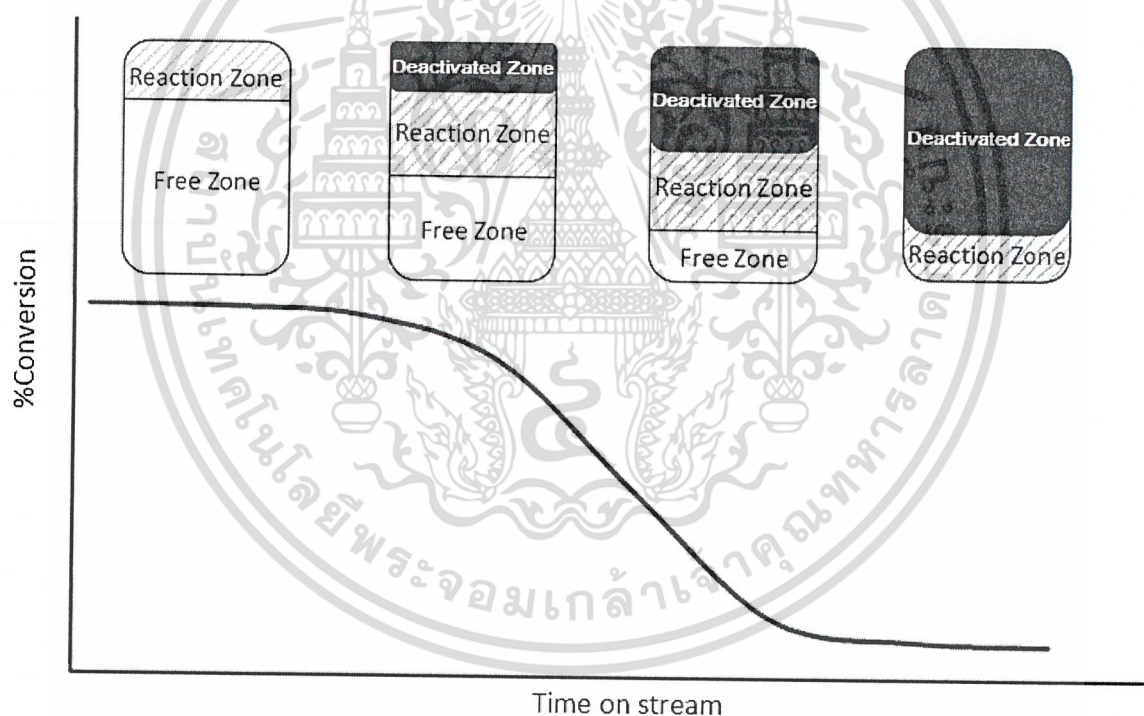
การทดสอบปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 โดยใช้อะซิโตน (Acetone) เป็นสารตั้งต้น แล้วให้ผลดังแสดงในรูป 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ของอะซิโตนกับเวลาในการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400°C ที่เวลาสัมผัส 6.1, 12.2, 18.3 และ 24.4 g.h/mol โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 พบว่าในช่วงแรกตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวมาก (ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ประมาณ 100%) จากนั้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเสื่อมสภาพทำให้ความว่องไวน้อยลง โดยช่วงท้ายตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อีก ทั้งนี้ การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเกิดจากปริมาณของ โคล์ที่สะสมเพิ่มขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) นอกจากนี้ การทดลองที่เวลาสัมผัส 24.4 g.h/mol ให้อัตราการเสื่อมสภาพที่ช้ากว่าเวลาสัมผัส 18.3, 12.2 และ 6.1 g.h/mol ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจาก มีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามากในช่วงแรกตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีพื้นที่ซึ่งยังไม่ทำปฏิกิริยา (Free Zone) อยู่เป็นจำนวนมาก และพื้นที่ทำปฏิกิริยา (Reaction Zone) อยู่ในช่วงต้นของเบด (Bed) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

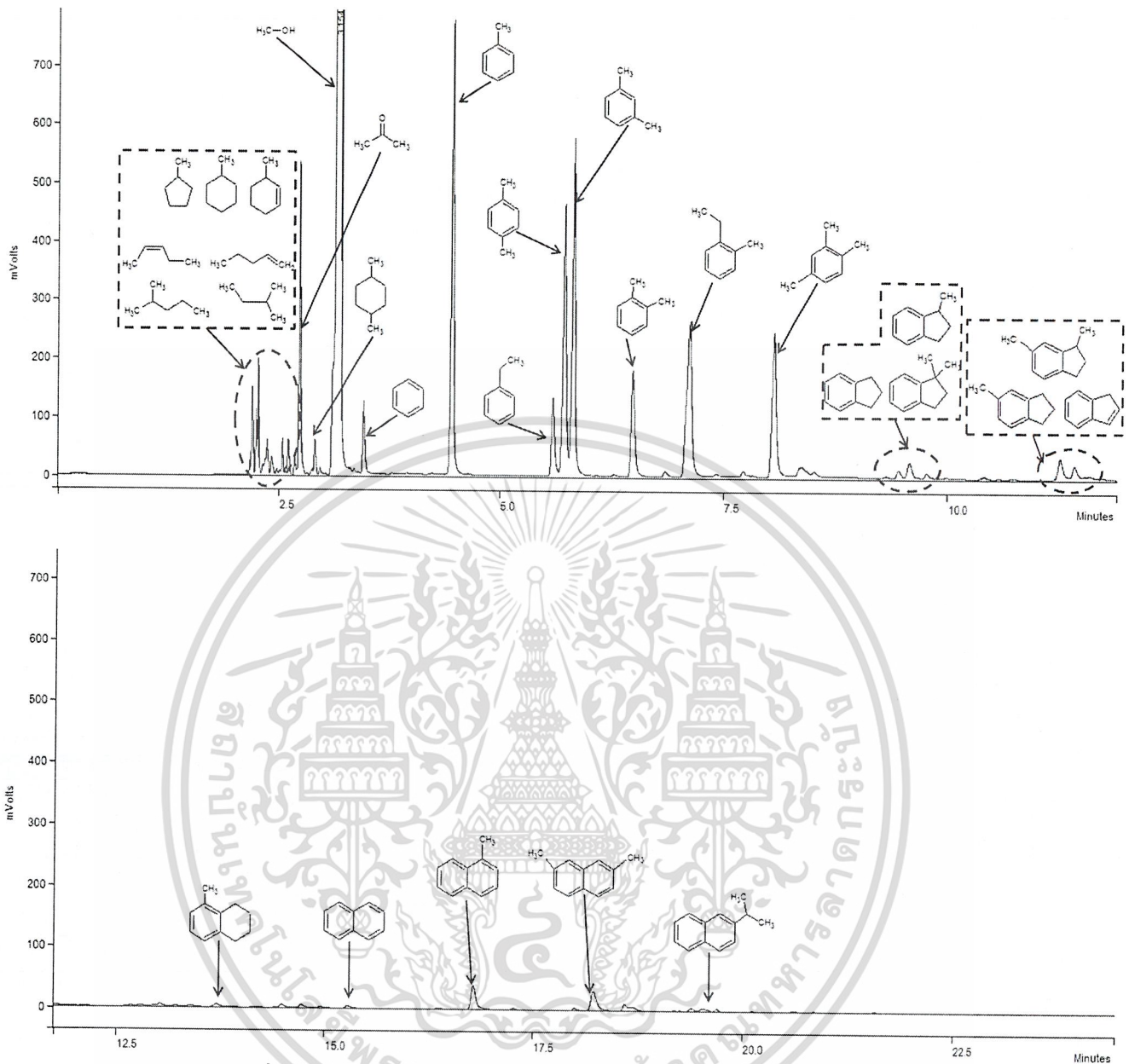
เป็นผลให้เบด (Bed) มีความสามารถสูงในการเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ประมาณ 100%) แต่เมื่อเวลาผ่านไปพื้นที่ทำปฏิกิริยาจะเสื่อมสภาพ (Deactivated Zone) เพราะเกิดโคล์สะสมขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

ในช่วงสุดท้ายพื้นที่ทำปฏิกิริยา (Reaction Zone) จะลดน้อยลงและเบดส่วนใหญ่จะมีแต่พื้นที่เสื่อมสภาพ (Deactivated Zone) เป็นผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาต่อไปได้

ในการทดลองที่เวลาสัมผัส 24.4 g.h/mol จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากเพื่อให้มีเวลาสัมผัสนานกว่าการทดลองที่ใช้เวลาสัมผัส 18.3, 12.2 และ 6.1 g.h/mol ตามลำดับจึงมีพื้นที่ซึ่งยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาและพื้นที่ทำปฏิกิริยาในเบดเป็นจำนวนมาก เป็นผลให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพช้าที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกๆ เวลาสัมผัส

จากผลการวิเคราะห์ด้วย GC-FID และ GC-MS ประกอบกันพบว่าสารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethyl-Benzene) พาราไซลีน (P-Xylene) เมตาไซลีน (M-Xylene) ออโทไซลีน (O-Xylene) และสารอะโรมาติกขนาดใหญ่ (Aromatic C9+) ที่ออกมาตามลำดับเวลาการกักสาร (Retention Time) ดังโครมาโทแกรม (Chromatogram) (รูปที่ 4.4)





รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ด้วย GC-FID และ GC-MS

เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารผลิตภัณฑ์ด้วย GC-FID พบว่าค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Product Selectivity) จากค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ประมาณ 60% (จากรูปที่ 4.2) ให้ผลดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

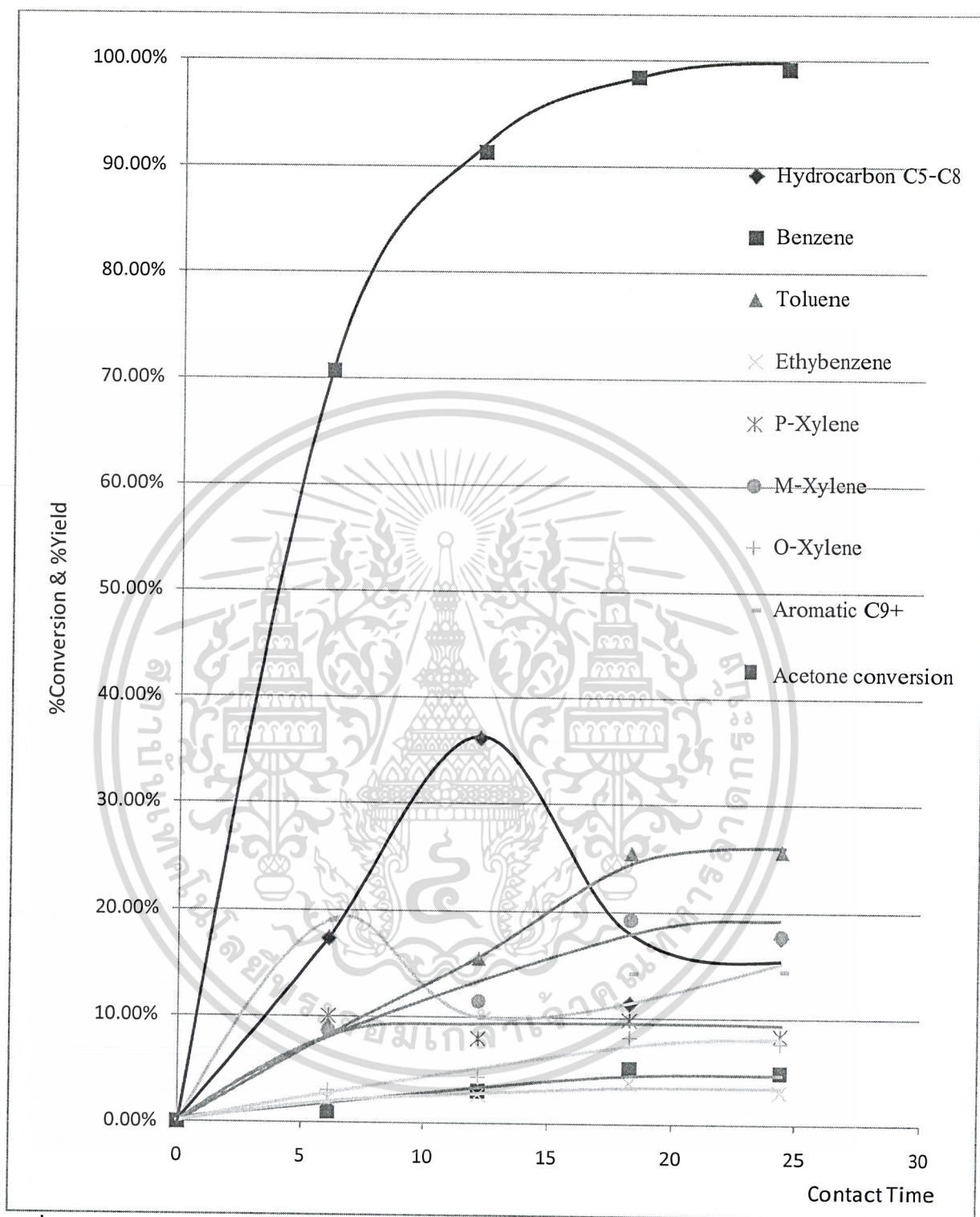
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ประมาณ 60% ที่เวลาสัมผัสต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

Product	W/F 12.2g.h/mol	W/F 18.3g.h/mol	W/F 24.4g.h/mol
Hydrocarbon C5-C8	41.6%	29.5%	39.9%
Benzene	0.9%	0.9%	2.5%
Toluene	8.9%	8.6%	14.4%
Ethyl Benzene	2.4%	2.4%	2.7%
P-Xylene	11.4%	13.7%	8.1%
M-Xylene	8.9%	8.4%	11.8%
O-Xylene	5.3%	3.1%	4.7%
Aromatic C9+	20.1%	33.1%	15.6%
Total Aromatic	58.3%	70.2%	60.1%
%Conversion	65.8%	56.5%	62.6%

ทดสอบที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400°C โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min

จากตารางที่ 4.3 เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสจาก 12.2 g.h/mol เป็น 18.3 g.h/mol พบว่าได้สารอะโรมาติกรวม (Total Aromatic) มากขึ้นโดยพบสารอะโรมาติกขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นจาก 20.1% เป็น 33.1% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสมากขึ้นเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสเป็น 24.4 g.h/mol พบว่าสารอะโรมาติกรวมลดลงเนื่องจากสารอะโรมาติกขนาดใหญ่เกิดปฏิกิริยาแตกตัวกลับไปเป็นสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 จึงสรุปได้ว่าที่เวลาสัมผัส 18.3 g.h/mol มีความเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซิโตน ซึ่งทำให้ได้สารอะโรมาติกมากและเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็นสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 น้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

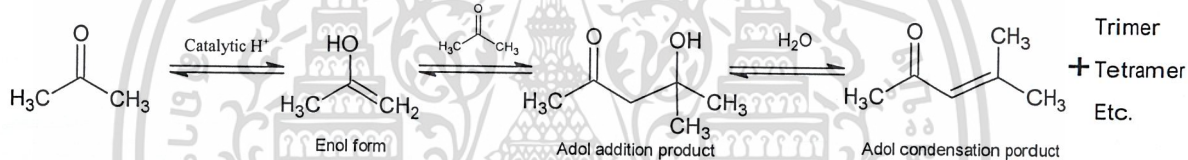


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ (%Yield) กับเวลาสัมผัส 6.1, 12.2, 18.3 และ 24.4 g.h/mol ที่ชั่วโมงที่ 1 ของการทำปฏิกิริยาผ่าน HZSM5 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min

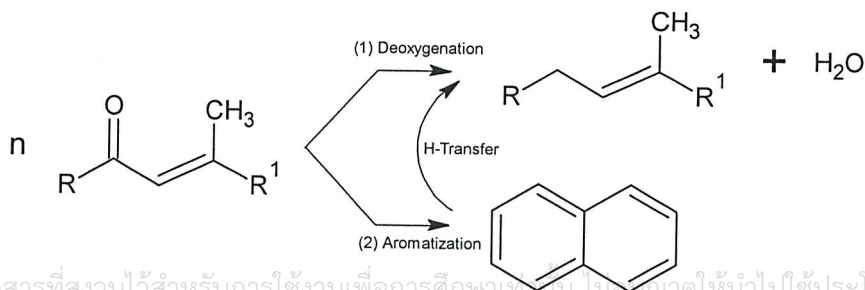
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าที่เวลาสัมผัสต่างๆ สารอะโรมาติกขนาดใหญ่ และสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 เกิดขึ้นก่อนเป็นปริมาณมากและเพิ่มขึ้นตามเวลาสัมผัส จากนั้นเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นสารอะโรมาติกขนาดใหญ่ จะมีปริมาณลดลง แต่สารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 ยังคงมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น และที่เวลาสัมผัสสูง (ที่เวลาสัมผัส 18.3 และ 24.4 g.h/mol) สารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 จะมีปริมาณลดลง แต่สารอะโรมาติกขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย ส่วนสารผลิตภัณฑ์โทลูอินเบนซีนเอทิลเบนซีน และ ไซลีน มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองทำให้อนุมานได้ว่าสารผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นเกิดจากปฏิกิริยาแอลดอลคอนเดนเซชัน (Aldol Condensation) ของอะซิโตน เป็นผลิตภัณฑ์แอลดอล (Aldol Product) ขนาดใหญ่ ดังสมการ

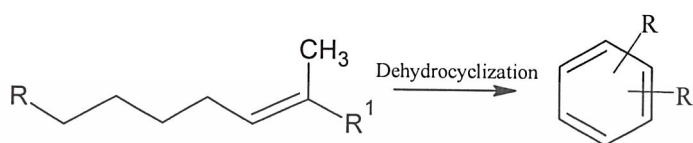


โดยผลิตภัณฑ์แอลดอลนี้ สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อได้ 2 ส่วน คือเกิดปฏิกิริยาการขจัดออกซิเจน (Deoxygenation) เป็นสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 และเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) เป็นสารอะโรมาติกขนาดใหญ่โดยเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรเจนทรานสเฟอร์ (Hydrogen Transfer) ระหว่างสารประกอบอะโรมาติกขนาดใหญ่กับสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

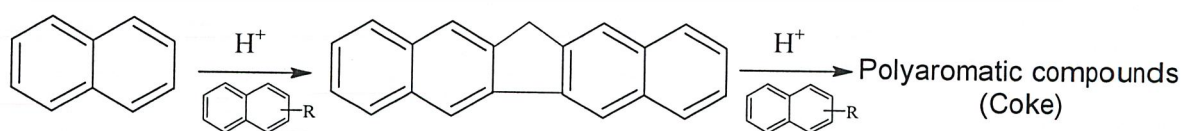
จากการทดลองพบว่ามีสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 เป็นส่วนใหญ่ที่เวลาสัมผัสต่ำๆ แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์แอลดอล (Aldol Product) ส่วนใหญ่เกิดปฏิกิริยาการขจัดออกซิเจน (Deoxygenation) จากนั้นสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 จะเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ต่อเป็นสารผลิตภัณฑ์โทลูอินเบนซีนเอทิลเบนซีนและไซลีน ดังสมการ



ในขณะที่สารอะโรมาติกขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นพร้อมกับการสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 สามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็นสารผลิตภัณฑ์โทลูอินเบนซีนเอทิลเบนซีน และไซลีน ได้เช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าปริมาณของสารอะโรมาติกขนาดใหญ่จะลดลงแต่มีปริมาณสารผลิตภัณฑ์โทลูอินเบนซีนเอทิลเบนซีน และไซลีนเพิ่มขึ้น ดังสมการ

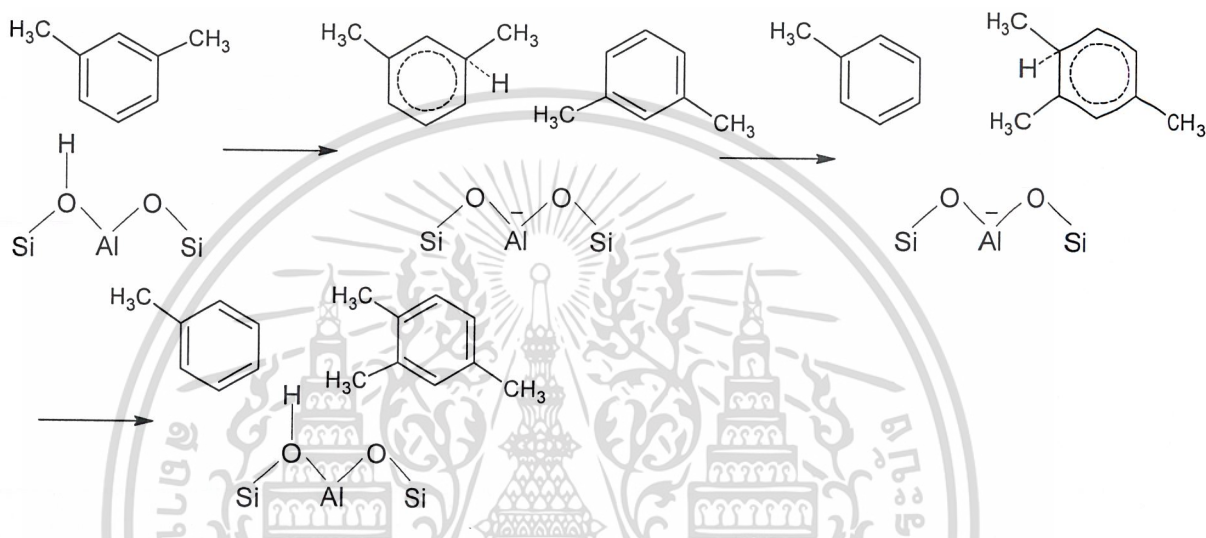


อย่างไรก็ตามสารอะโรมาติกขนาดใหญ่บางส่วนสามารถเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวเป็นโค้ก (Coke Formation) ซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ ดังสมการ



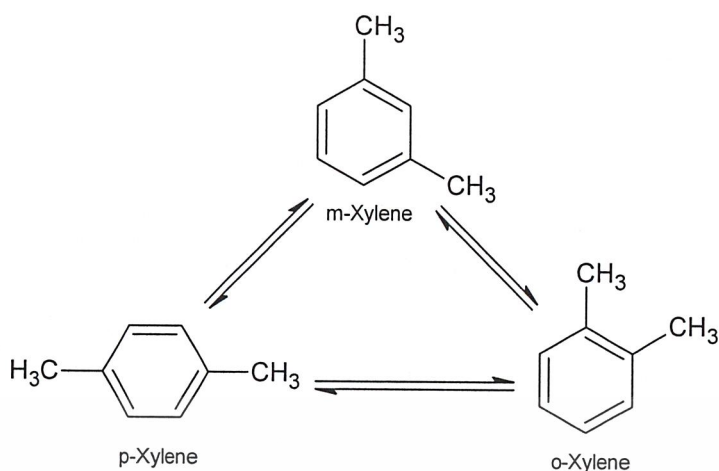
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ที่เวลาสัมผัสสูง (18.3 และ 24.4 g.h/mol) สารผลิตภัณฑ์โทลูอินเบนซีนเอทิลเบนซีนและไซลีน บางส่วนอาจเกิดปฏิกิริยาดิสพรอปอร์ชันเนชัน (Disproportionation), อัลคิเลชัน (Alkylation) และ โอลิโกเมอร์ไรเซชัน (Oligomerization) กลับมาเป็นสารอะโรมาติกขนาดใหญ่อีกครั้ง ดังตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาดิสพรอปอร์ชันเนชัน (Disproportionation) ของเมตาไซลีน



โดยในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นไซลีนแม้จะมีปริมาณมากขึ้นแต่จะเห็นว่าพาราไซลีนนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากพาราไซลีนเกิดขึ้นก่อนจากการเลือกสรรรูปร่างผลิตภัณฑ์ (Shape Selectivity) โดยขนาดของรูพรุนที่จำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน (Isomerization) ต่อไปเป็น เมตาไซลีน และออโทไซลีน โดยปริมาณของเมตาไซลีนจะมีมากที่สุดเนื่องจากเมตาไซลีนมีความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) มากกว่าไอโซเมอร์ (Isomer) อื่นๆ ดังสมการ

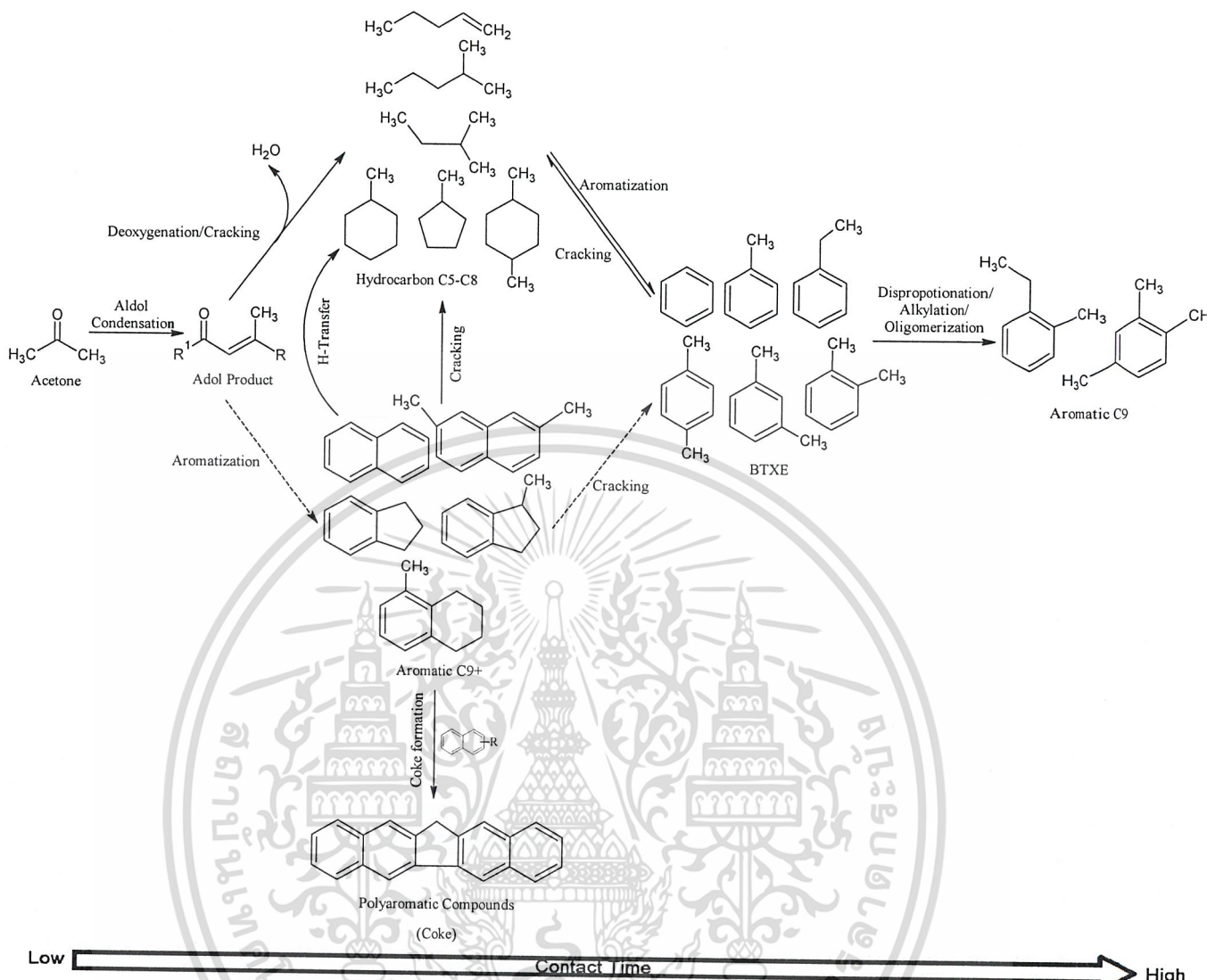
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบสารอะโรมาติกขนาดใหญ่มากขึ้นที่เวลาสัมผัสสูงๆ (เวลาสัมผัส 18.3 และ 24.4 g.h/mol) โดยลำดับการเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซิโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถแสดงได้โดยรูปที่ 4.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



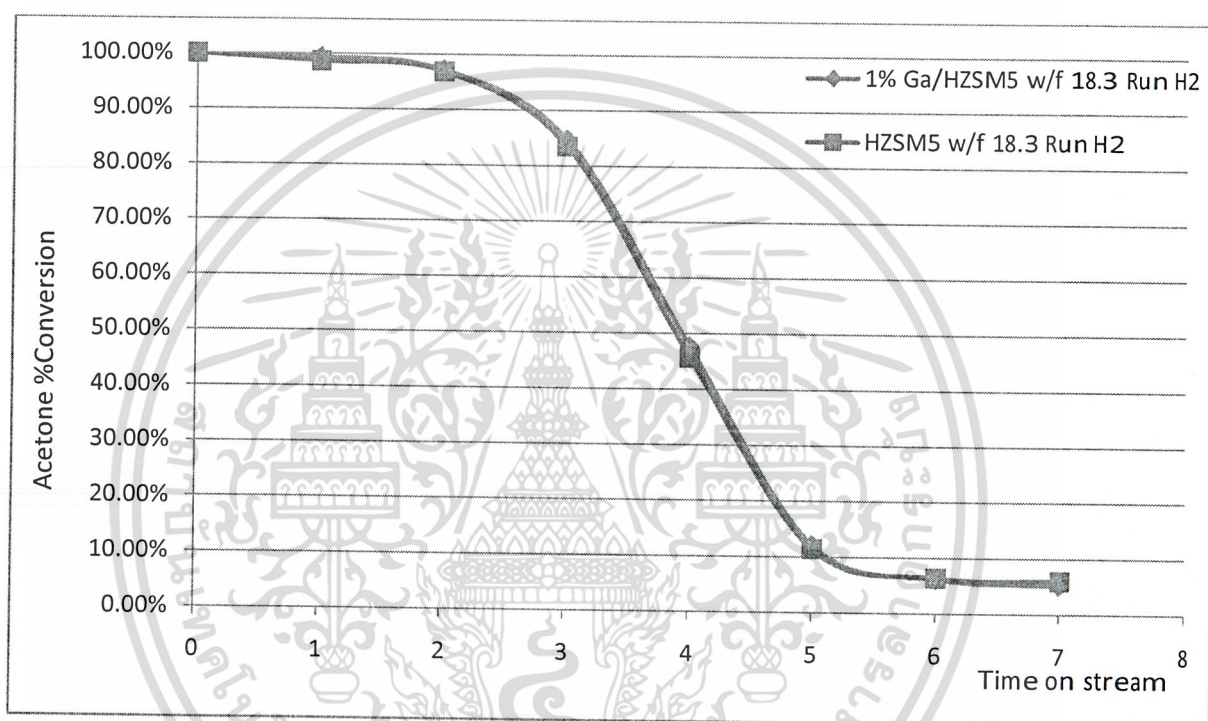
รูปที่ 4.6 ลำดับการเกิดสารผลิตภัณฑ์ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอะซิโตนเกิดปฏิกิริยาผ่านปฏิกิริยาการขจัดออกซิเจน (Deoxygenation) เป็นหลักดังลูกศรทึบ (→) และเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) บางส่วนดังลูกศรประ (--▶) ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลของการเพิ่มโลหะแกลเลียมบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

การทดสอบปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน(Aromatization) ของอะซิโตนผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี การเติมโลหะแกลเลียมบนพื้นผิวโดยเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่ใช้แก๊สไฮโดรเจน เป็นแก๊สพาให้ผลดังรูป 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาของ HZSM5 กับ 1%Ga/HZSM5 ที่เวลาสัมผัส 18.3 g.h/mol ที่อุณหภูมิ 400 °C โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการเติมโลหะแกลเลียมบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ใกล้เคียงกันกับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมโลหะแกลเลียมสามารถเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาอะโรมา

ไทเซชัน(Aromatization) ของอะซิโตนได้มากกว่า จึงให้ค่าการเลือกเกิดของสารอะโรมาติกขนาด

ใหญ่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ดังผลในตารางที่ 4.4 อย่างไรก็ตามเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1%Ga/HZSM5 กับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ใกล้เคียงกัน ประมาณ 84% และ 47%

Product	84%Conversion		47%Conversion	
	1%Ga/HZSM5	HZSM5	1%Ga/HZSM5	HZSM5
Hydrocarbon C5-C8	6.2%	16.6%	17.4%	28.3%
Benzene	1.3%	3.4%	0.7%	1.1%
Toluene	12.9%	17.3%	9.4%	9.4%
Ethyl Benzene	4.1%	3.9%	3.1%	2.4%
P-Xylene	17.0%	13.6%	18.5%	14.2%
M-Xylene	14.9%	15.1%	8.9%	8.2%
O-Xylene	5.9%	5.6%	3.6%	2.8%
Aromatic C9+	37.8%	24.4%	38.2%	33.3%
Total Aromatic	93.8%	83.3%	82.4%	71.4%

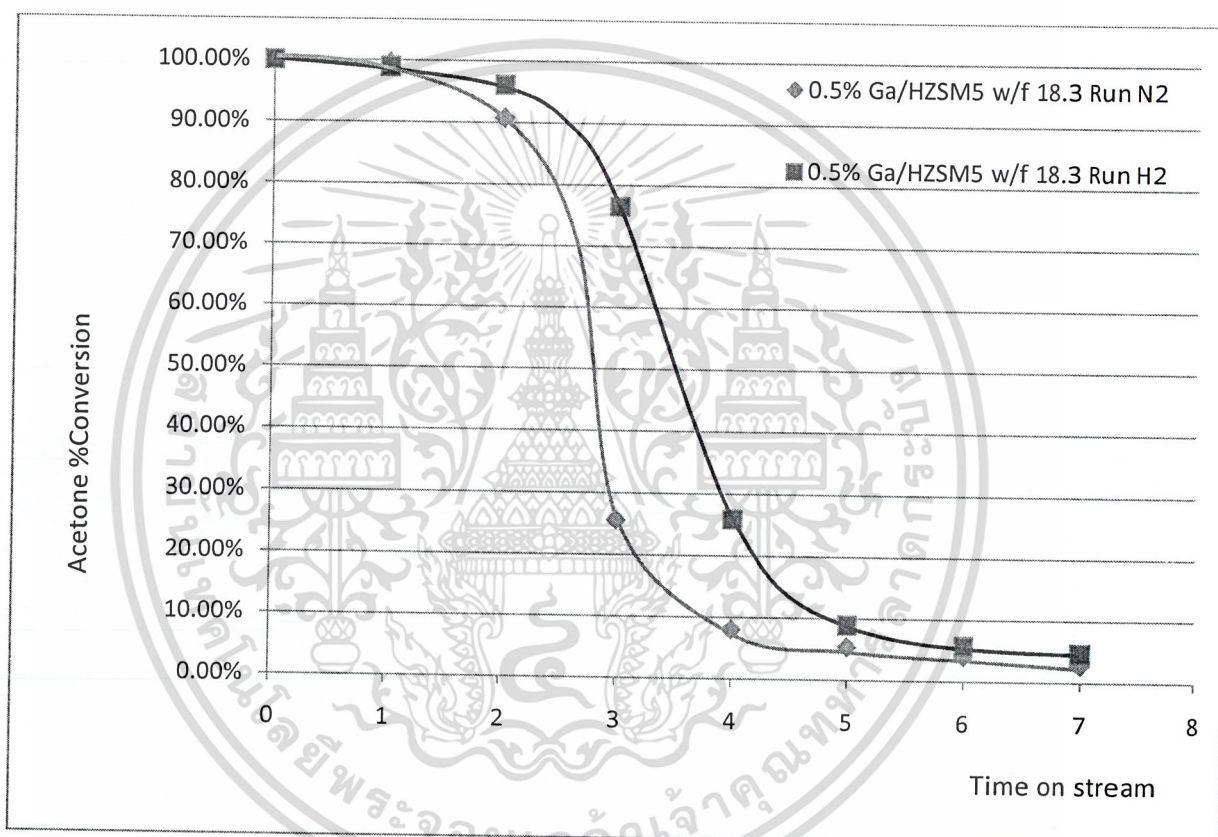
ทดสอบที่เวลาสัมผัส 18.3 g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพา มีอัตราการไหล 30 ml/min

จากตารางที่ 4.4 พบว่าที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ประมาณ 84% ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมโลหะแกลเลียม มีค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารอะโรมาติกรวมถึง 93.8% แต่มีค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ไฮโดรคาร์บอน C5-C8 น้อยกว่า ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ให้ค่าการเลือกเกิดของสารอะโรมาติกรวม (%Selectivity) ต่ำกว่า (83.3%) แต่ให้ไฮโดรคาร์บอน C5-C8 มากกว่าอย่างเห็นได้ชัดและที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ประมาณ 47% ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพไปแล้ว ก็ยังให้ค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) สารอะโรมาติกรวมมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 อยู่ ทั้งนี้อธิบายได้ว่าโลหะแกลเลียมที่ใส่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) เพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์อะโรมาติกมากขึ้น

ทั้งนี้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของ Ga/HZSM5 จะเกิดได้ดีในสถานะที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาเท่านั้น หากทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซิโตนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 โดยใช้แก๊สพาเป็นไนโตรเจนจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 4.8

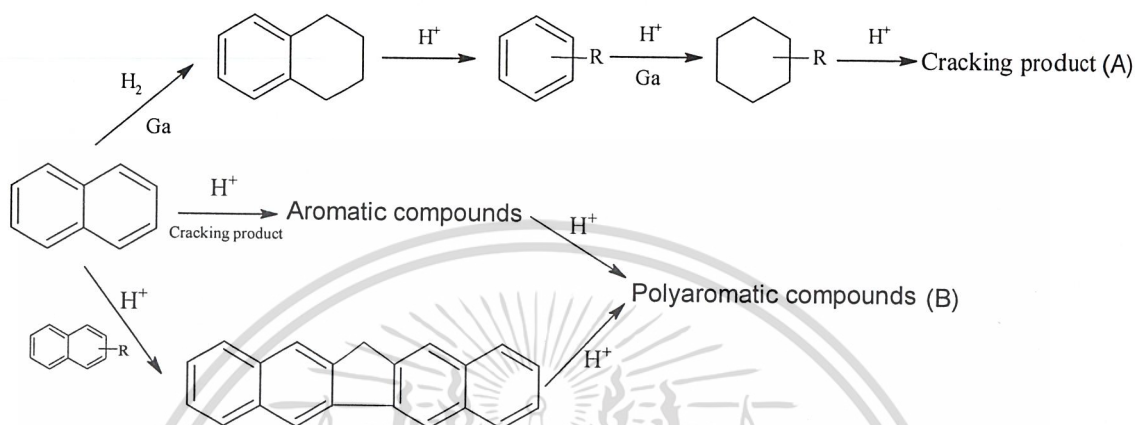


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาของการทำปฏิกิริยาผ่าน 0.5%Ga/HZSM5 ที่ใช้แก๊สไนโตรเจน และไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C

จากรูปที่ 4.8 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 มีการเสื่อมสภาพอย่างต่อเนื่องนี้เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนจะไปช่วยลดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) และเพิ่มปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ให้เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวมากขึ้นโดย

เอกสดำเนินการ (Acid site) ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมโลหะแกดเลียม จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวไม่จำกัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Cracking) ของไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ ดังตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวของแนฟทาลิน (Naphthalene) ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงสมการปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวของแนฟทาลิน โดย (A) คือการเกิดปฏิกิริยาผ่าน Ga/HZSM5 (B) คือการเกิดปฏิกิริยาผ่าน HZSM5^{viii}

ดังนั้นการใช้ไนโตรเจนจะทำให้โค้กสลายตัวยากขึ้น โดยจะเห็นได้จากค่าอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition Temperature) ของโค้กในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของโค้กในตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 ที่ใช้แก่สพาท่างกันด้วยเทคนิคTGA

Parameter	H ₂	N ₂
	Condition	Condition
Decomposition temperature	587	607
%Weight loss	9.6	9.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางแสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition Temperature) ของโค้กที่ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวพามีค่าสูงกว่าการใช้แก๊สไฮโดรเจน โดยมีปริมาณโค้กใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าโค้กที่เกิดภายใต้สภาวะแก๊สไฮโดรเจนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำกว่าจึงสลายตัวได้ง่าย เป็นผลให้อัตราการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนช้ากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไนโตรเจน ส่วนปริมาณของโค้กในตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองที่มีค่าใกล้เคียงกัน เป็นผลเนื่องมาจากขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองนั้นใกล้เคียงกัน (พิจารณาจากพื้นที่ผิวในตารางที่ 4.7) ดังนั้นปริมาณโค้กที่เกิดขึ้นและสะสมอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ จึงถูกจำกัดปริมาณด้วยปริมาตรและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างแบบ MFI

นอกจากแก๊สไฮโดรเจนช่วยลดการเกิดเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังมีผลต่อค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 4.6

รูปที่ 4.6 ตารางแสดงค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) เปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะแก๊สพาไฮโดรเจนกับไนโตรเจน

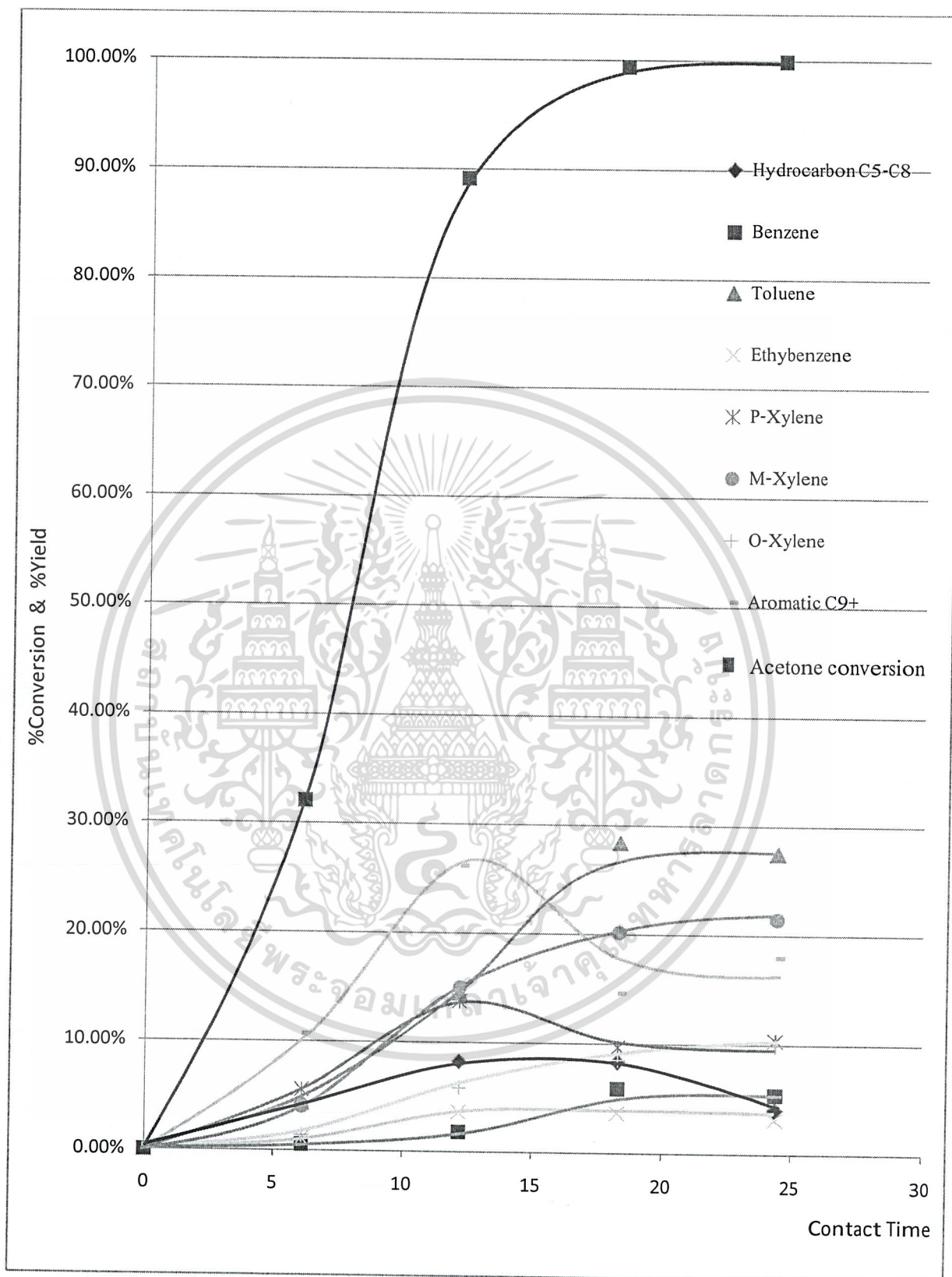
Product	0.5%Ga/HZSM5 Run H2	0.5%Ga/HZSM5 Run N2
Hydrocarbon C5-C8	6.8%	9.1%
Benzene	5.6%	4.8%
Toluene	27.5%	24.8%
Ethylbenzene	3.9%	3.6%
P-Xylene	10.0%	9.3%
M-Xylene	20.3%	19.1%
O-Xylene	8.7%	8.6%
Aromatic C9+	17.1%	20.5%
Total Aromatic	93.2%	90.9%

ทดสอบที่เวลาสัมผัส 18.3 g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 พบว่าค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารอะโรมาติกจำพวกเบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีนลดลงเมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา ในขณะที่สารอะโรมาติกขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการแตกตัวของแนฟทาลินที่ต้องอาศัยแก๊สไฮโดรเจนเท่านั้น (รูปที่ 4.9) แต่สารอะโรมาติกของทั้งสองสภาวะนั้นยังมีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ 92%) แสดงให้เห็นว่าการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาช่วยเพิ่มค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารอะโรมาติกจำพวกเบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน และช่วยลดการเกิดสารอะโรมาติกขนาดใหญ่จากปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) และปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพช้าลงด้วย แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 ไม่เหมาะสมสำหรับการเร่งปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซีโตนด้วยแก๊สพาไนโตรเจนดังนั้นในการศึกษาผลของเวลาสัมผัสจึงใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาในการทดสอบ

จากการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซีโตนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 ที่เวลาสัมผัสเปลี่ยนไปพบว่าได้สารอะโรมาติกมากขึ้นและมีสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 ลดลง เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4.10

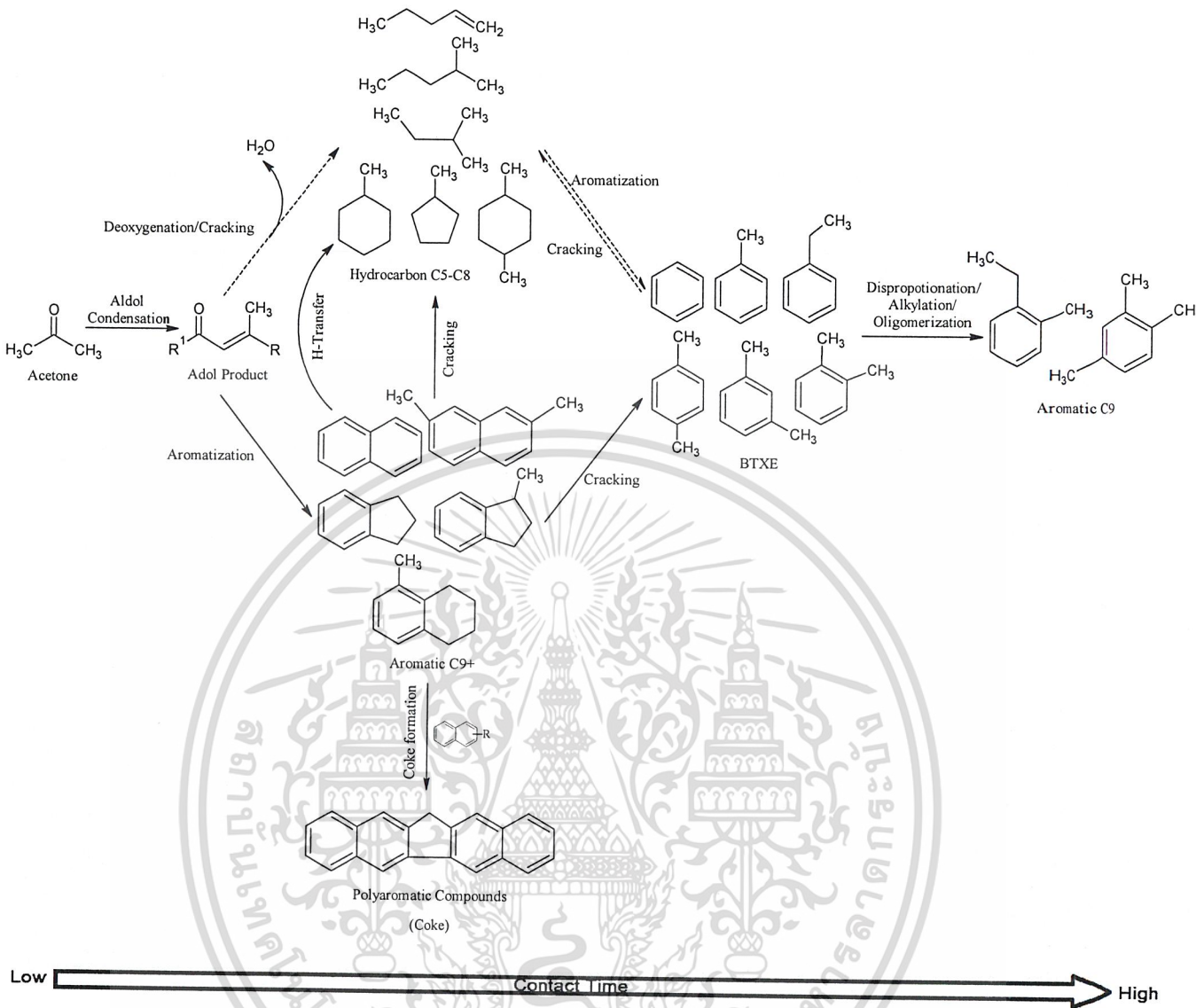


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ (%Yield) กับเวลาสัมผัส 6.1,

12.2, 18.3 และ 24.4 g.h/mol ที่ชั่วโมงที่ 1 ของ 1% Ga/HZSM-5 ที่อุณหภูมิ 400°C โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าที่เวลาสัมผัสค่านั้น สารอะโรมาติกขนาดใหญ่มีปริมาณมากกว่า สารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 ซึ่งแตกต่างจากการทำปฏิกิริยาด้วย HZSM5 จากนั้นเมื่อเวลาสัมผัส เพิ่มขึ้นสารอะโรมาติกขนาดใหญ่จะมีปริมาณลดลงในขณะที่สารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 ซึ่งเคยเป็น ผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาที่ใช้ HZSM5 (ดังรูปที่ 4.5) กลับพบได้น้อยมากในปฏิกิริยาที่ใช้ Ga/HZSM5 ส่วนสารอะโรมาติกจำพวกโทลูอีน เบนซีน เอทิลเบนซีน และไซลีน มีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองทำให้อนุมานได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่พบ เกิดจากปฏิกิริยาแอลคอลลคอนเดนเซชัน (Aldol condensation) ของอะซิโตนเป็นสารผลิตภัณฑ์แอลคอลลขนาดใหญ่เช่นเดียวกับที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 แต่ผลิตภัณฑ์แอลคอลลนี้จะสามารถเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) เป็นอะโรมาติกขนาดใหญ่ได้ดีกว่าปฏิกิริยาการขจัดออกซิเจน (Deoxygenation) เป็นสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 เมื่อเติมโลหะแก่เลยบนตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้เนื่องจากโลหะแก่เลยมีความสามารถในการเพิ่มปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) และลดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ทำให้เกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของสารอะโรมาติกขนาดใหญ่ในช่วงเวลาสัมผัสต่ำ จากนั้นอะโรมาติกขนาดใหญ่ จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) เป็นสารอะโรมาติกจำพวก เบนซีน โทลูอีน เอทิลเบนซีน และไซลีน โดยลำดับการเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซิโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.11 ลำดับการเกิดสารผลิตภัณฑ์ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาGa/HZSM5

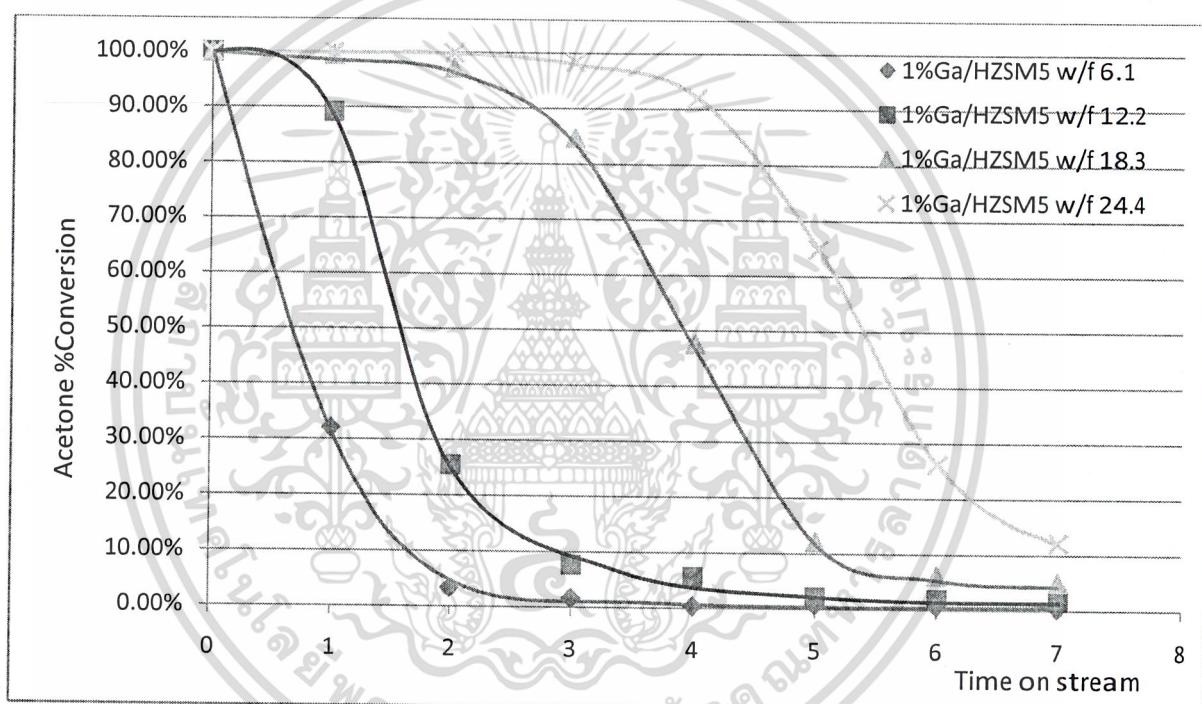
จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าอะซิโตนเกิดปฏิกิริยาผ่านเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) เป็นหลักดังลูกศรทึบ (→) และปฏิกิริยาการขจัดออกซิเจน (Deoxygenation) บางส่วนดังลูกศรประ (-->) ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

และเมื่อเวลาสัมผัสมากขึ้นสารอะโรมาติกจำพวก โทลูอิน เบนซีน เอทิลเบนซีน และไซลีนจะเกิดปฏิกิริยาดิสพรอปอร์ชันเนชัน(Disproportionation), อัลคิเลชัน (Alkylation) และ โอลิโกเมอร์ไนเซชัน (Oligomerization) กลายเป็นสารอะโรมาติกขนาดใหญ่ ส่วนสารไฮโดรคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C5-C8 ก็สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) เป็น โทลูอิน เบนซีน เอทิลเบนซีน และไซลีน ได้มากขึ้นเช่นกัน จึงทำให้สารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 มีแนวโน้มลดลงในขณะที่ เบนซีน โทลูอิน ไซลีน เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาสัมผัสสูง ส่วนผลิตภัณฑ์ไซลีนก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทำปฏิกิริยาผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5

นอกจากค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารอะโรมาติก รวมทั้งเพิ่มขึ้นแล้ว เวลาสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 ยังมีผลต่ออัตราการเสื่อมสภาพด้วยดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา 1%Ga/HZSM5 โดยน้ำหนักอุณหภูมิ 400 °C โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min

จากรูปที่ 4.12 พบว่าเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้มีอัตราการเสื่อมสภาพลดลง ทั้งนี้เนื่องจากโลหะแกลเลียมจะช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส (Hydrogenolysis) เป็นผลให้สารอะโรมาติกขนาดใหญ่เกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Cracking) ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ประมาณ 88% ที่เวลาสัมผัสต่างๆ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 เดิม โโลหะแกลเลียม 1% โดยน้ำหนัก

Product	1%Ga/HZSM5 w/f 12.2g.h/mol	1%Ga/HZSM5 w/f 18.3g.h/mol	1%Ga/HZSM5 w/f 24.4g.h/mol
Hydrocarbon C5-C8	9.3%	6.2%	8.9%
Benzene	2.1%	1.3%	1.6%
Toluene	16.3%	12.8%	13.5%
Ethyl Benzene	4.1%	4.0%	3.9%
P-Xylene	15.5%	17.0%	14.0%
M-Xylene	16.9%	14.9%	14.8%
O-Xylene	6.6%	5.9%	6.0%
Aromatic C9+	29.4%	37.9%	37.3%
Total Aromatic	90.7%	93.8%	91.1%
%Conversion	89.1%	84.6%	92.0%

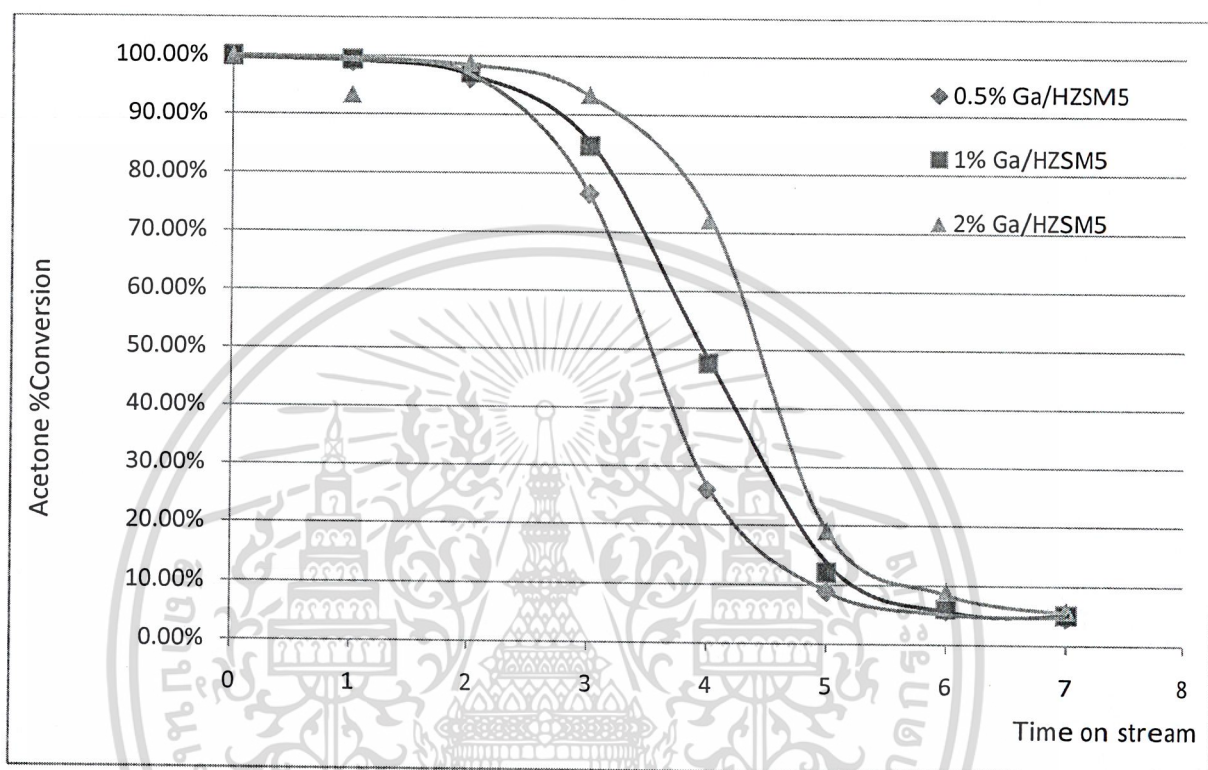
ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 °C โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min

เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสจาก 12.2 g.h/mol เป็น 18.3 g.h/mol พบว่าได้สารอะโรมาติกรวม (Total Aromatic) มากขึ้น โดยพบสารอะโรมาติกขนาดใหญ่เท่ากับ 37.8% พาราไซลีน 17% โทลูอีน 12.8% เมตาไซลีน 15% ออโทไซลีน 5.9% เอทิลเบนซีน % และเบนซีน 1.3% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสมากขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสเป็น 24.4 g.h/mol พบว่าสารอะโรมาติกรวมลดลงเนื่องจากสารอะโรมาติกเกิดปฏิกิริยาแตกตัวกลับไปเป็นสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 จึงสรุปได้ว่าที่เวลาสัมผัส 18.3 g.h/mol มีความเหมาะสมต่อการผลิตสารอะโรมาติกจากอะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลของปริมาณโลหะแกลเลียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาHZSM5

เมื่อเพิ่มปริมาณโลหะแกลเลียมบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยามากขึ้นดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์เทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ปริมาณโลหะแกลเลียม 0.5%, 1% และ 2% โดยใช้น้ำหนักเวลาสัมผัส 18.3 g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min

จากรูปที่ 4.13 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโลหะแกลเลียม 2% โดยน้ำหนัก มีอัตราการเสื่อมสภาพช้าที่สุด แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มของปริมาณโลหะแกลเลียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยลดอัตราการเสื่อมสภาพได้ เนื่องจากโลหะแกลเลียมสามารถช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส (Hydrogenolysis) ของโค้กทำให้เกิดโค้กได้น้อยลงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เป็นผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพที่ช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากปริมาณ โลหะแกดเลียมจะมีผลต่ออัตราการเสื่อมสภาพแล้วยังมีผลต่อค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์ที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ประมาณ 94% ที่ปริมาณ โลหะแกดเลียม 0.5, 1 และ 2% โดยน้ำหนัก

Product	0.5%wt. Ga	1%wt. Ga	2%wt. Ga
Hydrocarbon C5-C8	9.1%	4.5%	9.6%
Benzene	2.7%	1.9%	2.3%
Toluene	17.4%	16.1%	17.0%
Ethyl Benzene	4.3%	4.0%	4.4%
P-Xylene	12.3%	12.0%	14.4%
M-Xylene	19.3%	18.6%	17.5%
O-Xylene	7.7%	8.2%	6.9%
Aromatic C9+	27.2%	34.9%	27.8%
Total Aromatic	90.9%	95.8%	90.4%

ทดสอบที่เวลาสัมผัส 18.3 g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหล 30 ml/min

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเพิ่มโลหะแกดเลียม 1% โดยน้ำหนักจะสามารถผลิตสารอะโรมาติกรวมได้ปริมาณมากที่สุดเนื่องจากโลหะแกดเลียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) ทำให้เกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) เกิดเป็นสารอะโรมาติกขนาดใหญ่ หากแต่การเพิ่มโลหะแกดเลียมมากเกินไป จะทำให้สารอะโรมาติกขนาดใหญ่เกิดการปฏิกิริยาแตกตัวจากปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส (Hydrogenolysis) ไปเป็นสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสารอะโรมาติกจำพวกเบนซีน โทลูอีน เอทิลเบนซีน และไซลีน เกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่ปริมาณโลหะแกดเลียม 0.5%

เอกสารโดยน้ำหนัก และมีสารอะโรมาติกขนาดใหญ่ปริมาณน้อยด้วย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา (Characterization)

จากผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เติมโลหะแคลเดียมในปริมาณต่างๆ ด้วย XRF พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวมีอัตราส่วน Si/Al ประมาณ 38 และมีปริมาณโลหะแคลเดียมในองค์ประกอบเท่ากับ 0.3%, 1% และ 2% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้การเติมโลหะแคลเดียมไม่มีผลต่อลักษณะรูพรุนและความสมบูรณ์ของผลึกดังผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับของก๊าซ (Gas absorption (BET)) ซึ่งพบว่าความสมบูรณ์ของผลึกและพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ก่อนและหลังเติมโลหะแคลเดียมนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน (พื้นที่ผิวประมาณ $370 \text{ m}^2/\text{g}$)

ตอนที่ 2 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา

จากผลการทดสอบปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซีโตนผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการเสื่อมสภาพตลอดเวลา โดยที่เวลาสัมผัสต่ำๆ นั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีอัตราการเสื่อมสภาพที่รวดเร็ว แต่เมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นตัวเร่งปฏิกิริยามีอัตราการเสื่อมสภาพที่ช้าลง เนื่องมาจากผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อนำสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC FID และ GC-MS ประกอบกันพบว่าสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethyl-Benzene) พาราไซลีน (p-Xylene) เมตาไซลีน (m-Xylene) ออโทไซลีน (o-Xylene) และสารอะโรมาติกขนาดใหญ่ (Aromatic C9+) โดยที่เวลาสัมผัส 18.3 g.h/mol ให้ค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารผลิตภัณฑ์อะโรมาติกสูงที่สุด (67.9%) เมื่อเทียบกับเวลาสัมผัสอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ (%Yield) จากการทดสอบปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซีโตน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เวลาสัมผัส 6.1 ถึง 24.4 g.h/mol พบว่า กลไกปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซีโตนเกิดปฏิกิริยาผ่านแอลดอลคอนเดนเซชัน (Aldol condensation) ได้ผลิตภัณฑ์แอลดอลขนาดใหญ่ (Aldol Product) จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาการขจัดออกซิเจน (Deoxygenation) และปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) โดยจะเกิดปฏิกิริยาการขจัดออกซิเจน (Deoxygenation) มากกว่า จึงทำให้ได้ปริมาณของสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 มากกว่าปริมาณของสารอะโรมาติกขนาดใหญ่ (Aromatic C9+)

เมื่อทำการทดสอบผลของการเติมโลหะแกเลียมบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ต่อปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซีโตน พบว่าอะซีโตนสามารถเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ผ่านผลิตภัณฑ์แอลดอลขนาดใหญ่ (Aldol Product) เพิ่มขึ้น ทำให้ได้สารอะโรมาติกขนาดใหญ่ (Aromatic C9+) มากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 แต่เกิดปฏิกิริยาการขจัดออกซิเจน (Deoxygenation) ลดลงทำให้ได้สารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 ปริมาณน้อย โดยมีค่าการเลือกเกิด (%Selectivity) ของสารอะโรมาติกรวม (Total Aromatic) เพิ่มขึ้น 10% (จาก 83 เป็น 93%) และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 มากนั้น จะช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส (Hydrogenolysis) ทำให้สารอะโรมาติกขนาดใหญ่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) เป็นสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 มากขึ้นเป็นผลให้การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เติมโลหะแกเลียมลดลงเมื่อเวลาสัมผัสมากขึ้น

ทั้งนี้การใช้ Ga/HZSM5 ต้องใช้แก๊สพาเป็นไฮโดรเจนเท่านั้น เนื่องจากการใช้แก๊สพาเป็นไนโตรเจนจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่เติมโลหะแกเลียมอย่างรวดเร็ว

นอกจากนั้นยังพบว่า การเติมโลหะแกเลียม 1 % โดยน้ำหนัก (1% Ga/HZSM5) จะสามารถผลิตสารอะโรมาติกรวม (Total Aromatic) ได้ปริมาณมากที่สุด แต่ที่ปริมาณโลหะแกเลียม 0.5% โดยน้ำหนัก จะทำให้ผลิตสารเบนซีน โทลูอีน เอทิลเบนซีน และไซลีนมากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มปริมาณโลหะแกเลียมมากเกินไป (ที่ 2 % โดยน้ำหนัก) จะทำให้ปริมาณของอะโรมาติกขนาดใหญ่ (Aromatic C9+) ลดลงเพราะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) เป็นสารไฮโดรคาร์บอน C5-C8 แต่ก็ช่วยให้การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมโลหะแกเลียมนี้ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
 ไม่คุ้มครองใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) และการเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (Aromatization) ของอะซิโตนซึ่งมีผลต่อค่าการเลือกเกิดของสารผลิตภัณฑ์ (%Product Selectivity)
- 2) ควรศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแคลซิเนชัน (Calcination) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 ที่มีผลต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา
- 3) ควรทดสอบปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชันด้วยสารตั้งต้นอื่นที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เพื่อศึกษาความสามารถในการผลิตสารอะโรมาติกจากตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5
- 4) ควรศึกษาผลของเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น เพื่อดูความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา และความสามารถในการผลิตสารอะโรมาติก
- 5) เนื่องจากการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในปัจจุบันใช้การเก็บสารที่อุณหภูมิต่ำก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วย GC-FID ส่งผลให้สารผลิตภัณฑ์บางส่วนหายไป ทำให้ไม่สามารถเก็บสารผลิตภัณฑ์โดยรวมได้จึงเสนอแนะให้ใช้การต่อแท่งปฏิกรณ์แก้วโดยตรงกับเครื่อง GC-FID
- 6) อาจเพิ่มโลหะชนิดอื่นบนตัวเร่งปฏิกิริยา Ga/HZSM5 เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตสารอะโรมาติกขนาดใหญ่

Reference

ⁱ[1] จีรกานต์ เมืองนาโพธิ์; สุวัฒนา พวงเพิกสีก; วรพัฒน์ อรรถยุกติ; ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ

ⁱⁱ[2] รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร Executive Summary Report โครงการศึกษาศักยภาพและความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวลระดับเชิงพาณิชย์ Potentials and Feasibility Study on Biomass to Liquid Production in Commercial Scale.

ⁱⁱⁱ[4] Bhatia, S. (1990), Zeolite Catalysis : Principles and Applications, “CRC Press”, Inc, Boca Raton, Florida. 290

Breck, D.W. (1974), Zeolite Molecular Sieves: Structure, “Chemical and Use”, John Wiley & Sons, Inc, New York.

^{iv}[5] Proceedings of the 36th Kasetsart University Annual Conference: Abstracts, Bangkok (Thailand), p. 237

^v[6] J.O. Metzger, M.Eissen, “Concepts on the contribution of chemistry to a sustainable development. Renewableraw Materials”, Comptes Rendus Chimie, 7, 2004, 569-581

H.R. Badr, R. Toledo, M.K. Hamdy, “continuous acetone-ethanol-butanol fermentation by immobilized cells of clostridium acetobutylicum”, Biomass And Bioenergy, 20, 2001, 119-132.

[7] h4.Guisnet N.S.Gnep and F.Aano, Appl. Catal. i: General, 89(1992)1., N.S.Gnep, J.Y.Doyemet, et al, Appl. Cata1., 43(1988)155-166., G.L.Price and V.Kanazi Rev, J.Catal. 126(1990)267-27

เอกสารนี้ [8] On leave from Institute of Petroleum and Chemistry, M. Azizbekov, Baku, Azerbaijan. งานการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[9] On leave from Institute of Petroleum and Chemistry, M. Azizbekov, Baku, Azerbeidjan.

[10] A. C. Faro Jr., Instituto de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil; V. O. Rodrigues, Instituto de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil.

[11] Journal of Sustainability Science and Management ISSN 1823-8556 Volume: 2; Issue: 1; Start page: 75; Date: 2007;

[12] Institut de Recherchessur la Catalyse, 2 av. Albert Einstein, 69626 Villeurbanne Cedex, France

[13] Adsorption properties of methane on Mo and Pd–Ga loaded HZSM-5 at mild temperature Journal Catalysis Letters Volume 116, Issue 3-4 , pp 143-148 Cover Date 2007-08-01

[14] U.S. Pat. 4,108,910 (Aug. 22, 1978), M. Godfroid and R. Gerkens (to Solvay & Cie.).

[15] 621 Ways to Succeed, 1993-1994 Materials Selection Guide, Form No. 304-00286-1292XSMG, The Dow Chemical Co., Midland, Mi., 1993.

[16] A Guide to Glycols, Form No. 117-00991-89, The Dow Chemical Co., Midland, Mi., 1981.

[17] The Polyglycol Handbook, Form No. 118-1026-889-AMS, The Dow Chemical Co., 1988.

[18] Overview Guide to Dow Polyglycols, Form No. 118-01163-592 AMS, The Dow Chemical Co., 1992.

[19] The Glycol Ethers Handbook, Form No. 110-00363-290X AMS, Dow Chemical

U.S.A., 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 [20] แบบเรียนเรียนวิชาซีไอไลท่รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

vi [21] Artit Ausavasukhi, Tawan Sooknoi Applied Catalysis A: General 01/2009; 361:93-98.

vii [22] Synthesis of stable H-galloaluminosilicate MFI with hierarchical pore architecture by surfactant-mediated base hydrolysis, and their application in propane aromatization *Journal of Molecular Catalysis. A, Chemical* (August 2012), 360, Complete, pg. 1-15

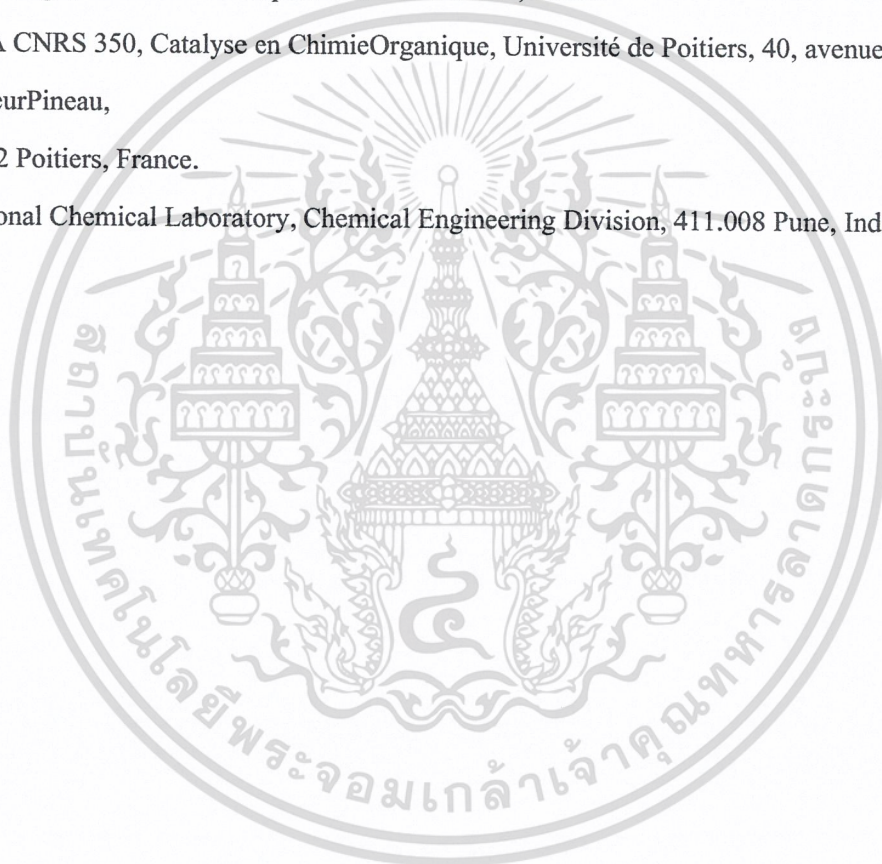
viii [23] M.G.F. Rodrigues¹, P. Magnoux², M. Guisnet² and V.R. Choudhary³

¹ Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Química, avenida Aprígio Veloso, 882

Bodocongó, 58.109-000 Campina Grande - Paraíba, Brazil.

² URA CNRS 350, Catalyse en Chimie Organique, Université de Poitiers, 40, avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers, France.

³ National Chemical Laboratory, Chemical Engineering Division, 411.008 Pune, India.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การคำนวณวิธีการเตรียมโลหะเคลือบเพื่อทำการเอิบซุ่ม (Impregnation)

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณแคลเซียมและตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 เพื่อใช้ในการทำให้เอิบซุ่ม (Impregnation) โดยทำการทำให้เอิบซุ่มโดยใส่แคลเซียม 1% โดยน้ำหนัก

-สูตรเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น ($\text{NH}_4^+/\text{ZSM5}$): $(\text{NH}_4^+)_n\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$; ($0 < n < 27$)

-สูตรเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาใช้งาน (HZSM5): $\text{H}^+\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$; ($0 < n < 27$)

ค่าอัตราส่วน Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยา ($\text{NH}_4^+/\text{ZSM5}$) ที่นำมาใช้เท่ากับ 28 เพราะฉะนั้นเราสามารถหามวลโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาได้จากค่า n ในสูตรเคมีจากการคำนวณดังนี้

$$\frac{\text{Si}}{\text{Al}} = \frac{96-n}{n} = 28 \text{ เพราะฉะนั้นจะได้ค่า } n \text{ เท่ากับ } 3.3103$$

จากค่า n ที่ได้เราสามารถนำไปคำนวณหามวลโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองได้ค่าดังนี้ มวลโมเลกุล (Mw.) ของตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น ($\text{NH}_4^+/\text{ZSM5}$) เท่ากับ 6104.20 กรัม/โมล มวลโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาใช้งาน (HZSM5) เท่ากับ 5759.92 กรัม/โมล

ทำการคำนวณหาปริมาณแคลเซียมที่ต้องใส่ 1% โดยน้ำหนัก จากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ที่ใช้งานจริงโดยคิดจากสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 : Ca เท่ากับ 99 : 1 โดยน้ำหนัก เพราะฉะนั้นสามารถหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณแคลเซียมที่ใส่จริงจากการคำนวณดังนี้

$$\text{ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5} = \frac{99}{100} \times 5 = 4.95 \text{ กรัม}$$

คำนวณหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น ($\text{NH}_4^+/\text{ZSM5}$) ที่ต้องใช้ในการทำให้เอิบซุ่มจากการคำนวณดังนี้

$$\text{ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น (กรัม)} = \frac{\text{มวลโมเลกุลตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น (กรัม/โมล)}}{\text{มวลโมเลกุลตัวเร่งปฏิกิริยาใช้งาน (กรัม/โมล)}} \times 4.95 \text{ (กรัม)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณเราจะได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้นเท่ากับ 5.2458 กรัม จากนั้นสามารถหาปริมาณแกลเลียมใช้จริงได้เท่ากับ $5 - 4.95 = 0.05$ g จากนั้นคำนวณหาปริมาณแกลเลียมไนเตรดที่จะใช้ในการทำให้เอิบซุ่มด้วยวิธีการคำนวณดังนี้

-น้ำหนัก โมเลกุลของแกลเลียมเท่ากับ 69.723 กรัม/โมล

-น้ำหนัก โมเลกุลของแกลเลียมไนเตรด ($\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$) เท่ากับ 255.7386 กรัม/โมล

$$\text{ปริมาณแกลเลียมไนเตรด (กรัม)} = \frac{\text{มวล โมเลกุลแกลเลียม (กรัม/โมล)}}{\text{มวล โมเลกุลแกลเลียมไนเตรด (กรัม/โมล)}} \times 0.05 \text{ (กรัม)}$$

จากการคำนวณจะได้ปริมาณแกลเลียมไนเตรดเท่ากับ 0.1834 กรัม จากค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งหมดเราสามารถสรุปได้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้นและแกลเลียมไนเตรดที่ต้องใช้ในการทำให้เอิบซุ่มเท่ากับ 5.2458 และ 0.1834 กรัม ตามลำดับ

การคำนวณหา Response Factor จากสารมาตรฐาน

$$(1) \text{ Standard (A) Area ratio } 1 = \frac{\text{CB} = \text{Chlorobenzene Standard (A) Peak Area}}{\text{CB Peak Area (Internal Standard)}}$$

$$(2) \text{ Factor } 1 = \frac{\text{Acetone (g)}}{\text{CB Standard 1 (g)}}, \text{ Factor } 2 = \frac{\text{Total Standard - Acetone (g)}}{\text{CB Standard 2 (g)}}$$

$$(3) \text{ Standard (A) Area ratio } 2 = \frac{\text{Factor } 1}{\text{Factor } 2} \times \text{Standard (A) Area ratio } 1$$

$$(4) \text{ Standard (A) Response factor} = \frac{\text{Standard (A) (g)}}{\text{Standard (A) Area ratio } 2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณปริมาณสารผลิตภัณฑ์จากการวิเคราะห์ด้วย GC-FID โดยวิธีการนอร์มอลไลซ์ (Normalization)

$$(1) \text{ Product (A) factor} = [\text{Product (A) Peak Area}] \times [\text{Standard (A) Response factor}]$$

$$(2) \text{ Product (A) (\%w/w)} = \frac{\text{Product (A) factor}}{\text{Total Product factor}}$$

การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลง(%Conversion)

$$\% \text{ Conversion} = [\text{Total mass of all fraction (100\%)}] - [\text{Total mass of unconverted feed(\%)}]$$

การคำนวณค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์(%Selectivity)

$$\% \text{ Selectivity of Product (A)} = \frac{\text{Product (A) Factor}}{\text{Total Product Factor} - \text{Acetone factor}}$$

การคำนวณค่าปริมาณของผลิตภัณฑ์(%Yield)

$$\% \text{ Yield of Product (A)} = \frac{\text{Product (A) Selectivity (\%)} \times \text{Conversion (\%)}}{100}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลการคำนวณหา Response factor ของสารมาตรฐาน

Standard	weight (g)	Peak Area	CB Area	Area ratio1	Factor 1/ Factor 2	Area ratio2	Response factor
Hydrocarbon C5-C8	-	-	45420	-	2.7296	-	0.1132
Acetone	0.1216	11556	45420	0.2544	2.7296	0.6944	0.1751
Benzene	-	-	45420	-	2.7296	-	0.1235
Toluene	0.1867	24838	45420	0.5468	2.7296	1.4926	0.1251
Ethyl Benzene	0.2182	21180	45420	0.4663	2.7296	1.2728	0.1714
P-Xylene	0.2142	20329	45420	0.4475	2.7296	1.2217	0.1753
M-Xylene	0.2144	22446	45420	0.4941	2.7296	1.3489	0.1589
O-Xylene	0.2124	20190	45420	0.4445	2.7296	1.2133	0.1751
Aromatic C9+	-	-	45420	-	2.7296	-	0.1812

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารผลิตภัณฑ์จากการวิเคราะห์ด้วย GC-FID

การทดลองที่ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ปริมาณ 0.1 กรัมที่เวลาสัมผัส 6.1g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไนโตรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	70.6%	24.5%	1.4%	13.1%	3.1%	14.1%	12.2%	4.3%	26.9%
2	4.8%	48.8%	1.3%	11.8%	2.9%	16.6%	11.6%	4.1%	2.6%
3	20.6%	94.1%	0%	0.2%	0%	0.3%	0%	0%	5.2%
4	5.5%	95.2%	0%	0%	0%	0.1%	0%	0%	3.2%
5	5.3%	96.2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2.1%
6	5.1%	96.8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.9%
7	7.9%	87.2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3.1%

การทดลองที่ 2 ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ปริมาณ 0.2 กรัมที่เวลาสัมผัส 12.2g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไนโตรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	91.2%	39.5%	3.3%	17.1%	2.9%	8.7%	12.6%	4.7%	10.9%
2	65.8%	41.6%	0.9%	8.9%	2.4%	11.4%	8.9%	5.3%	20.18%
3	26.7%	67.8%	0.3%	3.1%	0.9%	6.8%	4.3%	1.2%	15.21%
4	12.2%	72.3%	0.2%	1.7%	0.3%	5.2%	2.7%	0.3%	12.3%
5	6.2%	86.0%	0.1%	1.2%	0%	3.2%	1.4%	0%	10.5%
6	4.9%	89.2%	0%	0%	0%	1.5%	0.3%	0%	8.2%
7	3.5%	83.2%	0%	0%	0%	0.3%	0%	0%	9.2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3 ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ปริมาณ 0.3 กรัมที่เวลาสัมผัส 18.3g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไนโตรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	97.4%	11.6%	5.4%	26.1%	3.9%	10.1%	19.8%	8.3%	14.6%
2	87.1%	25.2%	2.1%	14.2%	3.4%	11.6%	13.8%	5.4%	24.1%
3	56.5%	29.5%	0.9%	8.6%	2.4%	13.7%	8.4%	3.1	31.1%
4	25.4%	82.9%	0.1%	2.0%	0.4%	3.6%	1.6%	0.5%	8.6%
5	45.6%	98.3%	0%	0.2%	0%	0.3%	0%	0%	1.1%
6	26.1%	98.5%	0%	0.1%	0%	0.3%	0%	0%	0.9%
7	1.6%	83.4%	0%	3.7%	0%	0%	0%	0%	12.8%

การทดลองที่ 4 ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ปริมาณ 0.4 กรัมที่เวลาสัมผัส 24.4g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไนโตรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	99.5%	17.7%	4.9%	25.7%	3.1%	8.4%	17.8%	7.6%	14.6%
2	98.9%	24.9%	4.4%	22.1%	3.4%	8.2%	16.4%	6.7%	13.5%
3	77.6%	24.1%	1.5%	11.4%	2.7%	11.8%	10.3%	3.8%	34.1%
4	62.6%	39.9%	2.5%	14.4%	2.7%	8.1%	11.8%	4.7%	15.6%
5	32.5%	28.6%	1.2%	10.3%	2.7%	17.4%	9.3%	3.2%	26.9%
6	9.6%	55.4%	0.3%	4.4%	0.8%	8.4%	3.4%	1.1%	26.1%
7	13.1%	91.5%	0.1%	1.1%	0%	1.8%	0.6%	0%	4.7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 5 ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ปริมาณ 0.3 กรัมที่เวลาสัมผัส 18.3g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไฮโดรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	98.6%	10.5%	6.3%	28.1%	3.5%	9.2%	19.1%	8.1%	15.1%
2	96.8%	9.5%	3.5%	21.4%	4.1%	10.5%	19.2%	8.0%	23.3%
3	83.5%	16.6%	3.3%	17.3%	3.8%	13.6%	15.1%	5.6%	24.4%
4	45.6%	28.3%	1.1%	9.4%	2.4%	14.2%	8.2%	2.8%	33.2%
5	11.4%	50.4%	0.2%	4.5%	0.9%	8.6%	3.6%	1.2%	30.1%
6	6.4%	65.7%	0%	2.6%	0.3%	4.8%	1.7%	0.4%	24.1%
7	6.1%	82.2%	0%	2.4%	0%	3.8%	1.4%	0%	10.8%

การทดลองที่ 6 ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5wt.Ga/HZSM5 ปริมาณ 0.3 กรัมที่เวลาสัมผัส 18.3g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไนโตรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	99.5%	9.0%	4.0%	24.8%	3.6%	9.3%	19.0%	8.6%	20.4%
2	90.7%	10.4%	2.2%	15.7%	4.1%	14.0%	17.2%	6.7%	29.4%
3	25.6%	29.9%	0.9%	10.4%	2.6%	17.5%	8.5%	2.8%	27.0%
4	8.0%	70.2%	0.2%	3.3%	0.4%	4.7%	1.7%	0.4%	18.7%
5	5.4%	80.6%	0.1%	1.8%	0%	3.5%	0.9%	0.2%	12.4%
6	4.0%	86.4%	0%	1.5%	0%	2.5%	0.7%	0%	8.6%
7	2.7%	60.3%	0%	1.6%	0%	0.3%	0.7%	0%	36.9%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 7 ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5%wt.Ga/HZSM5 ปริมาณ 0.3 กรัมที่เวลาสัมผัส 18.3g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไฮโดรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	98.9%	6.7%	5.6%	27.4%	3.8%	10.0%	20.3%	8.7%	17.0%
2	96.1%	9.1%	2.6%	17.3%	4.3%	12.3%	19.2%	7.7%	2.7%
3	76.5%	15.4%	1.7%	13.9%	3.5%	17.1%	12.2%	4.5%	31.4%
4	25.9%	35.5%	0.1%	8.6%	1.8%	14.4%	5.4%	2.3%	31.4%
5	8.9%	73.2%	0.2%	3.5%	0.5%	6.8%	2.1%	0.5%	12.8%
6	5.8%	68.0%	0.2%	2.8%	0.4%	5.8%	1.7%	0.4%	20.5%
7	4.7%	79.6%	0%	1.8%	0%	3.2%	0.9%	0%	14.2%

การทดลองที่ 8 ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt.Ga/HZSM5 ปริมาณ 0.3 กรัมที่เวลาสัมผัส 18.3g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไฮโดรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	99.4%	8.3%	5.9%	28.5%	3.7%	9.7%	20.2%	8.5%	14.7%
2	97.1%	4.1%	1.9%	16.1%	4.0%	12.0%	18.6%	8.2%	34.8%
3	84.6%	6.1%	1.3%	12.8%	4.0%	16.9%	14.9%	5.8%	37.8%
4	47.6%	17.3%	0.7%	9.4%	3.0%	18.5%	8.8%	3.6%	38.2%
5	12.1%	47.5%	0.3%	4.3%	0.9%	9.6%	3.1%	1.0%	32.9%
6	6.1%	68.3%	0.2%	3.4%	0.3%	5.8%	1.7%	0.4%	19.5%
7	5.1%	54.0%	0.1%	2.7%	0.3%	6.3%	1.6%	0.4%	34.1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 9 ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt.Ga/HZSM5 ปริมาณ 0.3 กรัมที่เวลาสัมผัส 18.3g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไฮโดรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	93.4%	8.6%	5.9%	28.4%	3.2%	10.1%	20.4%	8.9%	14.1%
2	98.8%	6.8%	3.6%	22.5%	4.1%	10.6%	20.5%	8.8%	22.7%
3	93.4%	9.5%	2.3%	17.0%	4.4%	14.3%	17.5%	6.9%	27.7%
4	72.2%	26.8%	1.2%	11.7%	3.3%	19.1%	9.9%	3.4%	24.3%
5	19.1%	37.9%	0.6%	6.5%	1.5%	14.1%	4.0%	1.3%	33.8%
6	9.1%	56.6%	0.3%	4.0%	0.6%	8.2%	2.1%	0.6%	27.2%
7	6.0%	79.2%	0%	2.6%	0.3%	5.4%	1.5%	0.4%	10.3%

การทดลองที่ 10 ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt.Ga/HZSM5 ปริมาณ 0.4 กรัมที่เวลาสัมผัส 24.4g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไฮโดรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	99.9%	4.0%	5.4%	27.4%	3.1%	10.4%	21.4%	9.9%	18.0%
2	99.9%	4.2%	3.6%	21.4%	3.4%	9.6%	19.9%	9.3%	28.2%
3	98.3%	6.8%	3.1%	20.4%	4.1%	10.8%	19.7%	8.2%	26.5%
4	92.0%	8.9%	1.6%	13.4%	3.8%	13.9%	14.8%	6.0%	37.2%
5	64.9%	22.4%	0.9%	9.0%	2.7%	16.7%	8.4%	3.0%	36.6%
6	26.3%	44.6%	0.7%	5.5%	0.9%	9.6%	2.8%	1.3%	34.2%
7	12.2%	59.6%	0.1%	3.2%	0.4%	6.5%	1.9%	0.5%	27.3%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 11 ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt.Ga/HZSM5 ปริมาณ 0.2 กรัมที่เวลาสัมผัส 12.2g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไฮโดรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	89.1%	9.2%	2.0%	16.3%	4.0%	15.4%	16.8%	6.5%	29.3%
2	25.5%	9.7%	0.3%	6.3%	2.1%	18.2%	7.5%	2.7%	52.7%
3	7.7%	31.7%	0.1%	2.5%	0.4%	6.5%	2.0%	0.6%	55.8%
4	5.6%	38.0%	0%	3.6%	0.7%	9.3%	3.0%	0.8%	44.3%
5	2.1%	51.9%	0%	2.7%	0.3%	7.1%	1.7%	0.3%	35.7%
6	1.9%	74.8%	0%	2.2%	0%	4.7%	1.4%	0%	16.7%
7	1.7%	58.7%	0%	3.6%	0%	5.8%	1.6%	0%	30.1%

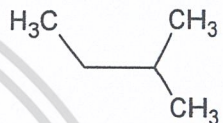
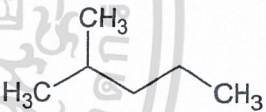
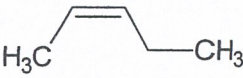

การทดลองที่ 12 ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt.Ga/HZSM5 ปริมาณ 0.1 กรัมที่เวลาสัมผัส 6.1g.h/mol ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 °C โดยใช้แก๊สพาเป็นไฮโดรเจนที่ อัตราการไหล 30 ml/min

TOS	%Conversion	%Yield							
		Hydrocarbon C5-C8	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	P- Xylene	M- Xylene	O- Xylene	Aromatic C9+
1	32.0%	13.4%	1.7%	13.6%	3.5%	17.3%	12.6%	4.2%	33.3%
2	3.3%	52.8%	0.6%	7.0%	1.0%	7.8%	6.9%	1.4%	22.1%
3	1.6%	79.5%	0.5%	2.8%	0%	5.3%	1.8%	0%	9.8%
4	0.3%	58.4%	0%	4.9%	0%	0%	0%	0%	36.6%
5	0.8%	89.0%	0%	2.3%	0%	0%	0%	0%	8.6%
6	0.6%	83.9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	16.0%
7	0.3%	98.4%	0%	1.5%	0%	0%	0%	0%	0%

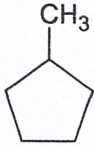
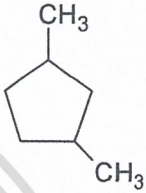

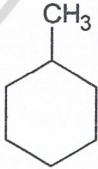
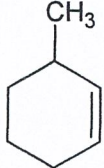
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

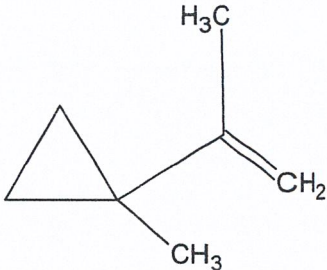
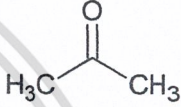
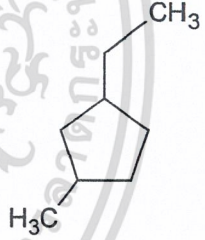
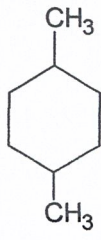
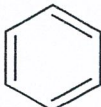
ผลการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค GC-MS

เวลาในการกักสาร (Retention time (Min))	ชื่อสารผลิตภัณฑ์	โครงสร้างผลิตภัณฑ์
2.158	Iso-Pentane	
2.242	2-methyl-Pentane	
2.293	2-Pentene	
2.350	1-Pentene	

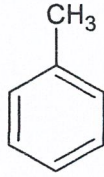
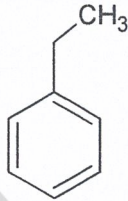

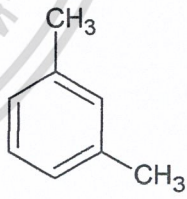
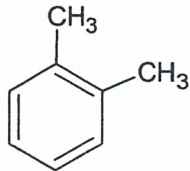
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.412	methyl-cyclopentane	
2.412	1,3-dimethyl-cyclopentane	
2.498	1-methyl-cyclopentene	
2.525	methyl-cyclohexane	
2.564	3-methyl-cyclohexene	

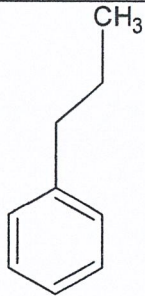
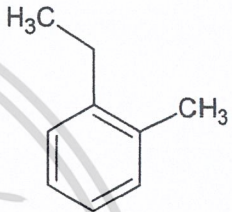
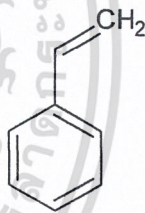
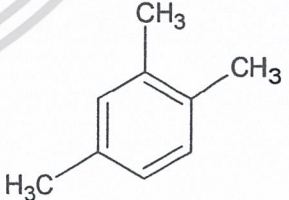
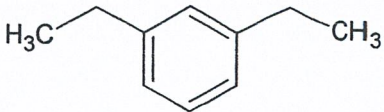
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.680	1-methyl-1-isopropenyl-cyclopropane	
2.710	Acetone	
2.894	1-ethyl-3-methyl-cyclopentane	
2.894	1,4-dimethyl-cyclohexane	
3.443	Benzene	

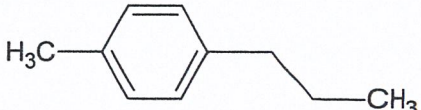
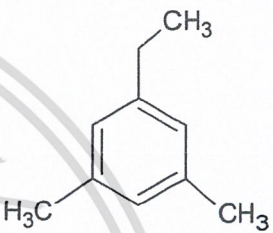
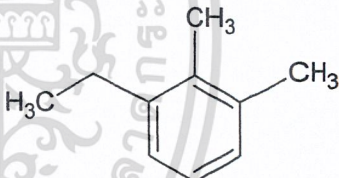
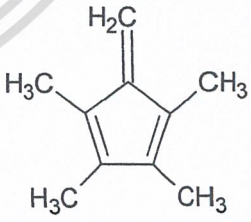

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.458	Toluene	
5.594	Ethyl-benzene	
5.720	P-Xylene	
5.834	M-Xylene	
6.497	O-Xylene	

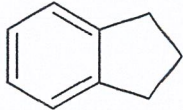
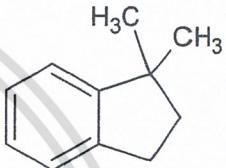
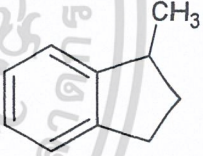
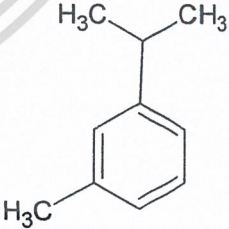
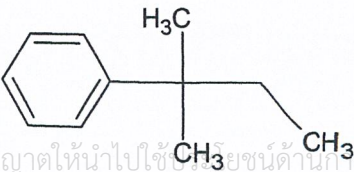
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.856	Propyl-benzene	
7.121	1-ethyl-2-methyl-benzene	
7.673	Styrene	
8.060	1,2,4-trimethyl-benzene	
8.384	1,3-diethyl-benzene	

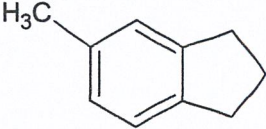
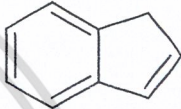
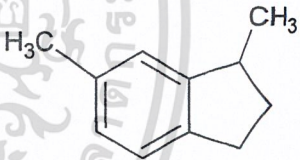
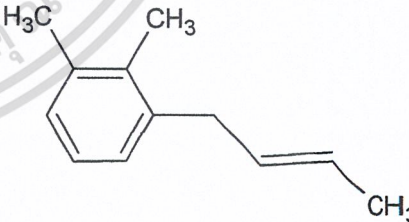
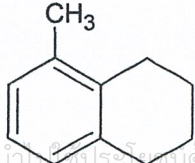
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.479	1-methyl-4-propyl-benzene	
8.744	1-ethyl-3,5-dimethyl-benzene	
9.222	1-ethyl-2,3-dimethyl-benzene	
9.338	1,2,3,4-tetremethyl-5-methylene-1,3-cyclopentadiene	
9.478	4-ethyl-1,2-dimethyl-benzene	

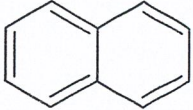
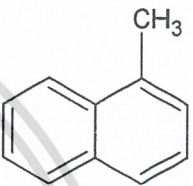
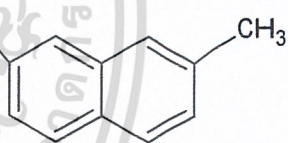
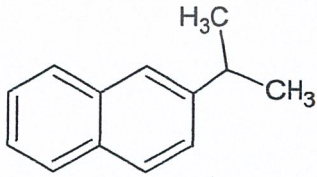
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกาไปใช้

9.589	2,3-dihydro-1H-Indene	
9.784	2,3-dihydro-1,1-dimethyl-1H-Indene	
9.997	1-methyl-Indene	
10.186	1-methyl-3-(1-methylethyl)-benzene	
10.850	1,1-dimethylpropyl-benzene	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.297	2,3-dihydro-5-methyl-1H-Indene	
11.470	Indene	
11.673	2,3-dihydro-1,6-dimethyl-1H-Indene	
12.281	1-(2-butenyl)-2,3-dimethylbenzene	
13.756	1,2,3,4-tetrahydro-5-methyl-naphthalene	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

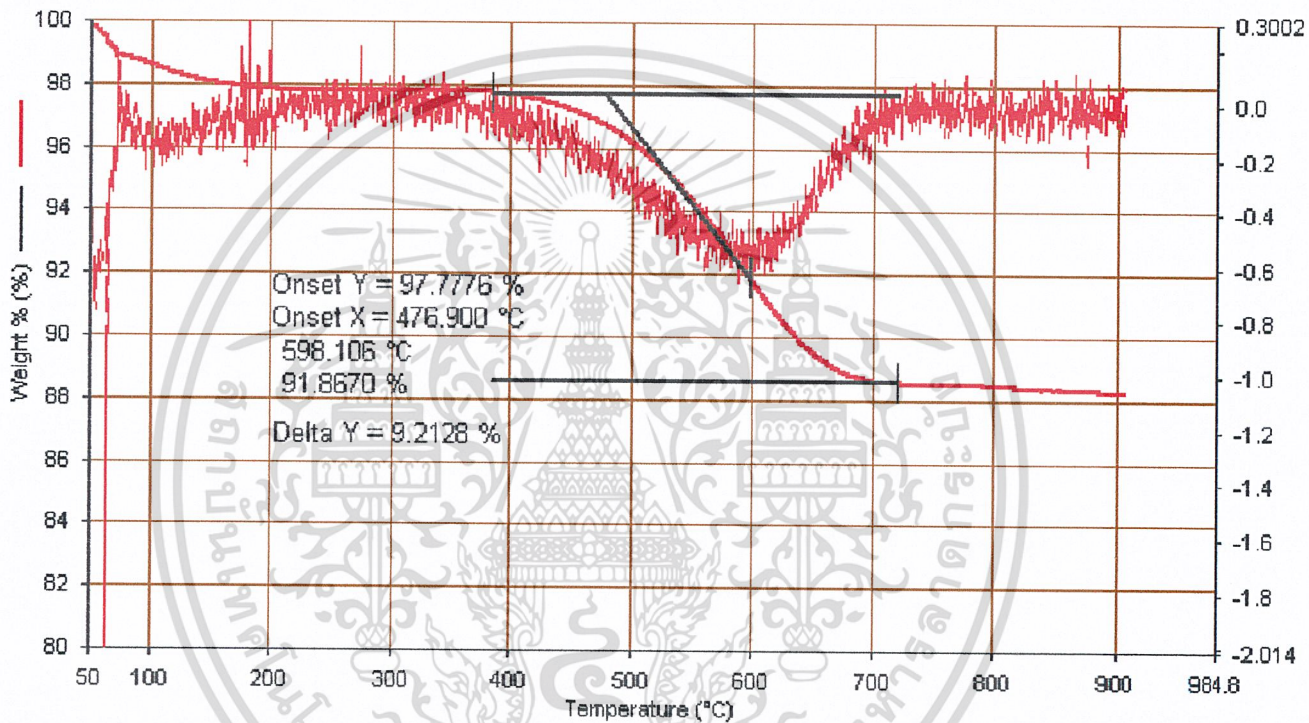
15.312	Naphthalene	
17.309	1-methyl- naphthalene	
18.272	2,7-dimethyl- naphthalene	
19.435	2-(1-methylethyl)- naphthalene	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

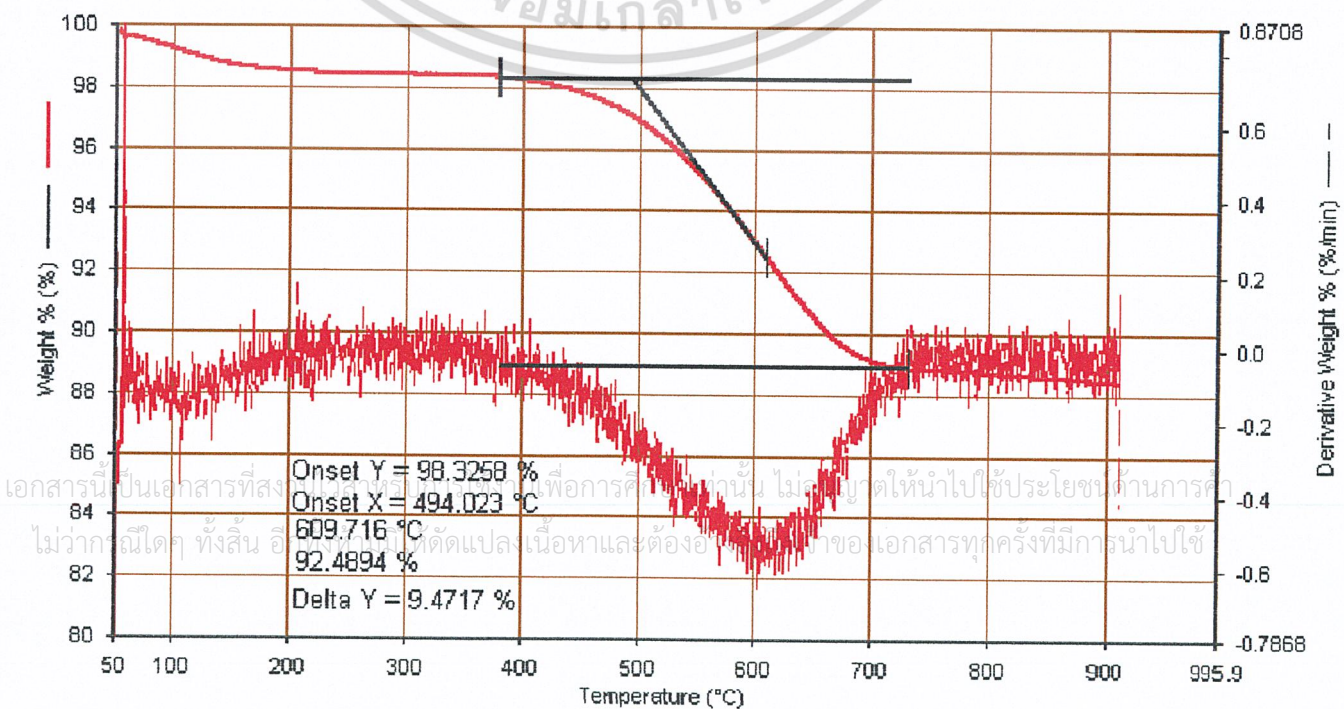
ภาคผนวก ง.

ผลการวิเคราะห์เสถียรทางความร้อนของโค้กในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA)

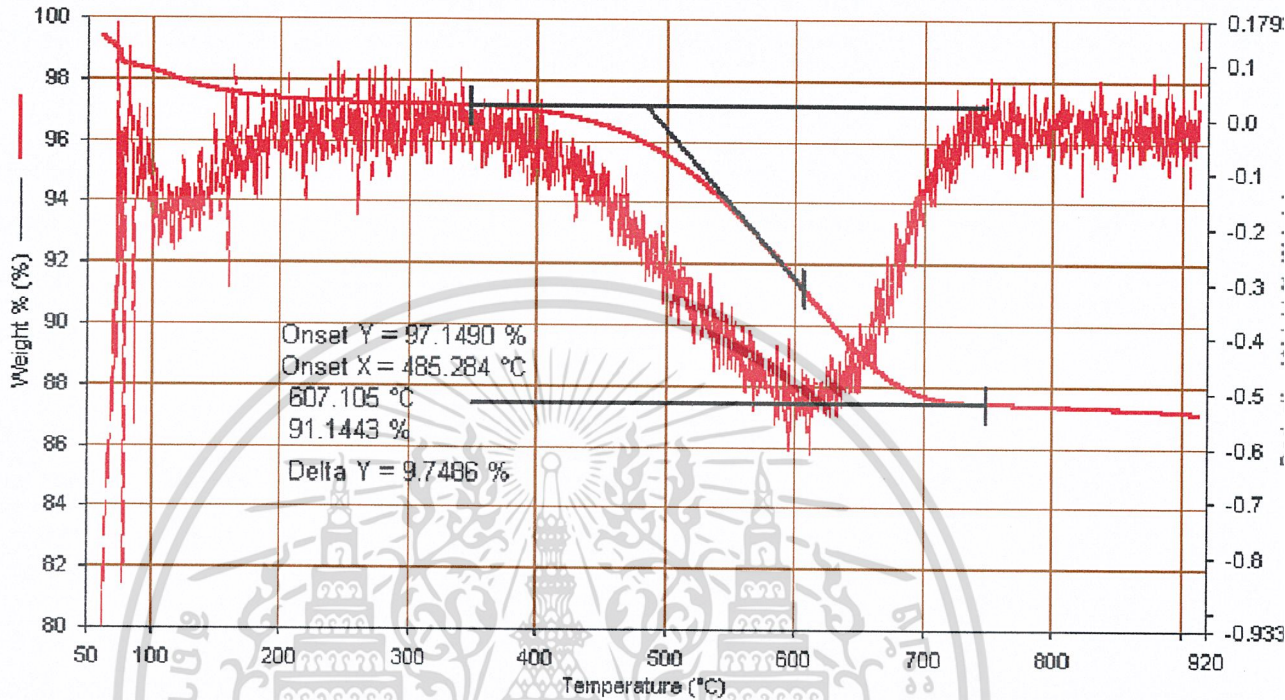
ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพา



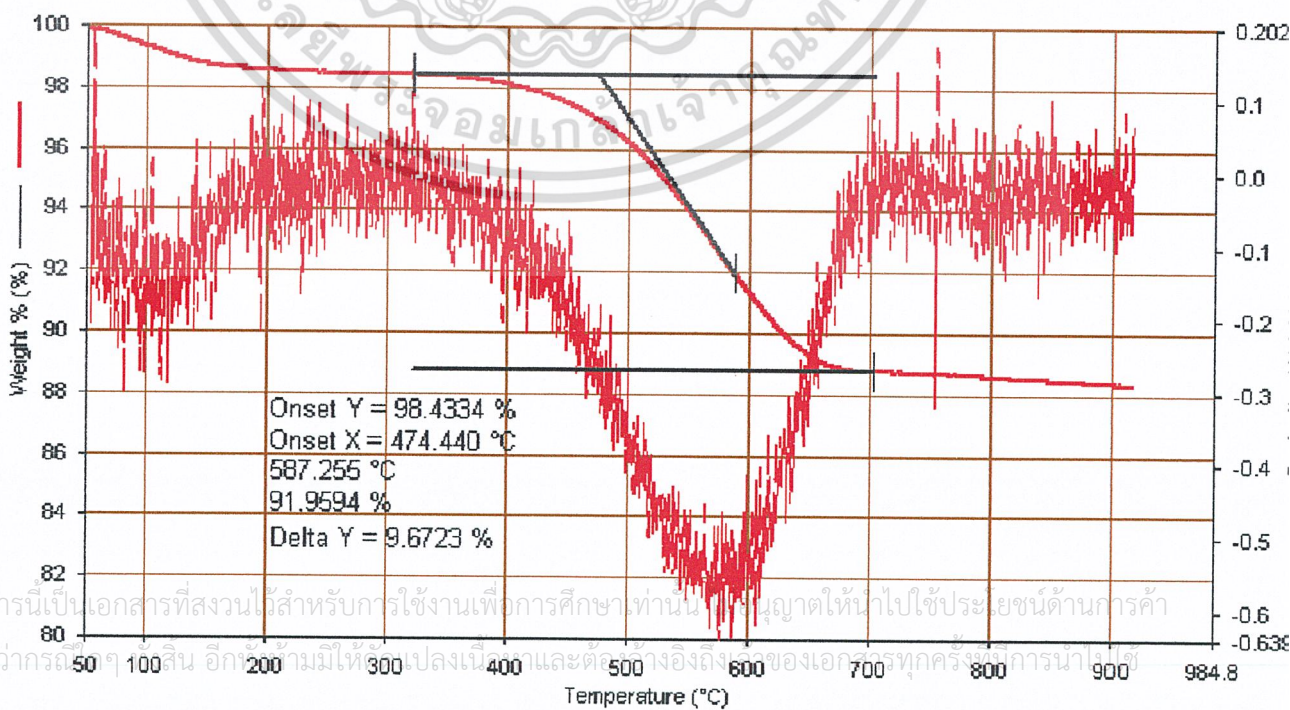
ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5 ทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพา



ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%Ga/HZSM5 ทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา



ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% Ga/HZSM5 ทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพา

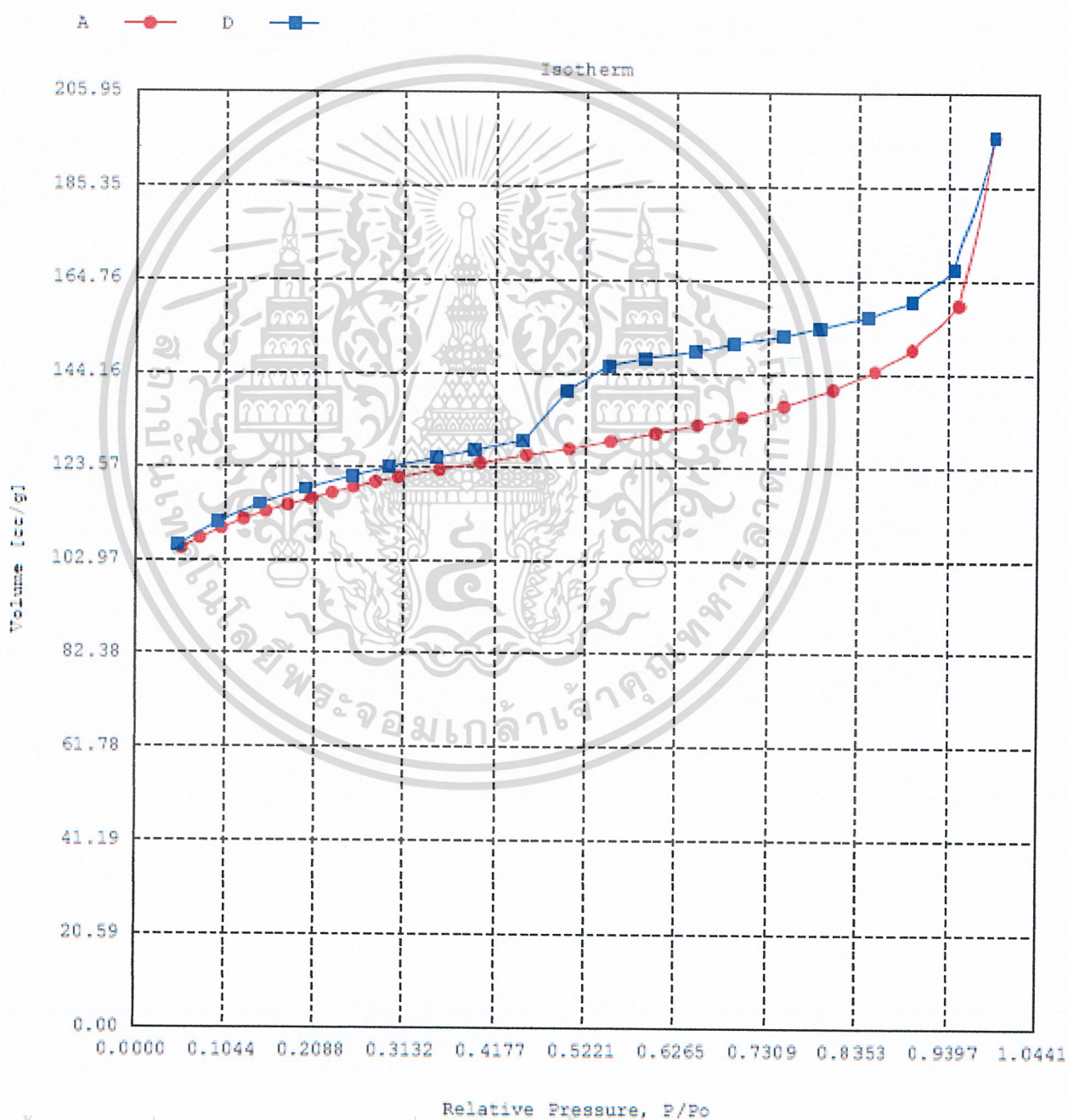


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตัดทอนข้อมูลของเอกสารทุกครั้งเพื่อการนำไปใช้

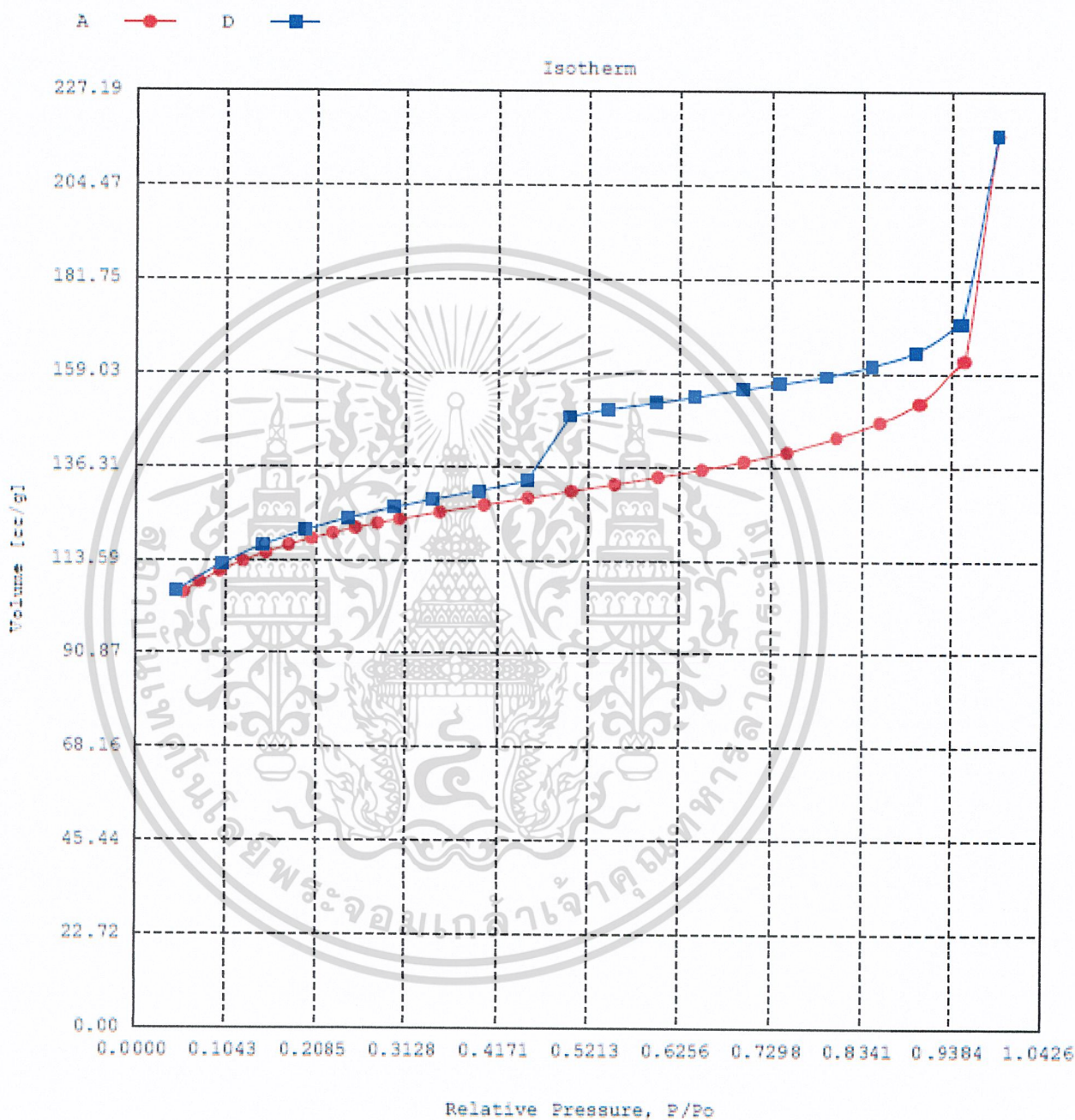
ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับของก๊าซ (Gas Absorption (BET))

Isotherm ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5



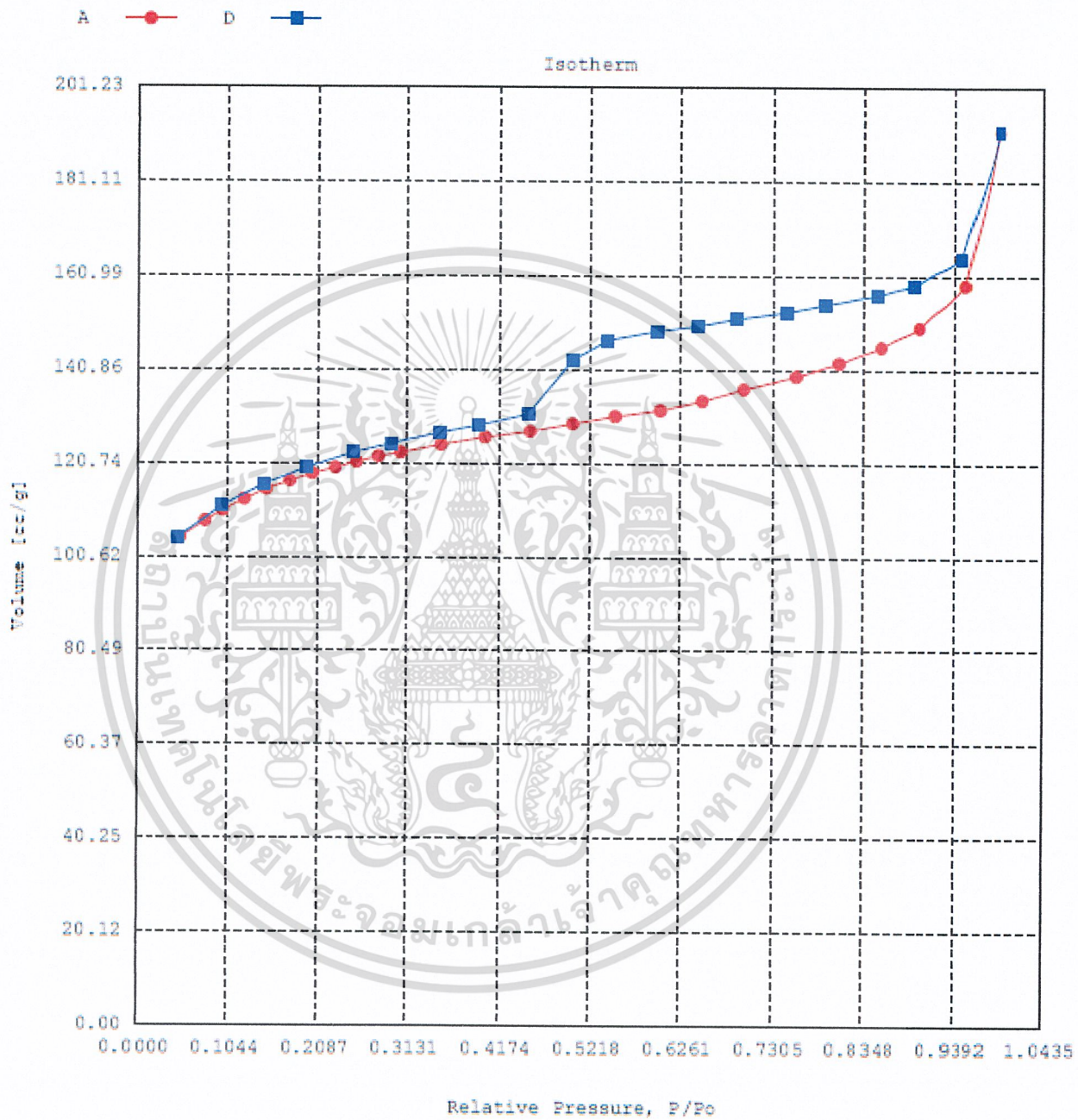
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Isotherm ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5% Ga/HZSM5



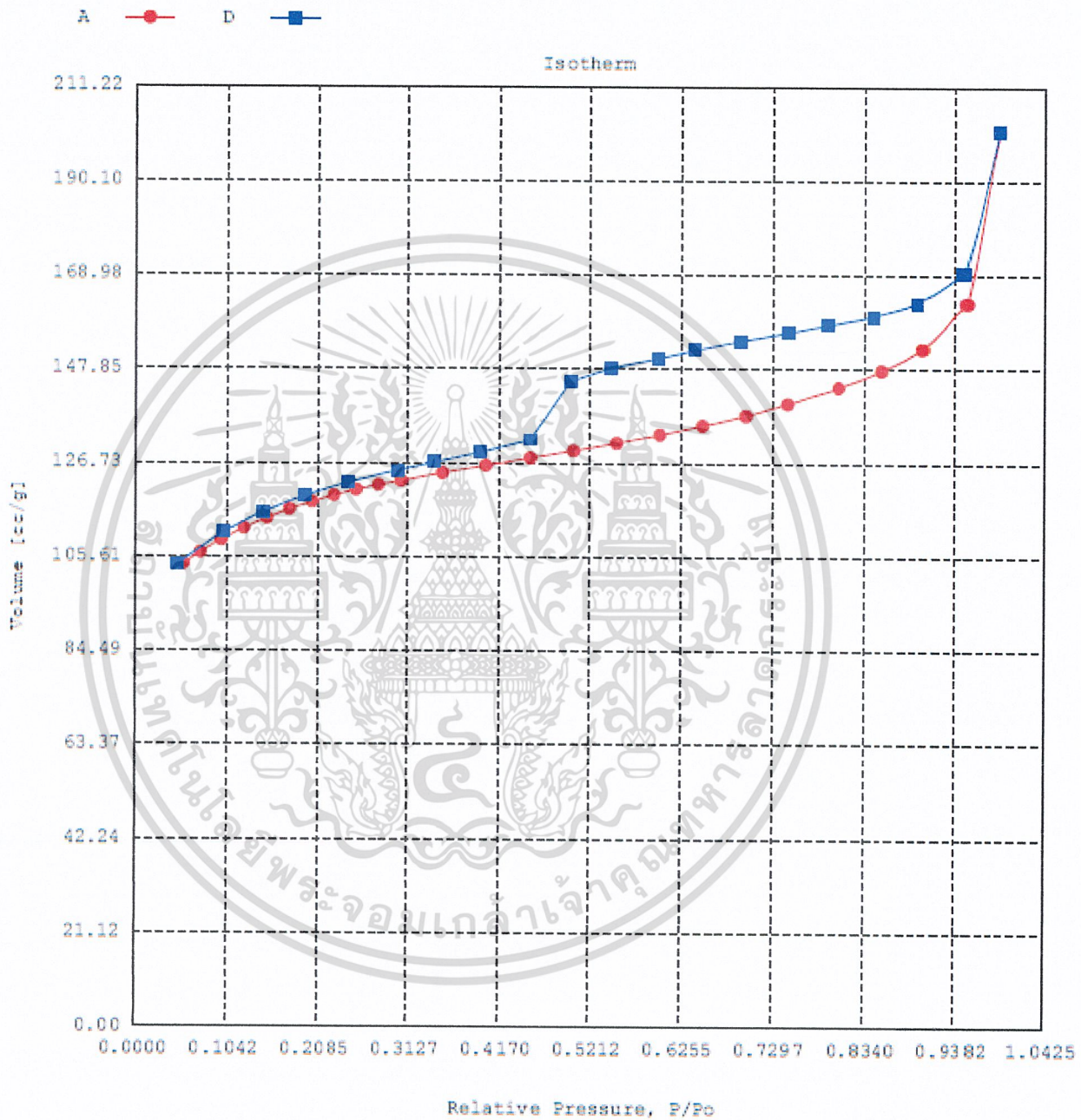
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Isotherm ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1% Ga/HZSM5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Isotherm ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2% Ga/HZSM5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้