

การศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของเมทาไซลีน



นายชาติ เวชวิชสนอง

นายบุญวิศ วุฒิธรรม

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหม.....

เลขทะเบียน 37628

วัน, เดือน, ปี 19 ก.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Isomerisation of *m*-Xylene



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science**

Department of Chemistry

Faculty of Science


King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene
โดย นายชาติ เวชวิชสนอง
นายบุญยวัศ วุฒิธรรม
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้รับ
โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาความหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต


ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

หัวหน้าภาควิชาเคมี


คณะกรรมการโครงการพิเศษ


รศ.ดร.โกศกัญญา กุศลาราม

ประธานกรรมการ


อ. สุชา สุทธิเรืองวงศ์

กรรมการ


ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ <i>m</i> -Xylene	
โดย	นายชาติรี	เวชวิชชสนอง
	นายบุญยวัศ	วุฒิธรรม
ภาควิชา	เคมี	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ตะวัน	สุชน้อย
ปีการศึกษา	2542	

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของความแรงของกรด โฟแทสเซียมไอออนและอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่มีต่อกระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-xylene ซีโอไลต์ Y ที่สังเคราะห์ได้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เนื่องจากมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ จึงเปลี่ยนมาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า (UOP-4120) แทนซีโอไลต์ Y จากการศึกษาพบว่า กระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-xylene ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 6 ถึง 10 อะตอม แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาคิสพรอปชันเนชันเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง เมื่อความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์และความจำเพาะเจาะจงของ *p*-xylene จะเพิ่มขึ้น การบรรจุโฟแทสเซียมไอออนลงในตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดการเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอน 10 อะตอมและอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้นจะให้ความไวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย

Special Project Title	Isomerisation of <i>m</i> -Xylene	
Name	Mr.Chatree	Wasvanitsanong
	Mr.Boonyawat	Wuttitum
Special Project Advisor	Asst. Prof. Tawan	Sooknoi
Department	Chemistry	
Academic	1999	

Abstract

This research is aimed to study the effects of the isomerisation of *m*-xylene, the acid strength, impregnation of potassium ion and reaction temperature. It was found that zeolite Y which was synthesized could not be used as a catalyst owing to its low thermal stability. However the commercial catalyst (UOP-4120) was used instead of zeolite Y. The isomerisation of *m*-xylene gave C₆ - C₁₀ products since disproportionation took place as a side reaction. When the acid strength of the catalyst was increased, the conversion of *m*-xylene and *p*-xylene selectivity was increased. Impregnation of potassium ion into the commercial catalyst decreased the C₁₀ products and the higher the reaction temperature, the more the activity.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่ายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการนี้ ผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้ขอขอบคุณผู้ให้ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบคุณ

ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษา รวมทั้งคอยกระตุ้นสม่ำเสมออย่างดียิ่งในการทำโครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี

รศ.ดร.โกศัลย์ กุศลราญ และ อ. สุธา สุทธิเรืองวงศ์ คณะกรรมการที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจทานรวมทั้งให้คำแนะนำโครงการนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจวิเคราะห์ซีโอไลต์ ด้วยเทคนิค XRD

ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความกรุณาในการตรวจสอบซีโอไลต์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM

บริษัท สตาร์ปีโตรเลียม รีไฟน์นิง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา (UOP-4120) ในการใช้ทำปฏิกิริยา

ศูนย์ซ่อมสร้างเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการซ่อมและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

พี่ ๆ ปริญญาโท (พี่เต พี่เก พี่จ้าว พี่นก พี่ยู พี่ไซ) ที่คอยให้คำแนะนำในทุก ๆ เรื่องรวมทั้งช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ทำให้มีวันนี้ได้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และพี่ ๆ ที่ให้กำลังใจและคอยถามไถ่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นายชาติรี เวชวินิชสนอง

นายบุญยวัศ วุฒิชรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
ซีโอไลต์	3
สมบัติบางประการของซีโอไลต์	3
ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	7
ซีโอไลต์ชนิด Y	8
กระบวนการไอโซเมอไรเซชันของไซลีน	9
การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา	10
ชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา	13
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	15
สารเคมี	15
อุปกรณ์และเครื่องมือ	16
ขั้นตอนการวิจัย	16
ระเบียบวิธีวิจัย	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	28
การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y	28
การศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ <i>m</i> -Xylene	30
กระบวนการไอโซเมอไรเซชัน <i>m</i> -Xylene ที่อุณหภูมิ 350 °C	31
ผลของความแรงของกรดที่มีต่อความจำเพาะเจาะจงของ <i>p</i> -Xylene และ <i>o</i> -xylene	33
ผลของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่	35
ผลของเวลาในการสัมผัสของ <i>m</i> -Xylene กับตัวเร่งปฏิกิริยา	38
ผลของการบรรจุโลหะโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการฝังตัว	40
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน	43
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	47
สรุปผลการวิจัย	47
ข้อเสนอแนะ	48
ภาคผนวก	50
เอกสารอ้างอิง	59
บรรณานุกรม	60

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารล่อผลึก	18
ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Y	19
ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ <i>m</i> -Xylene ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า	24
ตารางที่ 3.4 สภาวะเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์	26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	ปริมาณผลิตภัณฑ์และความต้องการทางการตลาดของไซลีน	1
รูปที่ 2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แท้จริงกับขนาดของรูพรุน	4
รูปที่ 2.2	รูปแบบความเฉพาเจาะจงในการคัดเลือกขนาดและรูปร่างของโมเลกุล	5
รูปที่ 2.3	การเกิดตำแหน่งกรดของซีโอไลต์	6
รูปที่ 2.4	การเกิดตำแหน่งเบสของซีโอไลต์	6
รูปที่ 2.5	การเกิดตำแหน่งโลหะของซีโอไลต์	7
รูปที่ 2.6	โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5	7
รูปที่ 2.7	โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ Y ที่มีโครงสร้างแบบ Faujasite	8
รูปที่ 2.8	กลไกการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน	9
รูปที่ 2.9	กลไกการเกิดปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน	10
รูปที่ 2.10	กลไกการเกิดสารพอลิโนวเคลียร์อะโรมาติก	11
รูปที่ 2.11	แบบจำลองอุปกรณ์ในชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา	13
รูปที่ 2.12	Bubble Flow Reservoir ที่ใช้ในชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา	14
รูปที่ 2.13	Bubble Flow Reservoir แบบต่างๆ	14
รูปที่ 3.1	แบบ Bubble Flow Reservoir	23
รูปที่ 3.2	การใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา	23
รูปที่ 3.3	ชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา	23
รูปที่ 3.4	ตัวอย่างโครมาโทแกรม	27
รูปที่ 4.1	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ NaY ที่สังเคราะห์ได้	28
รูปที่ 4.2	รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ NaY	29
รูปที่ 4.3	ภาพถ่ายพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaY ที่สังเคราะห์ได้	29
รูปที่ 4.4	เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C	30
รูปที่ 4.5	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ <i>m</i> -Xylene จากการทำปฏิกิริยา ไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.6	สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพรอปพอนันชันจากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C	32
รูปที่ 4.7	สัดส่วนของ <i>p</i> -Xylene ต่อ <i>o</i> -Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C	33
รูปที่ 7.8	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ <i>m</i> -Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง	34
รูปที่ 4.9	สัดส่วนของ <i>p</i> -Xylene ต่อ <i>o</i> -Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง	35
รูปที่ 4.10	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ <i>m</i> -Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ผ่านการทำปฏิกิริยา	36
รูปที่ 4.11	สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพรอปพอนันชันจากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ผ่านการทำปฏิกิริยา	37
รูปที่ 4.12	สัดส่วนของ <i>p</i> -Xylene ต่อ <i>o</i> -Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ผ่านการทำปฏิกิริยา	37
รูปที่ 4.13	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ <i>m</i> -Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยอัตราการไหลของก๊าซตัวพาเป็น 100 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที	38

สารบัญญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.14	สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพรอปพอนันเนชันจากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยอัตราการไหลของก๊าซตัวพาเป็น 100 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที	39
รูปที่ 4.15	สัดส่วนของ <i>p</i> -Xylene ต่อ <i>o</i> -Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยอัตราการไหลของก๊าซตัวพาเป็น 100 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที	39
รูปที่ 4.16	เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะ โพลแทสเซียม	40
รูปที่ 4.17	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ <i>m</i> -Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะ โพลแทสเซียมและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง	41
รูปที่ 4.18	สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพรอปพอนันเนชันจากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะ โพลแทสเซียมและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง	42
รูปที่ 4.19	สัดส่วนของ <i>p</i> -Xylene ต่อ <i>o</i> -Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะ โพลแทสเซียมและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง	43
รูปที่ 4.20	เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 325 °C	44
รูปที่ 4.21	ปริมาณโดยรวมของ <i>p</i> -Xylene และ <i>o</i> -Xylene การทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 325 และ 350 องศาเซลเซียส	44
รูปที่ 4.22	สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพรอปพอนันเนชันจากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 325 และ 350 องศาเซลเซียส	45
รูปที่ 4.23	สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพรอปพอนันเนชันจากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 และ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะ โพลแทสเซียม	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.24 ปริมาณโดยรวมของ <i>p</i> -Xylene และ <i>o</i> -Xylene การทำปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันที่อุณหภูมิ 350 และ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะโพแทสเซียม	46



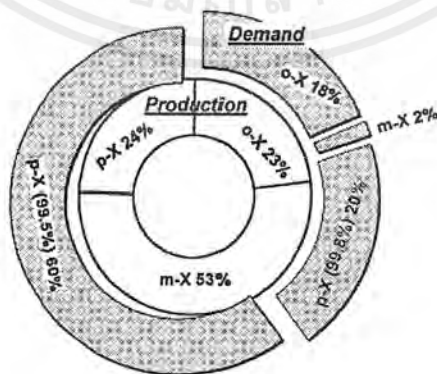
บทที่ 1

บทนำ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene (Isomerisation of *m*-Xylene)

ที่มาและความสำคัญ

ไซลีน (Xylene) หรือไดเมทิลเบนซีน (Dimethylbenzene) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก ซึ่งประกอบด้วย 3 ไอโซเมอร์ คือ *o*-Xylene (1,2-Dimethylbenzene) *m*-Xylene (1,3-Dimethylbenzene) และ *p*-Xylene (1,4-Dimethylbenzene) โดยไอโซเมอร์ทั้ง 3 ชนิด ถูกนำมาใช้ประโยชน์ต่างๆหลายด้าน ยกตัวอย่างเช่น ใช้เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีชนิดอื่น ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกประเภทพอลิเอสเตอร์ (Polyester) เป็นต้น ไซลีนเป็นปิโตรเคมีภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมีหลายกระบวนการด้วยกัน แต่ส่วนใหญ่ได้จากกระบวนการหลัก 2 กระบวนการคือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming) และกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนของก๊าซไซลีน (Gasoline Pyrolysis) ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นองค์ประกอบของไอโซเมอร์ทั้ง 3 ไอโซเมอร์ ได้แก่ *o*-Xylene ประมาณ 25% *m*-Xylene ประมาณ 50% และ *p*-Xylene ประมาณ 25% [1] แต่เนื่องจากปริมาณความต้องการใช้ของ *o*-Xylene และ *p*-Xylene มีมากกว่า *m*-Xylene มาก[2] ดังรูปที่ 1.1 จึงจำเป็นที่จะต้องมีการขยายกระบวนการอื่น เพื่อให้ได้ไซลีนไอโซเมอร์ทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ *p*-Xylene ที่มีความต้องการในปริมาณสูงที่สุด



รูปที่ 1.1 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์และความต้องการทางการตลาดของไซลีน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทางเคมีที่นำมาใช้ ได้แก่ กระบวนการไอโซเมอไรเซชัน (Isomerisation) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด เริ่มแรกได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Friedel Crafts และได้พัฒนามาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีความจำเพาะเจาะจงต่อ *p*-Xylene และ *o*-Xylene มากขึ้น ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท ซิลิกา - อะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (Zeolitic catalyst) ตามลำดับ [3]

งานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์หลายชนิดด้วยกัน พบว่าซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีความจำเพาะเจาะจงต่อ *p*-Xylene และ *o*-Xylene มากที่สุด [4] จึงเป็นแนวทางในการศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ในโครงการพิเศษนี้ โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากทางการค้า (UOP – 4120) มาใช้ในการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้านี้มีองค์ประกอบที่เป็นซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด (HZSM-5) และซิลิกา - อะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้ทราบถึงกระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากทางการค้า
2. เพื่อให้ทราบตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากทางการค้า

ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าในกระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene โดยทำเป็นแบบกระบวนการต่อเนื่อง (Continuous process) ที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ชนิด Fixed bed ศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลาที่สารสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Contact time) และการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าโดยการบรรจุโลหะ โพแทสเซียมด้วยวิธีการฝังตัว โดยเก็บสารผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้วนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) และวิเคราะห์หาปริมาณสารผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่เกิดขึ้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สามารถประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า มาใช้ในกระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ที่ให้ความจำเพาะเจาะจงสูงในการเกิดเป็น *p*-Xylene ไอโซเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นของแข็งอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้าง 3 มิติ หน่วยย่อยพื้นฐานคือ ศูนย์กลางทรงสี่หน้า (Tetrahedral center) ซึ่งอาจจะเป็นอะตอมซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม (เรียกว่าอะตอม T) โดยอะตอม T จะสร้างพันธะกับออกซิเจน 4 อะตอม ในทางกลับกันออกซิเจนแต่ละอะตอมก็จะสร้างพันธะกับอะตอม T 2 อะตอม เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง T-O-T

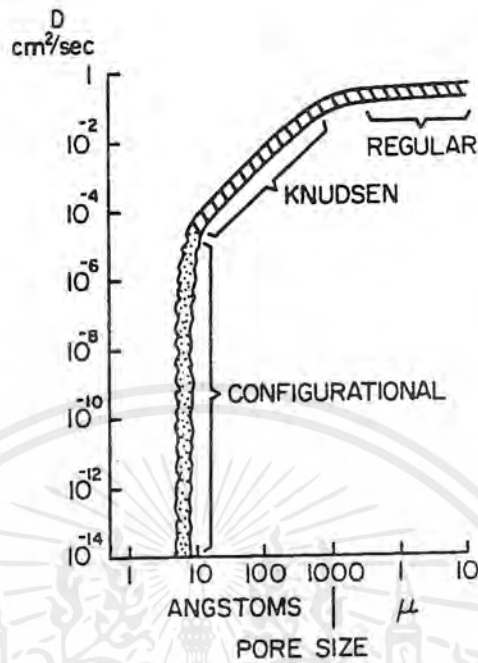
ซีโอไลต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ และซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์

2.2 สมบัติทางประการของซีโอไลต์

2.2.1 การแพร่ในรูพรุนของซีโอไลต์

เนื่องจากรูพรุนของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นโพรงที่มีกะจะมีโมเลกุลของน้ำอยู่ภายใน เมื่อทำการไล่น้ำออกจากโพรงของซีโอไลต์จะทำให้เกิดช่องว่างภายในโพรงของซีโอไลต์มากขึ้น ซึ่งโพรงนี้จะมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้ แต่ขนาดของโมเลกุลที่จะเข้าสู่โพรงจะถูกกำหนดโดยหน้าตาของโพรงซีโอไลต์นั้นๆ การดูดซับโมเลกุลสารในรูพรุนของซีโอไลต์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ หากโมเลกุลนั้นมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะผ่านหน้าตาได้ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลในรูพรุนของซีโอไลต์ที่แคบมักจะเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ลักษณะการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุลสารในรูพรุนของซีโอไลต์ สามารถอธิบายอย่างคร่าวๆได้ว่าเป็นการกระโดดของโมเลกุลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยผ่านอุปสรรคทางด้านพลังงาน ดังรูป พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แท้จริง (Effective diffusion coefficient) มีความสัมพันธ์กับขนาดของรูพรุน สำหรับรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล (Molecular diffusion) จะมีความสำคัญ แต่เมื่อรูพรุนมีขนาดเล็ก อันตรกิริยาระหว่างผนังของรูพรุน (Knudsen diffusion) จะมีความสำคัญมากกว่า และเมื่อรูพรุนมีขนาดเล็กจนโมเลกุลแทบจะไม่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนได้แล้วนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ที่แท้จริงจะขึ้นอยู่กับขนาดของหน้าตาของรูพรุน (Configurational diffusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แท้จริงกับขนาดของรูพรุน

2.2.2 การเลือกสารเข้าออกเพื่อทำปฏิกิริยา

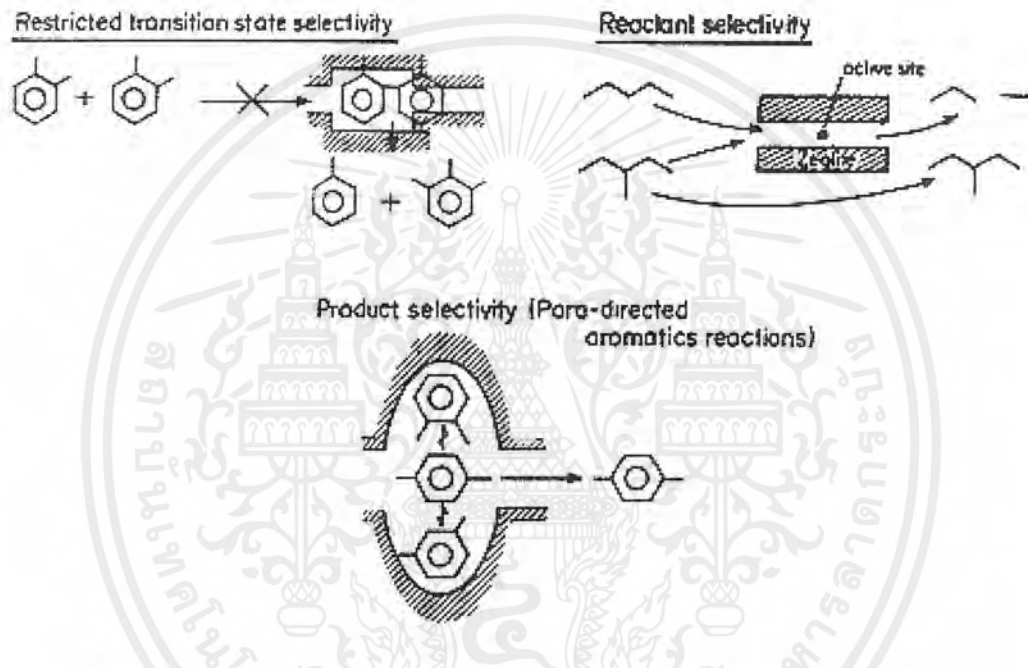
ซีโอไลต์เป็นสารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบสามมิติ (Three dimensional framework) ประกอบด้วยรูพรุนภายในผลึกและหน้าตาที่มีขนาดเท่าๆกันทั้งหมด ซึ่งซีโอไลต์แต่ละชนิดจะมีขนาดของรูพรุนต่างกันไป ซีโอไลต์จึงถูกนำมาใช้แยกสารที่มีขนาดโมเลกุลแตกต่างกันและการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความจำเพาะเจาะจง เรียกคุณสมบัติข้อนี้ว่า ความจำเพาะเจาะจงในการคัดเลือกขนาดและรูปร่างของโมเลกุล (Molecular shape selectivity) แบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ [5] ได้แก่

- การเลือกสรรต่อรูปร่างของสารตั้งต้น (Reactant shape selectivity) สารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่กว่าหน้าตาของรูพรุนซีโอไลต์จะไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าไปเกิดปฏิกิริยาภายในได้ มีเพียงสารที่มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็กกว่าเท่านั้นที่จะเกิดปฏิกิริยาภายในรูพรุนได้
- การเลือกสรรรูปร่างของสารผลิตภัณฑ์ (Product shape selectivity) หลังจากที่สารตั้งต้นผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในรูพรุนของซีโอไลต์แล้ว ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นถ้ามีขนาดใหญ่เกินกว่าหน้าตาของรูพรุนแล้วจะทำให้ไม่สามารถแพร่ออกจากรูพรุนได้ ซึ่งอาจจะทำปฏิกิริยาต่อไปหรือไปขัดขวางทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารตั้งต้นผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้นหรือไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เลย

- การเลือกสรรรูปร่างโดยสถานะทรานสิชัน(Transition-state shape selectivity) สารมัธยันต์ (Intermediate) ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโพรงของซีโอไลต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสารมัธยันต์นั้นจะไม่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.2 รูปแบบความจำเพาะเจาะจงในการคัดเลือกขนาดและรูปร่างของโมเลกุล [5]

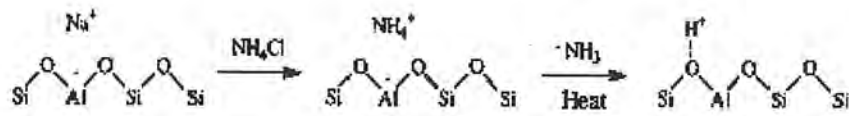
2.2.3 การปรับปรุงตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

มีการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากซีโอไลต์มีความเสถียรสูง พื้นที่ผิวมาก และมีโพรงขนาดต่างๆ ที่แน่นอนซึ่งขึ้นกับชนิดของซีโอไลต์ จึงทำให้มีคุณสมบัติในการเลือกสารเข้าทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังสามารถปรับปรุงตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาได้ คุณสมบัติที่เหมาะสมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาหนึ่งได้โดยสามารถแบ่งตามลักษณะของตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ

- ตำแหน่งกรด (Acid site) การทำให้เกิดตำแหน่งกรดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนกับแอมโมเนียมไอออน (Ammonium ion exchange)

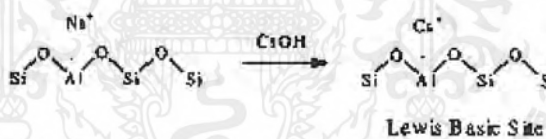
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และให้ความร้อนเพื่อสลาย NH_3 จะได้ตำแหน่งที่อยู่ในรูปกรดของบรอนสเตด (Bronsted acid)



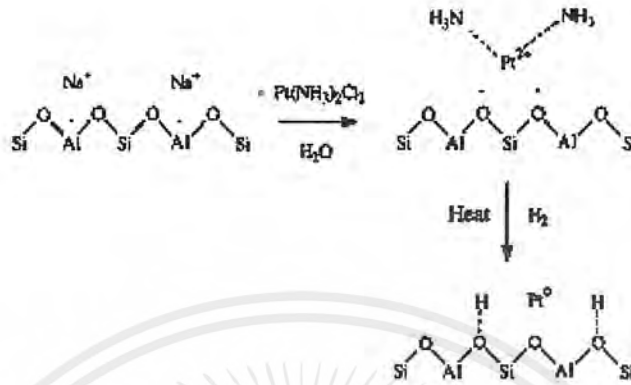
รูปที่ 2.3 การเกิดตำแหน่งกรดของซีโอไลต์

- ตำแหน่งเบส (Basic site) เกิดขึ้นในซีโอไลต์ที่มีปริมาณของอะลูมิเนียมอยู่มาก หรือมีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) ต่ำๆ การที่มีปริมาณของอะลูมิเนียมอยู่มากจะทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์มีความเป็นลบมาก เมื่อทำการสังเคราะห์ หรือทำการแลกเปลี่ยน ไอออนบวกที่มีความเป็น Solf acid จะได้ ซีโอไลต์ที่มีตำแหน่งที่ว่างไว้ต่อปฏิกิริยาเป็นลิวอิสเบส (Lewis base)



รูปที่ 2.4 การเกิดตำแหน่งเบสของซีโอไลต์

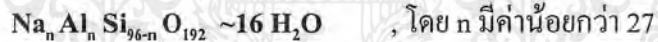
- ตำแหน่งโลหะ (Metal site) เป็นการบรรจุโลหะไม่ว่าจะเป็นโลหะหมู่ที่ 1,2 A และ โลหะทรานซิชัน ซึ่งสามารถบรรจุโลหะเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ได้ 2 วิธี คือ วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และวิธีการฝังตัว (impregnation) วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นวิธีที่นิยมใช้กับซีโอไลต์ที่มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ในโครงสร้างมาก เพราะโลหะที่บรรจุเข้าไปจะเข้าไปเคลือบประจุได้มาก วิธีการฝังตัวสามารถทำได้หลายวิธี สามารถควบคุมปริมาณ โลหะได้ โดยที่โลหะที่ถูกบรรจุเข้าไปจะมีอันตรกิริยา (Interaction) น้อยกว่าแบบแรกและการกระจายตัวของโลหะไม่ค้ำนัก [6]



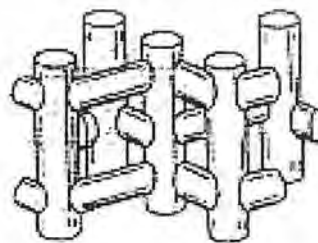
รูปที่ 2.5 การเกิดตำแหน่งโลหะของซีโอไลต์

2.3 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (MFI)

ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Medium-pore) มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ (Three dimensional framework) โดยซีโอไลต์ ZSM-5 มีหน่วยเซลล์เป็นแบบทัวไปดังนี้ [7]



โครงสร้างของ ZSM-5 มีลักษณะเป็นท่อที่ตัดผ่านกัน (Intersecting channel) ดังรูปที่ 2.6 มีขนาดหน้าตัดของท่อเป็น 5.4×5.6 อังสตรอม และ 5.1×5.7 อังสตรอม (มีออกซิเจนอยู่ในวง 10 อะตอม) ในลักษณะท่อซิกแซกและท่อตรง ตามลำดับ และบริเวณที่ท่อทั้ง 2 ตัดผ่านกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9 อังสตรอม [6]

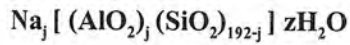


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ซีโอไลต์ชนิด Y (FAU)

ซีโอไลต์ชนิด Y เป็นซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Large pore) มีหน้าตัดขนาดประมาณ 0.74 นาโนเมตร (มีออกซิเจน 12 อะตอม ในวง) และมีโครงสร้างของรูพรุนเป็น 3 มิติ (Three dimensional pore structure) องค์ประกอบของซีโอไลต์ Y มีหน่วยเซลล์แบบทั่วไปเป็นดังนี้



z มีค่าประมาณ 260

j มีค่าประมาณ 48-76 (โดยทั่วไปมีค่า 57)



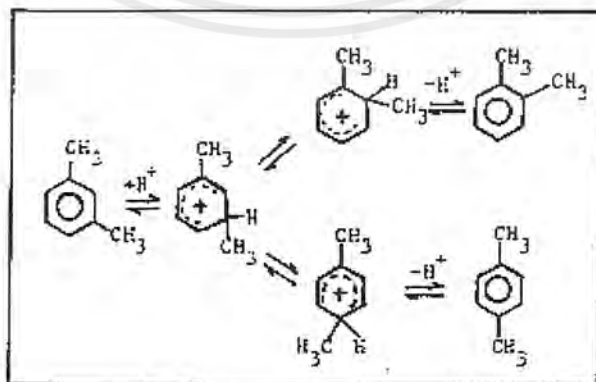
รูปที่ 2.7 โครงร่างผลึกของซีโอไลต์ Y ที่มีโครงสร้างแบบ Faujasite

โครงสร้างของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นโพรงแบบ ซุปเปอร์เคจ (Supercage) ซึ่งเป็นลักษณะทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงประมาณ 1.3 นาโนเมตร มีหน่วยโซดาไลต์ (Sodalite unit) 10 หน่วยล้อมรอบอยู่ ดังรูปที่ 2.7

2.5 กระบวนการไอโซเมอไรเซชันของไซลีน (Xylene Isomerisation)

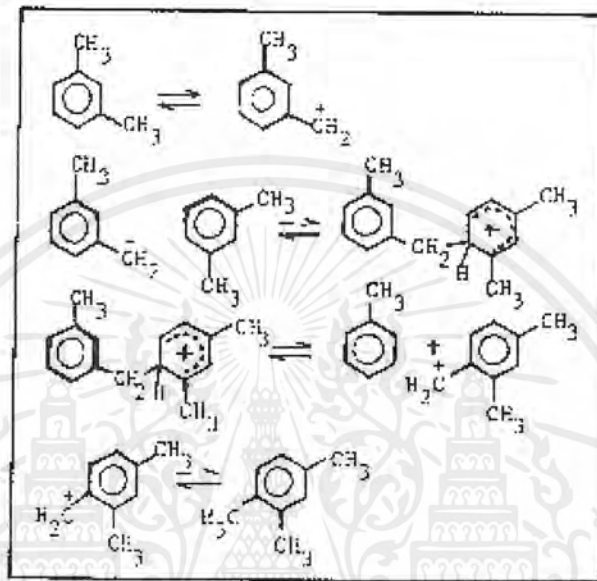
กระบวนการไอโซเมอไรเซชันคือกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในลักษณะที่เป็นไอโซเมอร์กัน โดยมักใช้กับสารประกอบที่มีคาร์บอนอะตอม 4-10 อะตอม โดยมีจุดประสงค์ต่างกันหลายประการ เช่น เพื่อปรับปรุงค่าการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงก๊าซไซลีน การเปลี่ยนโครงสร้างสารผลิตภัณฑ์เพื่อให้มีโครงสร้างที่ต้องการ เป็นต้น เนื่องจากองค์ประกอบของสารไซลีนผสม (Mixed xylene) ซึ่งได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming) และการแตกสลายด้วยความร้อนของก๊าซไซลีน (Gasoline Pyrolysis) ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นองค์ประกอบของไอโซเมอร์ทั้ง 3 ไอโซเมอร์ ได้แก่ o-Xylene ประมาณ 25% m-Xylene ประมาณ 50% และ p-Xylene ประมาณ 25% [1] ดังนั้นจึงได้นำกระบวนการไอโซเมอไรเซชันมาใช้เปลี่ยน m-Xylene เพื่อให้ได้ p-Xylene และ o-Xylene ในปริมาณที่สูงขึ้น เรียกกระบวนการนี้ว่า “กระบวนการไอโซเมอไรเซชันของไซลีน”

เริ่มแรกได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Friedel Crafts มาใช้ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีความแรงของกรด (Acid strength) สูง สามารถทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150°C แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีการเลือกสรร (Selectivity) และแยกผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก จึงมีการเปลี่ยนมาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ซิลิกา / อะลูมินา ($\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งมีความแรงของกรดในระดับกลางทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ ได้มีการปรับเปลี่ยนมาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (Zeolite catalyst) ในกระบวนการนี้[3] เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์ มีความจำเพาะเจาะจงกับรูปร่าง (Shape selectivity) สามารถปรับปรุงให้มีฤทธิ์เป็นกรดได้ และมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิและความดันสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่นิยมใช้ ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และ HY



รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน [3]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้นอกจากไซลีนไอโซเมอร์ทั้ง 3 ชนิดแล้ว โทลูอิน (Toluene) และ ไตรเมทิลเบนซีน (Trimethylbenzene) ยังเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by product) รวมทั้งการเกิด ซึ่งปฏิกิริยาเกิดผ่านกลไก ดิสพรอพอชันเนชัน (Disproportionation) ดังรูปที่ 2.9 [3]



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน [3]

2.6 การเสื่อมสภาพ (Deactivation) ของตัวเร่งปฏิกิริยา

การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการทางฟิสิกส์หรือเคมี ซึ่งทำให้ความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Activity) ลดน้อยลง โดยสามารถแบ่งลักษณะการเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3 ประเด็นใหญ่ๆ [6] ได้แก่

- ◆ การเสื่อมสภาพเนื่องสิ่งแปลกปลอมถูกดูดซับทางเคมี (chemisorption) ที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เป็นตัวกีดขวางสารตั้งต้นที่จะเข้าไปเกิดปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งที่ว่างไว (Active site) เรียกกลไกนี้ว่า “ Catalyst poisoning ”
- ◆ การเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดถ่านโค้ก(Coke)โดยเกิดจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ใช้หรือที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาถูกทำให้เปลี่ยนไปเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งโดยมากถ่านโค้กมักเป็นสารจำพวกพอลินิวเคลียร์อะโรมาติก (Polynuclear aromatics) โดยมีกลไกการเกิดดังรูปที่ 2.10 ถ่านโค้กที่เกิดขึ้นนี้จะทำ

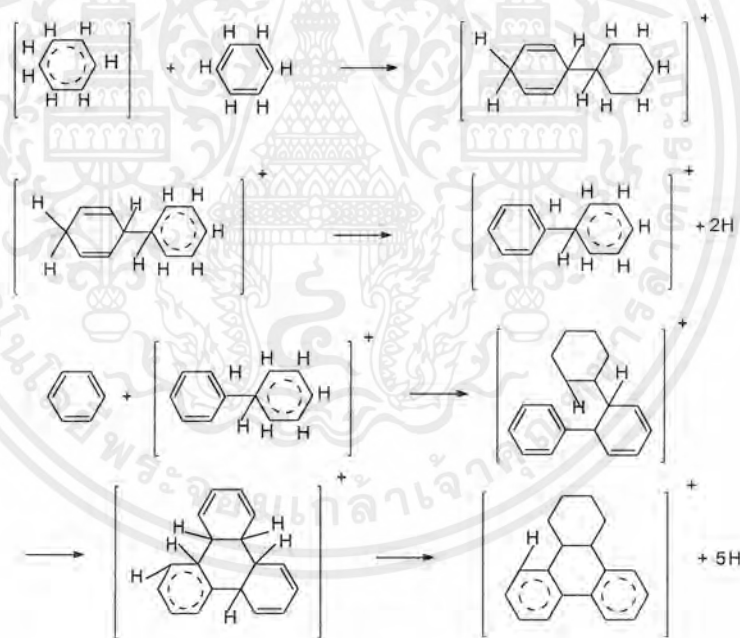
หน้าที่คล้ายกันกับในหัวข้อข้างต้น แต่ต่างที่การกีดขวางเป็นทางกายภาพ (Physical blocking)

- ◆ การเสื่อมสภาพเนื่องจากการสูญเสียตำแหน่งวงไวเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เช่น เกิดการยุบตัว (Collapse) ของโครงสร้างที่มีรูพรุนในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป ทำให้ตำแหน่งวงไวและพื้นที่ผิวสูญเสียไป เป็นต้น

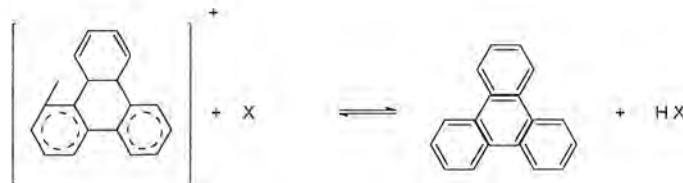
Step 1 : Initiation



Step 2 : Propagation



Step 3 : Termination



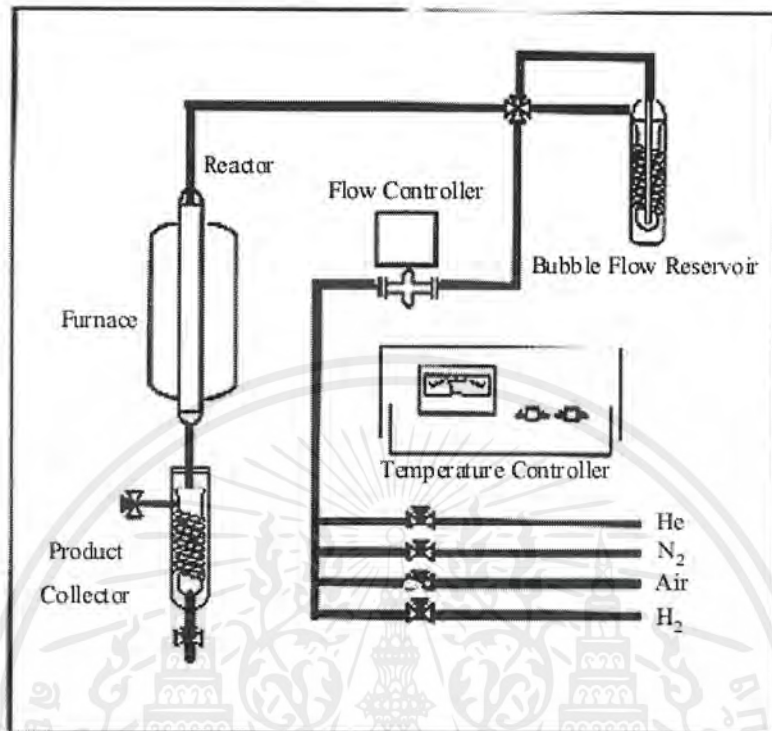
รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดสารพอลินิวเคลียร์อะโรมาติก [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Testing Rig) [8]

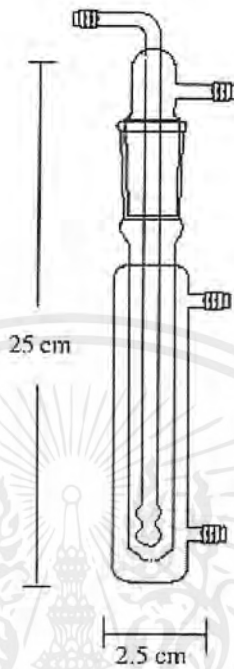
ชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาถูกออกแบบและจัดสร้างให้สามารถใช้ศึกษาสมบัติของซีโอไลต์และสารที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ที่สภาวะการใช้งาน ชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ระบบควบคุมการไหลของก๊าซ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และ ท่อปฏิกรณ์เคมี ซึ่งสามารถบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาได้ไม่เกิน 5 กรัมต่อการทดสอบ อัตราการไหลของก๊าซสูงสุดที่ความดันบรรยากาศ (รวมก๊าซสารตั้งต้นและก๊าซตัวพา) สามารถทดสอบได้ไม่เกิน 150 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถใช้ทดสอบปฏิกิริยาที่มีอุณหภูมิระหว่าง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส

ชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาติดตั้งบนไม้้อคขนาด 120 x 200 เซนติเมตร ถูกดัดแปลงให้เป็นแผงทดสอบ โดยประกอบเข้ากับโครงเหล็ก จากนั้นได้นำท่อเหล็กไร้สนิมขนาด 1/4 และ 1/8 นิ้ว ข้อต่อและวาล์ว แล้วนำมาประกอบติดตั้ง ตามที่ได้ออกแบบให้ใช้ลำเลียงก๊าซได้ 4 ชนิดได้แก่ ฮีเลียม อากาศ /ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน โดยระบบควบคุมการไหลของก๊าซได้ใช้ระบบ mass flow controller ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการไหลได้ระหว่าง 0-150 มิลลิลิตรต่อนาที ในส่วนของระบบให้ความร้อน ใช้เตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 30 นิ้วและส่วนควบคุมใช้ชุดควบคุมความร้อน (Temperature controller) เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและให้ความร้อน ได้ไม่เกิน 1200 องศาเซลเซียส และสามารถตั้งอัตราการให้ความร้อนได้ 1 ชั้น ส่วนให้ความร้อนนี้จะทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ท่อปฏิกรณ์เคมี (Tube reactor) ซึ่งทำจากแก้วทนไฟขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ยาว 45 นิ้ว สารตั้งต้นจะผ่านเข้าไปในท่อปฏิกรณ์เคมีในสถานะก๊าซ โดยส่วนลำเลียงสารตั้งต้นทำจากแก้วทนไฟ 2 ชั้น เช่นเดียวกับส่วนกักเก็บสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา นอกจากนั้นทั้งส่วนลำเลียงสารตั้งต้นและส่วนกักเก็บสารผลิตภัณฑ์ยังสามารถควบคุมและปรับอุณหภูมิได้ด้วยน้ำหล่อเย็น ตำแหน่งและรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ในส่วนต่างๆของชุดทดสอบปฏิกิริยานี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 [8]



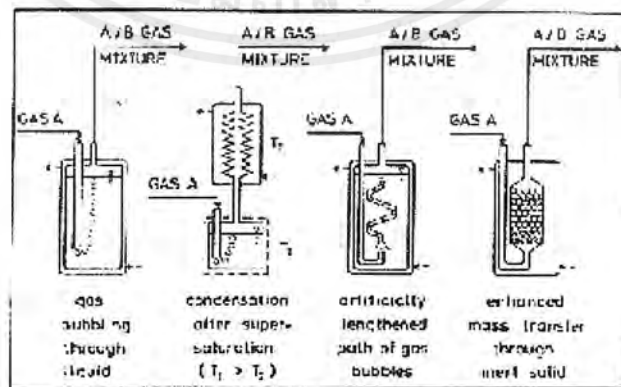
รูปที่ 2.11 แบบจำลองอุปกรณ์ในชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา [8]

ในส่วนของ Bubble Flow Reservoir สามารถลำเลียงสารตั้งต้นที่เป็นของเหลว โดยอาศัยการพาไอที่อิ่มตัว ของของเหลวโดยก๊าซตัวพาที่มีอัตราการไหลคงที่ อัตราการไหลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซตัวพา (Carrier gas) ซึ่งอัตราการไหลของก๊าซตัวพานี้เองที่เป็นตัวกำหนดเวลาในการสัมผัส (Contact time) ระหว่างสารตั้งต้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุอยู่ภายในท่อปฏิกรณ์เคมี ถ้าอัตราการไหลของก๊าซตัวพามีอัตราการไหลของก๊าซสูงจะทำให้ เวลาในการสัมผัสของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าต่ำใน ทางกลับกันถ้าอัตราการไหลของก๊าซตัวพามีอัตราการไหลของก๊าซต่ำ เวลาในการสัมผัสของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่าสูง



รูปที่ 2.12 Bubble Flow Reservoir ที่ใช้ในชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา [8]

ส่วนความเข้มข้นของสารตั้งต้นในก๊าซตัวพา จะขึ้นกับอุณหภูมิของ Bubble Flow Reservoir ซึ่งสามารถควบคุมได้จากการปรับอุณหภูมิด้วยน้ำหล่อเย็นการผสมกันอย่างดี จะช่วยให้อัตราการไหลของสารตั้งต้นสม่ำเสมอ ซึ่ง Bubble Flow Reservoir แต่ละแบบ จะมีประสิทธิภาพต่างกัน รูปแบบทั่วไปของ Bubble Flow Reservoir ที่ดีแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 [8]



รูปที่ 2.13 Bubble Flow Reservoir แบบต่างๆ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

1. โซเดียมอะลูมิเนต (Na_2O 37.57%, Al_2O_3 59.54%) (Riedl-de Haen)
2. สารแขวนลอยซิลิกา (Ludox) (SiO_2 40%w/w) (Aldrich Chemical Company, Inc.)
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 31.5%w/w)
4. น้ำปราศจากไอออน
5. อะลูมิเนียมไนเตรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) (Fluka Chemie)
6. ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า (UOP-4120) (บริษัท สตาร์ปิโตรเลียม รีไฟน์นิ่ง จำกัด)
7. โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) (Fluka Chemie)
8. สารละลายเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TPAOH 20%w/w) (Fluka Chemie)
9. เมตาไซลีน (*m*-Xylene) (Fluka Chemie)
10. พาราไซลีน (*p*-Xylene) (Fluka Chemie)
11. ออโรไซลีน (*o*-Xylene) (Fluka Chemie)
12. เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) (Fluka Chemie)
13. โทลูอิน (Toluene) (Lab-scan Asia Ltd.)
14. เบนซีน (Benzene) (Lab-scan Asia Ltd.)
15. คิวมีน (Cumene) (Fluka Chemie)
16. เฮปเทน (*n*-Heptane) (Lab-scan Asia Ltd.)
17. ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen)
18. ก๊าซไนโตรเจน
19. อากาศแห้ง (Dry clean air)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. บริเวณที่เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
2. บริเวณที่พลาสติกในห้องปฏิบัติการ
3. ภาชนะความดันสูง (Autoclave)
4. ขวดใส่สาร (Vial)
5. คอลัมน์แก้วไพเร็กซ์ (Pyrex)
6. ขวดน้ำกลั่น
7. กระจบอกใส่ใน โตรเจนเหลว
8. เครื่องชั่ง
9. ชุดให้ความเย็น (Cooling set)
10. ตู้อบ
11. เตาเผา
12. เตาเผาแบบท่อ
13. ชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา
14. เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ (Gas chromatograph , GC)
15. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว
16. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
17. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดกวาด (SEM)

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

ตอนที่ 1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

- การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y
- การเตรียมซีโอไลต์ชนิด Y ให้มีสมบัติเป็นกรด
- การทดสอบสมบัติต่างๆของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น
- การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าด้วยการบรรจุโลหะ โพลแทสเซียม โดยวิธีการฝังตัว (Impregnation) (K-UOP-4120) *

- การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าด้วยการบรรจุเตตระโพรฟิลแอม โมเนียมไฮดรอกไซด์ (TPA-UOP-4120) *
- * การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อศึกษาผลของความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตอนที่ 2 การศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene

- การศึกษากระบวนการ ไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า
- การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ ไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี

3.4 ระเบียบวิธีวิจัย

ตอนที่ 1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

◆ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y

แบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

- การเตรียมสารล่อผลึก (Seed) ที่มีสูตรเจด $11.9 \text{ SiO}_2 : 13.8 \text{ Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 : 521.5 \text{ H}_2\text{O}$
- การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y ที่สังเคราะห์ที่มีสูตรเจด $4.3 \text{ SiO}_2 : 2.6 \text{ Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 : 66.3 \text{ H}_2\text{O}$

1. การเตรียมสารล่อผลึก (Seed) ที่มีสูตรเจด $11.9 \text{ SiO}_2 : 13.8 \text{ Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 : 521.5 \text{ H}_2\text{O}$ สามารถเตรียมได้โดยใช้สารเคมีตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารล่อผลึก

สารเคมีที่ใช้	ปริมาณ (กรัม)
โซเดียมอะลูมิเนต	0.70
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	13.36
สารแขวนลอยซิลิกา	7.35
น้ำปราศจากไอออน	24.40

1. นำโซเดียมอะลูมิเนตใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร
 2. เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กวนของผสมอย่างแรงด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กจนโซเดียมอะลูมิเนตละลายหมด
 3. เติมน้ำแขวนลอยซิลิกาอย่างช้าๆ พร้อมทั้งปั่นกวนตลอดเวลา
 4. เติมน้ำปราศจากไอออน
 5. กวนผสมอย่างแรงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วเก็บในภาชนะปิดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ½ วัน
2. สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y ที่สังเคราะห์มีสูตรเจล $4.3 \text{ SiO}_2 : 2.6 \text{ Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 : 66.3 \text{ H}_2\text{O}$ สามารถเตรียมได้โดยใช้สารเคมีตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Y

สารเคมีที่ใช้	ปริมาณ (กรัม)
สารละลายโซเดียมซิลิเกต สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารแขวนลอยซิลิกา	45.25 68.73
สารละลายโซเดียมอะลูมิเนต โซเดียมอะลูมิเนต สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	8.03 4.96
สารล่อผลึก	44.18
สารละลายอะลูมิเนียมไนเตรต อะลูมิเนียมไนเตรต น้ำปราศจากไอออน	27.02 13.87

1. ผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับสารล่อผลึก แล้วค่อยๆ เติมน้ำละลายโซเดียมอะลูมิเนต จากนั้นทำการกวนของผสมอย่างแรงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วเติมน้ำละลายอะลูมิเนียมไนเตรตทำการกวนอย่างแรงต่ออีกเป็นเวลา 2 ½ ชั่วโมง

2. นำของผสมที่ได้ใส่ใน Teflon tube
3. นำใส่ในภาชนะความดันสูง (Autoclave) แล้วนำเข้าตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
4. นำตะกอนที่ได้มาล้างจนได้ pH ประมาณ 8 แล้วนำไปอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาทำการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศของอากาศแห้ง อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที

◆ การเตรียมซีโอไลต์ชนิด Y ให้มีสมบัติเป็นกรด

1. การเตรียมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ทำได้โดย
 1. ชั่งแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) หนัก 53.49 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
 2. เติมน้ำปราศจากไอออนให้เพียงพอที่จะละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) แล้วใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร
 3. ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
2. การแลกเปลี่ยนไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) ในซีโอไลต์ชนิด Y ทำได้โดย
 1. ชั่งซีโอไลต์ชนิด Y ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร
 2. เติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร
 3. นำขวดก้นกลมต่อเข้ากับชุดรีฟลักซ์ ให้ความร้อนจนสารละลายมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทำการกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กตลอดเวลา 6 ชั่วโมง
 4. กรองสารละลายด้วยชุดกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 ทำการล้างด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
 5. ทำการทดลองตามข้อ 3-4 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
 6. นำซีโอไลต์ที่กรองได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3. การปรับสภาพซีโอไลต์ชนิด Y ให้มีสมบัติเป็นกรด ทำได้โดย
 1. นำซีโอไลต์ Y ที่แลกเปลี่ยนไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) แล้วเข้าเตาเผาแบบท่อ
 2. ทำการเผาไล่แอมโมเนีย (NH_3) ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในบรรยากาศของอากาศแห้ง อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที
 3. ลดอุณหภูมิเตาเผาแบบท่อลงอย่างช้าๆจนถึงอุณหภูมิห้อง ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที

◆ การทดสอบสมบัติต่างๆของซีโอไลต์ชนิด Y ที่สังเคราะห์ขึ้น

1. การตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) แหล่งกำเนิดแสง $\text{CuK}\alpha$ ความต่างศักย์ 45 กิโลโวลต์ มุม 2θ ในช่วง 5-60 โดยวัดมุมช่วงละ 0.04 องศาเวลาในการบันทึก 1.50 วินาที
2. การศึกษารูปร่างของซีโอไลต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)
 1. นำซีโอไลต์มาติดบนแท่นรองรับ (Support) ให้มีการกระจายตัวที่ดี
 2. นำไปเคลือบทองเป็นเวลา 3 นาที โดยให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ (mA) ภายใต้สถานะสุญญากาศ
 3. ชิ้นงานที่เตรียมได้ใส่ในที่วางชิ้นงานในเครื่อง SEM
 4. ปรับกำลังขยายในช่วง 500-15000 เท่า
 5. ทำการปรับค่าความสว่าง-ความต่าง (Brightness-contrast) จุดโฟกัส และกำลังขยายที่ทำให้เห็นภาพได้ชัดเจน แล้วถ่ายภาพที่ต้องการ

◆ การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าด้วยการบรรจุโลหะโพแทสเซียมโดยวิธีการฝังตัว

(Impregnation) (K-UOP-4120)

1. นำตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า (UOP-4120) น้ำหนัก 1.1898 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. ละลายโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) น้ำหนัก 0.0308 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาณน้อยที่สุดที่สามารถละลายโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) ได้หมด

3. ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า (UOP-4120) ลงในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) แล้วกวนของผสมให้เข้ากัน
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปียกไปทำการอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่อบแห้งแล้วมาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศของอากาศแห้ง อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที
6. ทิ้งให้เย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนอัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที

◆ การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าด้วยการบรรจุเตตระโพรฟิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TPA-UOP-4120)

1. นำตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า (UOP-4120) น้ำหนัก 1.1898 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายเตตระโพรฟิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TPAOH) เข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก 1 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์พลาสติก
3. เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
4. ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า (UOP-4120) ลงในสารละลายเตตระโพรฟิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TPAOH) ที่เตรียมได้ แล้วกวนผสมให้เข้ากัน
5. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปียกไปทำการอบไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ตอนที่ 2 การศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene

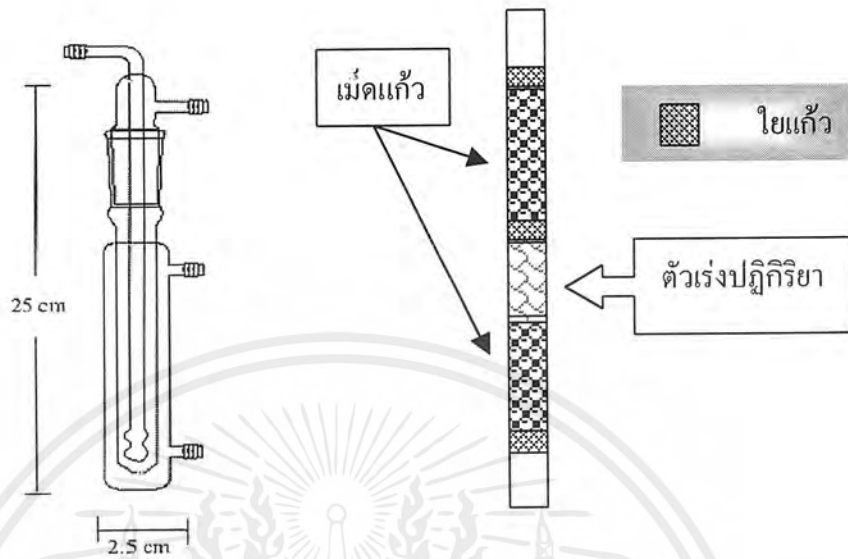
1. การศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 1.1898 กรัม ให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนใส่ในคอลัมน์แก้วไพเร็กซ์โดยจัดให้อยู่บริเวณกึ่งกลางของคอลัมน์ (รูปที่ 3.2) แล้วนำคอลัมน์ไปยึดติดกับท่อก๊าซที่ติดตั้งอยู่เหนือเตาเผา (ตำแหน่ง A ในรูปที่ 3.3)

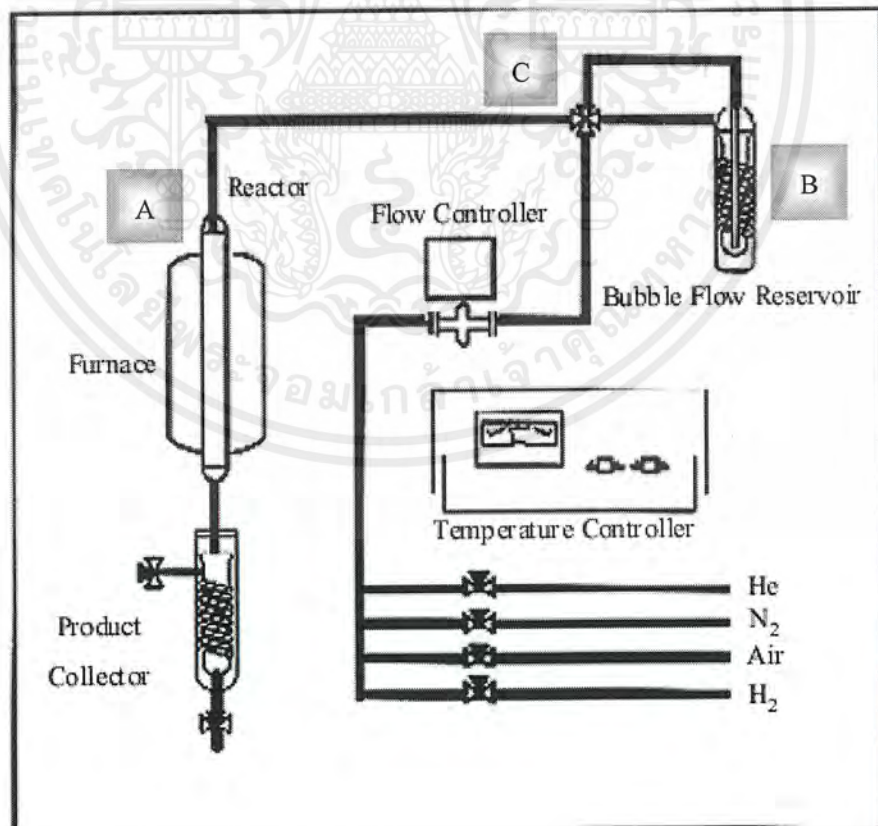
- ผ่านก๊าซไนโตรเจนและปรับอัตราการไหลของก๊าซด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลชนิด Mass flow meter รวจนกระทั่งอัตราการไหลของก๊าซคงที่
- เติม *m*-Xylene 50 มิลลิลิตร ลงใน Bubble flow reservoir (รูปที่ 3.1) ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส (ตำแหน่ง B ในรูปที่ 3.3)
- ตั้งอุณหภูมิของเตาเผาแบบท่อตามตารางที่ 3.3 โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ปรับสวิตช์วาล์ว 4 ทิศทางให้การไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านที่ Bubble flow reservoir ก่อน แล้วผ่านจึงผ่านไปยังคอลัมน์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาบรรจุอยู่ (ตำแหน่ง C ในรูปที่ 3.3)
- เก็บผลิตภัณฑ์ทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- นำผลิตภัณฑ์ที่เก็บได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี





รูปที่ 3.1 แสดงแบบ Bubble Flow Reservoir

รูปที่ 3.2 แสดงการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงสภาวะที่ใช้ศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า

การทดลอง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	Carrier gas	อัตราการไหลของ Carrier gas (ml/min.)
1	UOP-4120	325	N ₂	68
2	UOP-4120	350	N ₂	68
3	Regen	350	N ₂	68
4	UOP-4120	350	N ₂	100
5	K-UOP-4120	350	N ₂	68
6	K-UOP-4120	400	N ₂	68
7	TPA-UOP-4120	350	N ₂	68

หมายเหตุ

Regen

ตัวเร่งปฏิกิริยาจากการทดลองที่ 2 ที่เผาไล่ถ่านโค้ก (Coke) แล้ว

K-UOP-4120

ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าที่บรรจุโลหะโพแทสเซียม ด้วยวิธีการฝังตัว (Impregnation)

TPA-UOP-4120

ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าด้วยการบรรจุเตตระโพรพิล-แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

โดยจะแบ่งการศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene เป็น 6 ประเด็นดังนี้

1. การศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า (UOP-4120) โดยอาศัยผลจากการทดลองที่ 2
2. การศึกษาผลของความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อความเฉพาะเจาะจงของ *p*-Xylene และ *o*-Xylene โดยอาศัยผลจากการทดลองที่ 2 และ 7

3. การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า (UOP-4120) ที่มีต่อกระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene
โดยอาศัยผลจากการทดลองที่ 2 และ 3
ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองที่ 3 เตรียมได้โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วจากการทดลองที่ 2 มาเผาไล่ถ่านโค้ก (Coke) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศของอากาศแห้ง อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที
 4. การศึกษาผลของ Contact time ที่มีต่อกระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า (UOP-4120)
โดยอาศัยผลจากการทดลองที่ 2 และ 4
 5. การศึกษาผลของโลหะโพแทสเซียม ที่มีต่อกระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า (UOP-4120)
โดยอาศัยผลจากการทดลองที่ 2 และ 5
 6. การศึกษาผลของอุณหภูมิกระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene
โดยอาศัยผลจากการทดลองที่ 1, 2, 5 และ 6
- ◆ การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก กระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี

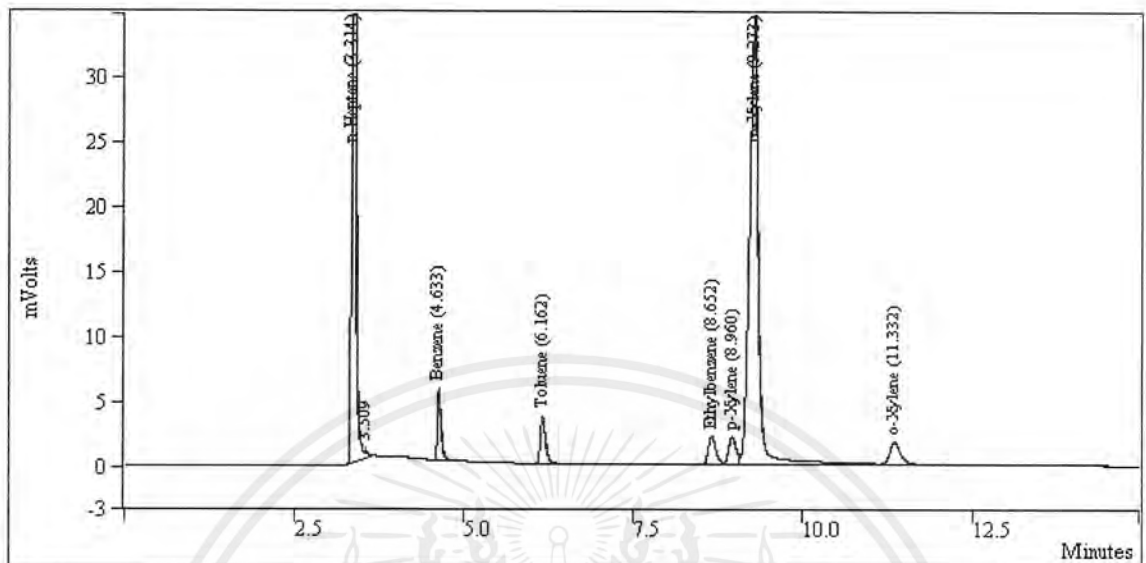
การวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟีทำได้โดย

1. ตั้งสถานะเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 3.4
2. นำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการวิเคราะห์เจือจาง 4 เท่าโดยใช้น้ำหนักของสารตัวอย่างด้วย *n*-Heptane
3. ฉีดตัวอย่างปริมาณ 0.1 ไมโครลิตรเพื่อทำการวิเคราะห์

ลักษณะของโครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสถานะข้างต้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงสถานะเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph , GC) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

Column	Econo-Cap FC Wax Length 30 m ID 0.32 mm
Injection Temp	250 °C
	Split ratio 100
Carrier gas	N ₂
Linear velocity	19.7 cm/sec
Detector	FID 250 °C
Column Temp	60 °C Hold 13.0 min 150 °C Hold 5.0 min
Heating rate	10.0 °C/min
Analysis time	27 min



รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรม

Retention time (min)

<i>n</i> -Heptane	3.31
Benzene	4.63
Toluene	6.16
Ethylbenzene	8.65
<i>p</i> -Xylene	8.96
<i>m</i> -Xylene	9.27
<i>o</i> -Xylene	11.33

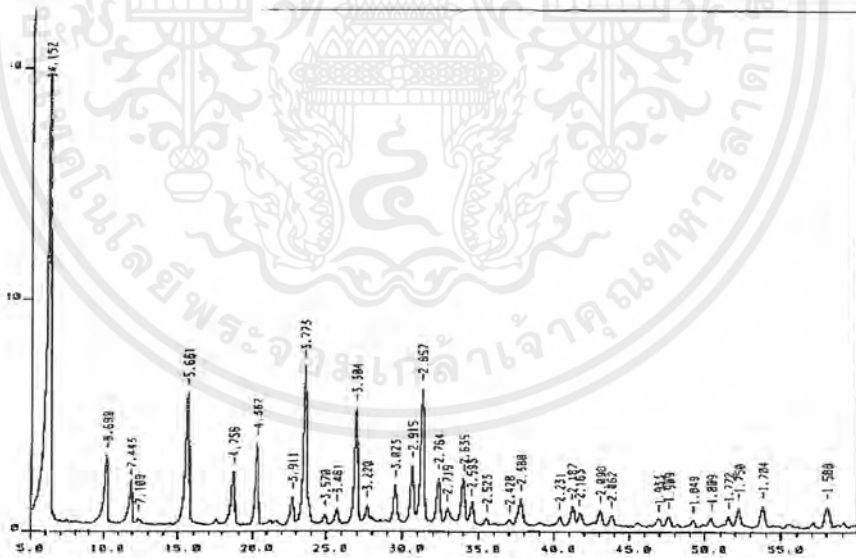
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

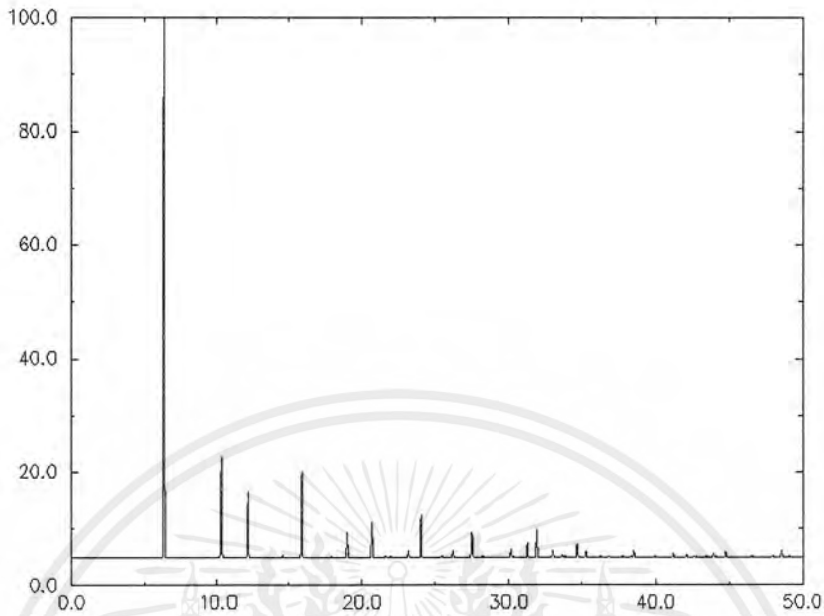
4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y

การตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด Y ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาด (SEM)

จากการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้มาตรวจสอบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray powder diffraction) เพื่อยืนยันการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาว่าเป็นซีโอไลต์ชนิด Y โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตรวจสอบนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ Y พบว่ามีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เดียวกัน จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้เป็นซีโอไลต์ชนิด Y ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

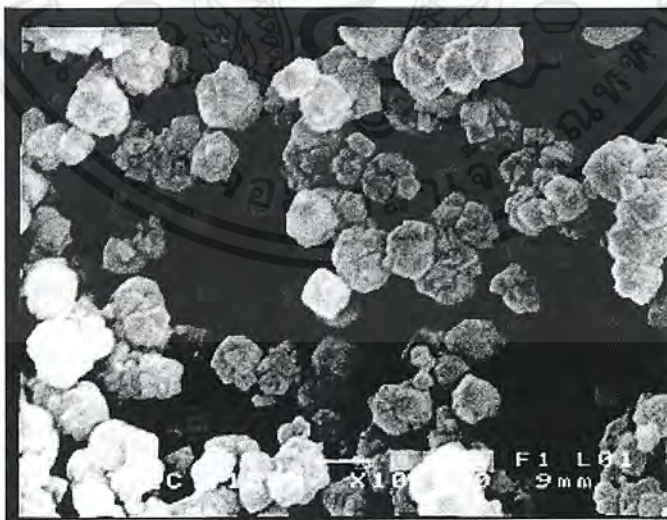


รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ NaY ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ NaY

ผลการวิเคราะห์รูปร่างผลึกของซีโอไลต์ Y ที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope) จากภาพถ่ายพื้นผิวของผลึก พบว่าผลึกของซีโอไลต์ชนิด Y มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผลึกเฉลี่ยประมาณ 0.5 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.3



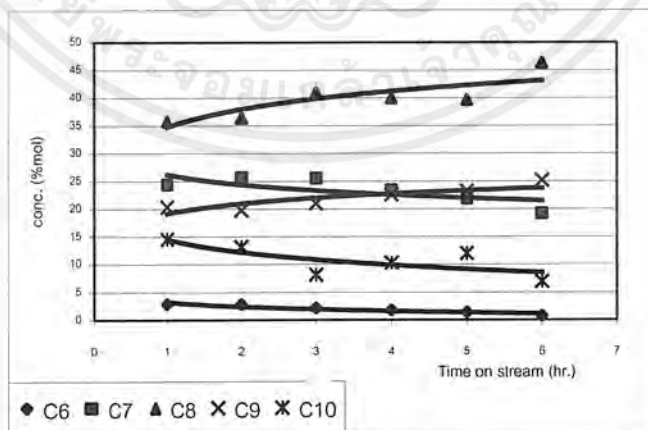
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายพื้นผิวของซีโอไลต์ NaY ที่สังเคราะห์ได้

เมื่อนำซีโอไลต์ NaY ที่สังเคราะห์ได้มาปรับปรุงโดยการแลกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4\text{-Y}$) หลังจากนั้นทำการเผาเพื่อไล่แอมโมเนียม (NH_3) จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ในรูปกรด (H-Y) แล้วนำมาตรวจสอบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ พบว่าถึงแม้จะลดอุณหภูมิในการเผาไล่แอมโมเนียมลงมาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตรวจสอบไม่ปรากฏพีก (Peak) ที่แสดงความเป็นผลึกของซีโอไลต์ Y เลย เนื่องจากซีโอไลต์ Y ที่สังเคราะห์ได้นี้ มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si / Al) 2.6 ซึ่งแสดงถึงปริมาณอะลูมิเนียมที่อยู่ในโครงสร้างมีปริมาณสูง ทำให้ความเสถียรภาพทางความร้อนของซีโอไลต์ลดต่ำลง จึงไม่สามารถนำซีโอไลต์ Y ที่สังเคราะห์ได้มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาทำที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

4.2 การศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชัน (Isomerisation) ของ *m*-Xylene

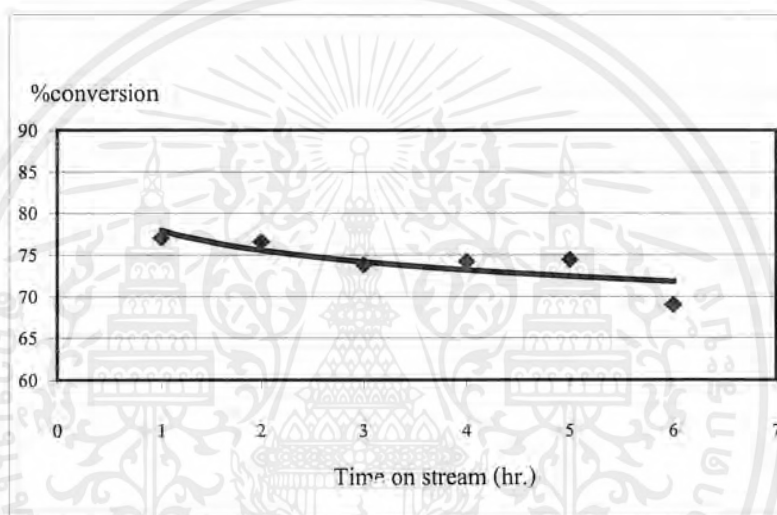
4.2.1 กระบวนการไอโซเมอไรเซชัน *m*-Xylene โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

การศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชัน *m*-Xylene โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าที่มีองค์ประกอบของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิกา-อะลูมินา ($\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$) ทำการศึกษาเป็นแบบกระบวนการต่อเนื่อง (Continuous process) โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เก็บสารผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) ได้ผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์โมลสารผลิตภัณฑ์ซึ่งจำแนกตามจำนวนคาร์บอนตั้งแต่คาร์บอน 6 ตัว ถึงคาร์บอนมากกว่า 10 อะตอม เทียบกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 4.4 เปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนไปของ *m*-Xylene ไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไป เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (% Conversion) มีค่าลดลงดังรูปที่ 4.5 ทั้งนี้เนื่องมาจาก *m*-Xylene และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น สามารถเปลี่ยนไปเป็นสารจำพวกพอลิ-นิวเคลียร์อะโรมาติก (Polynuclear aromatics) โดยมีกลไกการเกิดดังรูปที่ 2.10 สารที่เกิดขึ้นนี้เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าหน้าตาของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ติดค้างอยู่ภายใน *m*-Xylene จึงแพร่ผ่านเข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดี ดังนั้นความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา (Activity) จึงลดลง เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปของ *m*-Xylene แสดงในรูปที่ 4.5

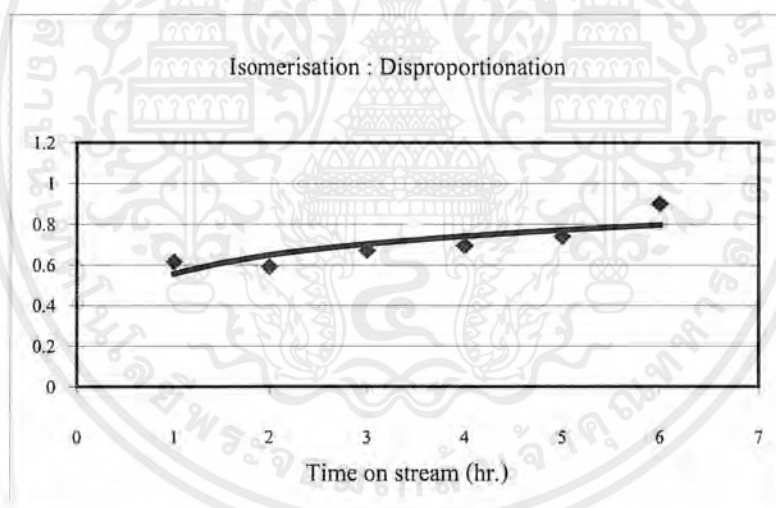


รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350°C

การทดลองนี้นอกจากเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันแล้ว พบว่ามีปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน (Disproportionation) เกิดขึ้นร่วมด้วย ได้ผลิตภัณฑ์เป็น โทลูอิน (C_7) และไตรเมทิลเบนซีน (C_9) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และมีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.9

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน จากตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าที่ใช้พบว่าเกิดปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันมากกว่าปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน โดยพิจารณาจากปริมาณของ *o*-Xylene และ *p*-Xylene (C_8) เทียบกับปริมาณของโทลูอิน (C_7) อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไป สัดส่วนระหว่างปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน (Isomerisation : Disproportionation, I/D) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเกิดได้ดีขึ้นเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อม-

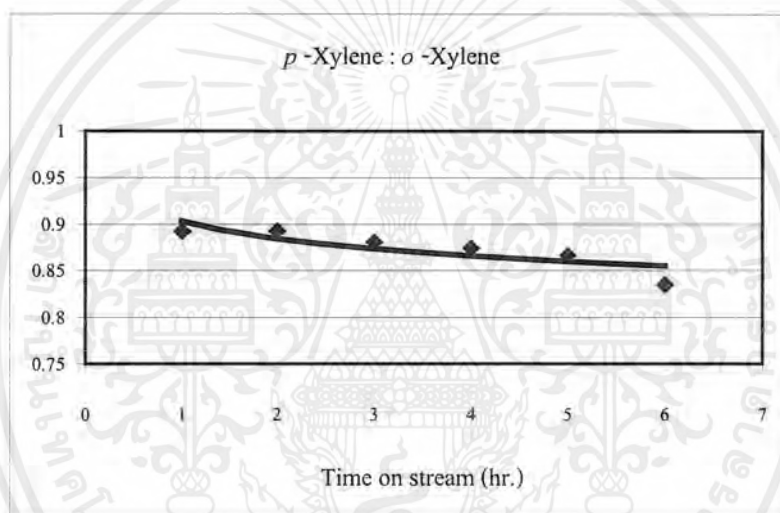
สภาพ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นผลให้ความแรงของกรด (Acid strength) ลดลง พิจารณาจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 [3]แล้ว พบว่าในปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน *m*-Xylene รับโปรตอน (Proton ,H⁺) ไว้ และเกิดเป็นคาร์โบแคตไอออน (Carbocation) ที่มีโครงสร้างเรโซแนนซ์ (resonance) ซึ่งช่วยในการเพิ่มเสถียรภาพของคาร์โบแคตไอออนที่เกิดขึ้น ในขณะที่ปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันเกิดคาร์โบแคตไอออนที่ตำแหน่งของหมู่เมทิลแล้วจึงเกิดปฏิกิริยาต่อไป จะเห็นว่าคาร์โบแคตไอออนที่เกิดขึ้นในวาระเบนซินมีเสถียรภาพสูงกว่าและต้องการความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำกว่าในการกลไกการเกิดดิสพรอพอชันเนชัน ทำให้ ทิศทางของปฏิกิริยาเป็นแบบไอโซเมอไรเซชันเกิดมากขึ้นเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพและสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันว่า เมื่อตำแหน่งที่แสดงความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ ก็มีผลทำให้ปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบปฏิกิริยาสองโมเลกุล (bimolecular reaction) เกิดได้ในปริมาณที่ลดลง [3]



รูปที่ 4.6 สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน (Isomerisation : Disproportionation , I/D) จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C

ในส่วนของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน การเลือกสรรของผลิตภัณฑ์เมื่อพิจารณาจากปริมาณ *p*-Xylene เทียบกับปริมาณ *o*-Xylene พบว่าเมื่อเวลาในการดำเนินปฏิกิริยาผ่านไปสัดส่วนระหว่างปริมาณ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene (p/o) มีแนวโน้มที่ลดลง ดังรูปที่ 4.7

ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่เกิดขึ้นมีความจำเพาะเจาะจงในการเกิดเป็น *p*-Xylene ลดลง พิจารณาจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันในรูปที่ 2.8 เมื่อ *m*-Xylene รับโปรตรอนเข้ามาเกิดเป็นคาร์โบแคตไอออน ที่มีโครงสร้างเรโซแนนซ์ (Resonance) และเกิดไอโซเมอไรซ์โดยมีการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลหรือไฮโดรด์ เพื่อให้เกิดเป็น *p*-Xylene และ *o*-Xylene [1] ซึ่งพบว่าโครงสร้างเรโซแนนซ์ของการเกิด *o*-Xylene มีความเสถียรมากกว่าโครงสร้างเรโซแนนซ์ของการเกิด *p*-Xylene ที่ความแรงของกรดต่ำกว่า จึงเกิด *o*-Xylene ได้มากกว่า *p*-Xylene เป็นเหตุให้เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพสัดส่วนของ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene จึงมีแนวโน้มที่ลดลง

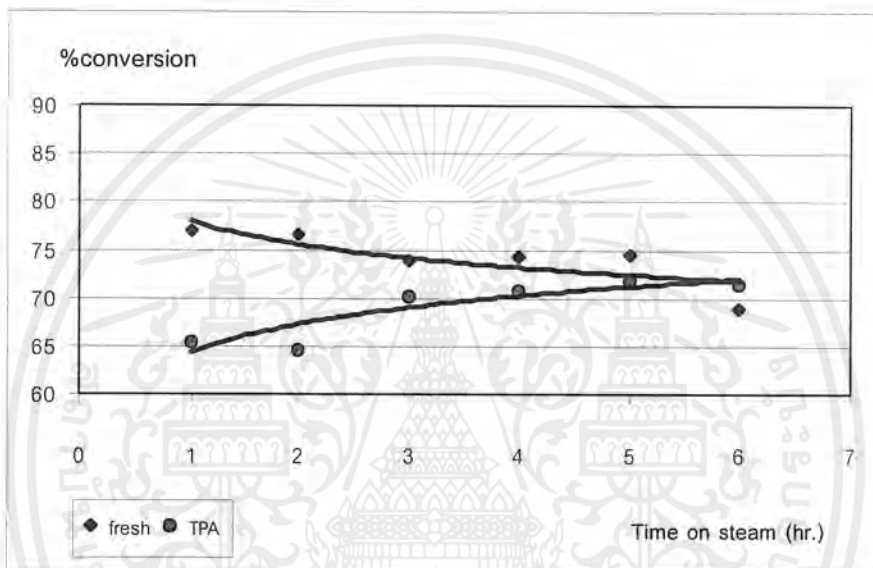


รูปที่ 4.7 สัดส่วนของ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C

4.2.2 ผลของความแรงของกรดที่มีต่อความเฉพาะเจาะจงของ *p*-Xylene และ *o*-Xylene

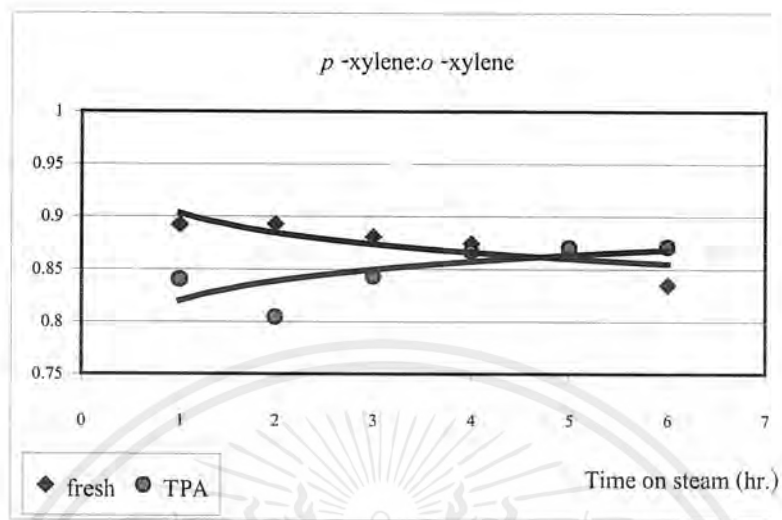
จากการศึกษาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับการบรรจุเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TPAOH) ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา นำมาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส แล้วตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปของ *m*-Xylene เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการบรรจุเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไป ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีการบรรจุเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 4.8 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่บรรจุเข้าไปใน

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าไปบล็อก(Block)ที่รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาในส่วนที่เป็นซิลิกา-อะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีตำแหน่งว่างไว (Active site) และความแรงของกรดลดลง ช่วงเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาจึงมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปของ *m*-Xylene ที่ต่ำ เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไปเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เกิดการสลายตัวหลุดออกจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้นเนื่องจากเปรียบเสมือนมีตำแหน่งที่ว่างไวมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปของ *m*-Xylene เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350°C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TPAOH) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากปริมาณ *p*-Xylene และ *o*-Xylene พบว่าสัดส่วนของ ปริมาณ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene มีแนวโน้มเช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปของ *m*-Xylene คือ เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นสัดส่วนนี้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.9 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไปเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์สลายตัวความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเพิ่มสูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันมีความจำเพาะเจาะจงในการเกิดเป็น *p*-Xylene ดังนั้นปริมาณ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene จึงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายของผลการทดลองหัวข้อที่ 4.2.1 ที่ว่าความจำเพาะเจาะจงของ *p*-Xylene จะแปรตามความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา

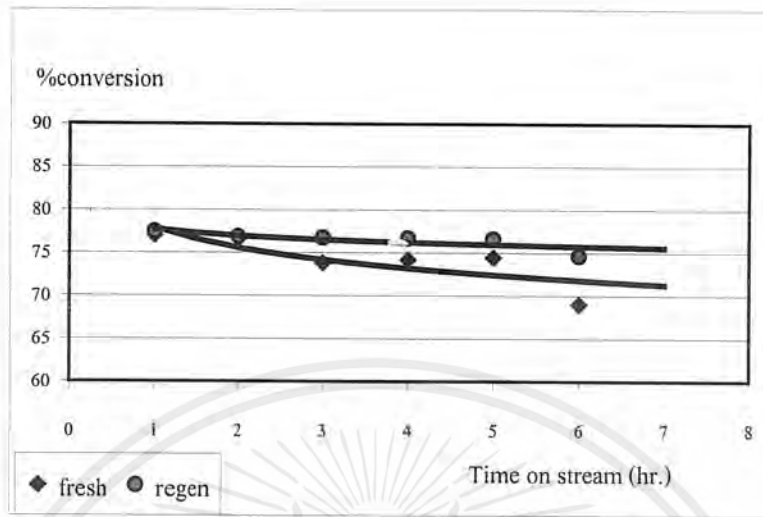


รูปที่ 4.9 สัดส่วนของ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันที่อุณหภูมิ 350°C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุเตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TPAOH) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง

4.2.3 ผลของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่

จากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทำปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสแล้ว นำตัวเร่งปฏิกิริยามาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสในบรรยากาศอากาศแห้ง (Dry clean air) เพื่อได้ถ่านโค้กที่ติดค้างอยู่ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยาซ้ำอีกครั้งที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (GC)

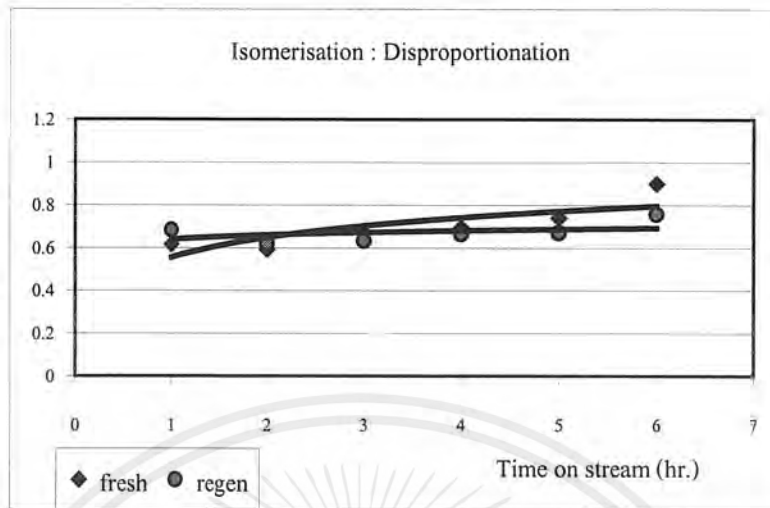
พบว่าเมื่อเวลาในการดำเนินปฏิกิริยาผ่านไปเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปของ *m*-Xylene เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่มีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มที่ลดลงเช่นเดียวกับแนวโน้มจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาครั้งแรก แต่การลดลงนั้นเป็นการลดลงในปริมาณที่น้อยกว่า ดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ไม่ทำให้ความสามารถ (Activity) ในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้านี้ลดลง นอกจากนี้การการนำกลับมาใช้ใหม่ยังทำให้เสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาดีขึ้นอีกด้วย



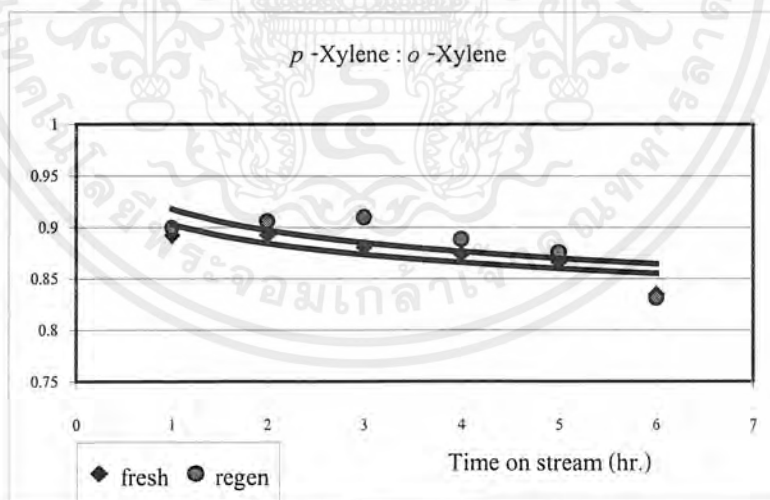
รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่และตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ยังไม่ผ่านการทำปฏิกิริยา

ในกรณีนี้สามารถอธิบายได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่มีเสถียรภาพมากขึ้นเป็นผลมาจากการกระทำทางความร้อน (Heat treatment) กับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่ถูกนำมาผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสจากการทำปฏิกิริยาครั้งแรก และก่อนจะนำมาทำปฏิกิริยาได้มีการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของอากาศแห้ง (Dry clean air) ทำให้ตำแหน่งที่ว่างไว้มีเสถียรภาพมากขึ้น

สัดส่วนระหว่างปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพรอปอชันเนชัน (Isomerisation : Disproportionation , I/D) และ อัตราส่วนระหว่าง *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene (*p/o*) พบว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาครั้งแรก สัดส่วนทั้ง 2 นี้มีค่าที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการผลทดลองที่ 4.2.1 ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นว่าเส้นแนวโน้มของสัดส่วนระหว่างปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพรอปอชันเนชัน สูงขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่วนการเลือกสรร (Selectivity) ของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่าง *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene เมื่อเปรียบเทียบกับแนวโน้มการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาครั้งแรกก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันและไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 แสดงสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาดีสพรอพอชันเนชัน (Isomerisation : Disproportionation , I/D) จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 ° C โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ผ่านการทำปฏิกิริยา

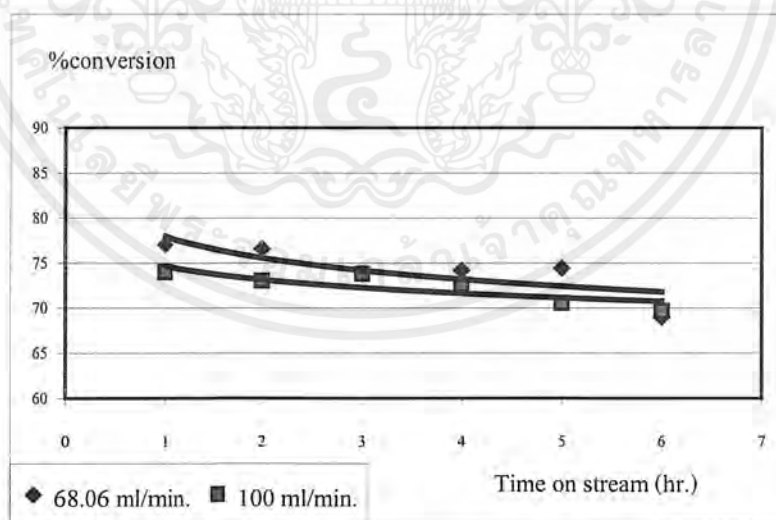


รูปที่ 4.12 สัดส่วนของ p-Xylene ต่อ o-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 ° C โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ผ่านการทำปฏิกิริยา

4.2.3 ผลของเวลาในการสัมผัส (Contact time) ของ *m*-Xylene กับตัวเร่งปฏิกิริยา

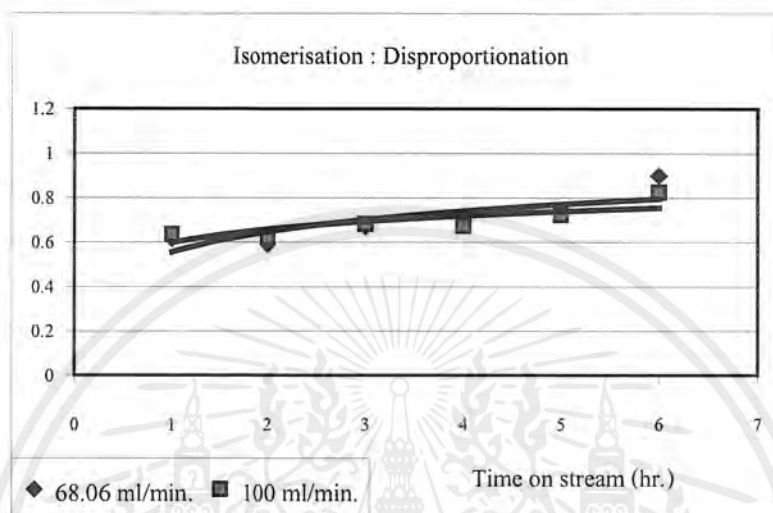
จากการทดลองการเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซตัวพา ในที่นี้ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) จากอัตราการไหล 68 มิลลิลิตรต่อนาที (mL/min) ปรับเปลี่ยนไปที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อ นาที (mL/min) ซึ่งทำให้เวลาในการสัมผัส (Contact time) เพิ่มขึ้น โดยทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เก็บสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแล้วนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค ก๊าซโครมาโทกราฟี (GC)

ผลจากการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นพบว่า เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene ยังคงมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเวลาการดำเนินไปของปฏิกิริยามากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพเช่นเดียวกับทุกกรณีที่ศึกษา และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene กับการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 68 มิลลิลิตรต่อนาที (mL/min) ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene ที่อัตราการไหลของก๊าซตัวพาเป็น 100.0 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าต่ำลง ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้นทำให้สารตั้งต้นซึ่งในที่นี้ คือ *m*-Xylene จะถูกนำพาผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาได้เร็ว ทำให้เวลาการสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาจึงลดลง ส่งผลให้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลงและการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene ลดลงด้วย

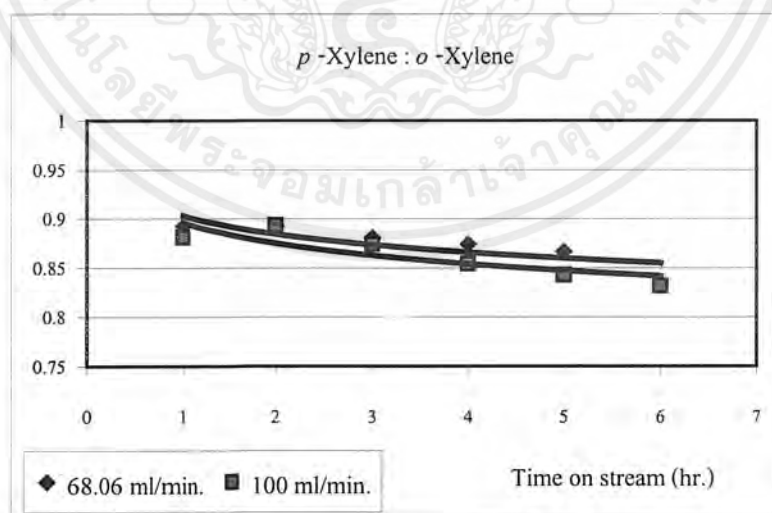


รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยอัตราการไหลของก๊าซตัวพาเป็น 100 และ 68(mL/min)

เมื่อพิจารณาสัดส่วนระหว่างปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน และการเลือกสรรของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองนี้ นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองหัวข้อ 4.2.1 พบว่ามีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกัน รูปดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน (Isomerisation : Disproportionation, I/D) จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่ อุณหภูมิ 350 °C โดยอัตราการไหลของก๊าซตัวพาเป็น 100 และ 68 mL/min

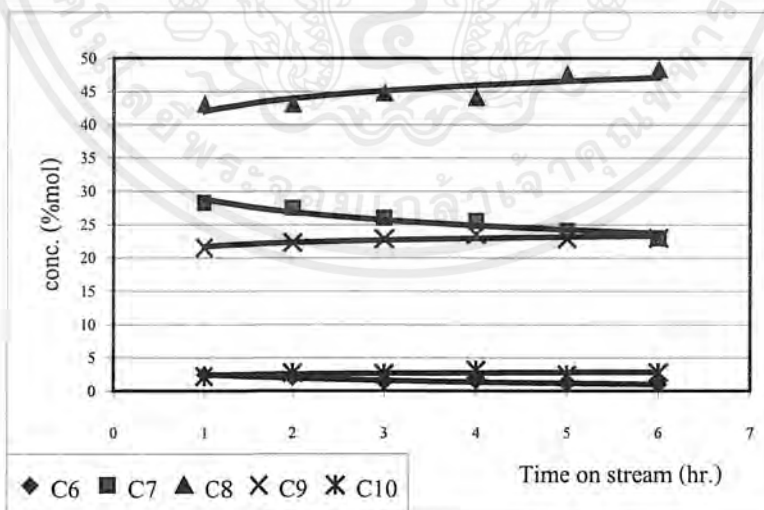


รูปที่ 4.15 แสดงสัดส่วนของ p-Xylene ต่อ o-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่ อุณหภูมิ 350 °C โดยอัตราการไหลของก๊าซตัวพาเป็น 100 และ 68 mL/min

โดยปกติเมื่อสารมีเวลาในการสัมผัส (Contact time) กับตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ปฏิกิริยาควรเกิดผ่านการไอโซเมอไรเซชันซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเชิงเดี่ยว (Monomolecular reaction) มากกว่าการเกิดปฏิกิริยาดิสพรอพอซิเนชันซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบสองโมเลกุล (Bimolecular reaction) แต่จกผลการทดลองข้างต้นเวลาในการสัมผัสระหว่าง *m*-Xylene และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนซึ่งพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion) ของ *m*-Xylene มีค่าใกล้เคียงกันและยังมีค่าในระดับที่สูงอยู่ จึงเห็นการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจนในการทดลองนี้ การใช้เวลาในการสัมผัสของสารตั้งต้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ลดลงกว่านี้ จะช่วยให้เห็นผลของสัดส่วน *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene (p/o) ที่ชัดเจนขึ้น

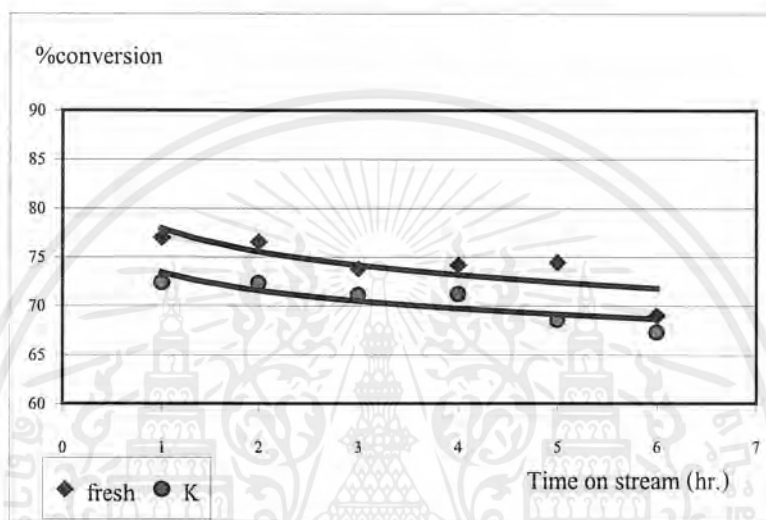
4.2.5 ผลของการบรรจุโลหะโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการฝังตัว (Impregnation)

จากทำการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการบรรจุโลหะโพแทสเซียม แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยานี้มาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น พบว่าได้ผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 4.16 เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ตัวขึ้นไปเกิดขึ้นในปริมาณที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าโลหะโพแทสเซียมที่บรรจุในตัวเร่งปฏิกิริยานั้นไปลดความแรงของตัวเร่งปฏิกิริยาจริงตามที่ตั้งสมมุติฐานไว้



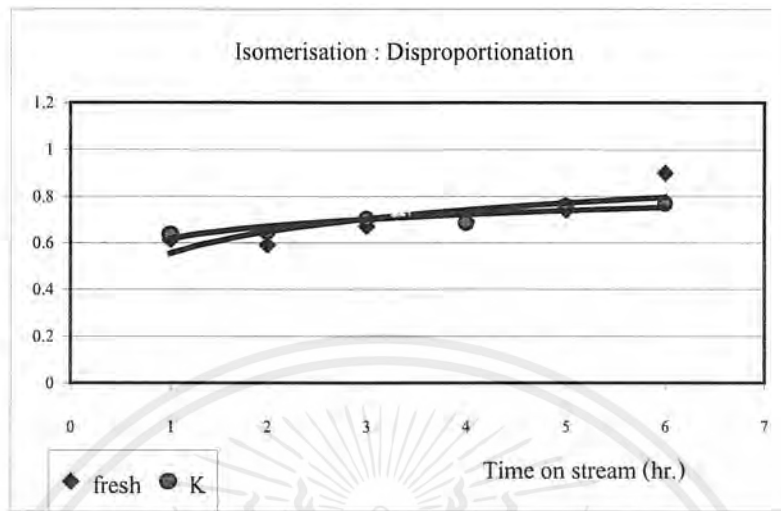
รูปที่ 4.16 เปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะโพแทสเซียมและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปนี้มีแนวโน้มที่ต่ำกว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปในผลการทดลองหัวข้อที่ 4.2.1 ดังรูปที่ 4.17 เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากโลหะโพแทสเซียมที่บรรจุในตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากจะทำให้ความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงแล้วยังทำให้ตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาลดลงด้วยเช่นกัน จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene มีค่าลดต่ำลง



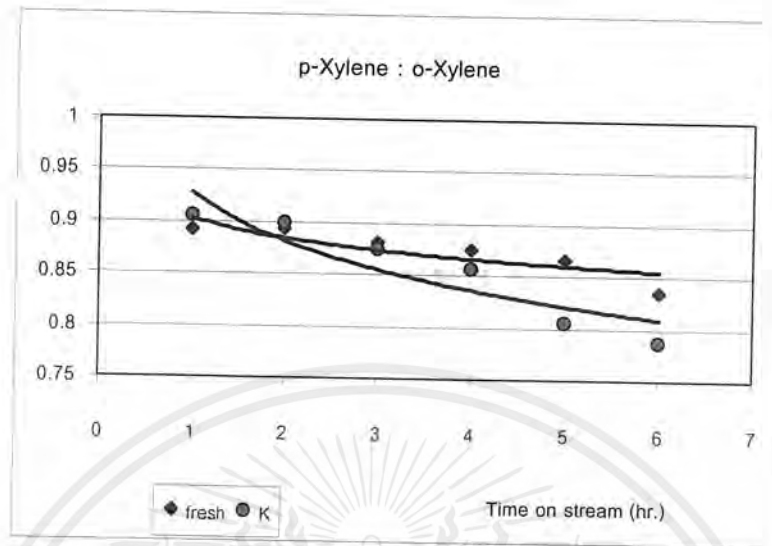
รูปที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมโรไซเซชันที่อุณหภูมิ 350 ° C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะ โพแทสเซียมและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง

ในส่วนของปฏิกิริยาไอโซเมโรไซเซชัน (Isomerisation) และปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน (Disproportionation) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างปฏิกิริยาไอโซเมโรไซเซชันต่อปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแนวโน้ม ดังรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่า โลหะโพแทสเซียมไม่ไปรบกวนความจำเพาะเจาะจงในการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมโรไซเซชันและปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน



รูปที่ 4.18 สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน (Isomerisation : Disproportionation , I/D) จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350°C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะโพแทสเซียมและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง

อย่างไรก็ตามโลหะโพแทสเซียมที่บรรจุในตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีผลต่อความจำเพาะเจาะจงของการเกิดเป็น *p*-Xylene และ *o*-Xylene ดังรูปที่ 4.19 พิจารณาจากสัดส่วนของ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene พบว่าการตกลงของเส้นแนวโน้มมีการตกลงที่รวดเร็วกว่าผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 อธิบายได้จากความแรงของกรดที่ตกลงนั่นเองที่ทำให้ *p*-Xylene เกิดในอัตราส่วนที่ลดลง



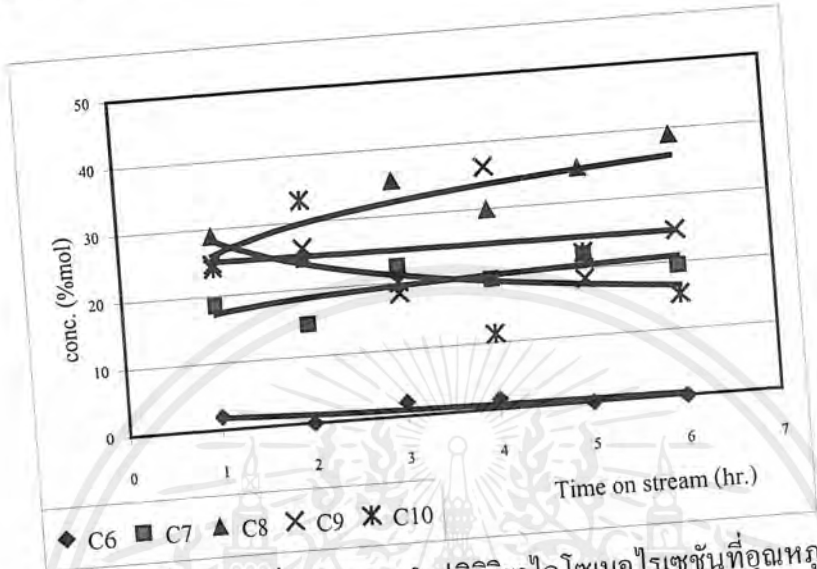
รูปที่ 4.19 สัดส่วนของ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันที่อุณหภูมิ 350 ° C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะโพแทสเซียมและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง

4.2.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชัน

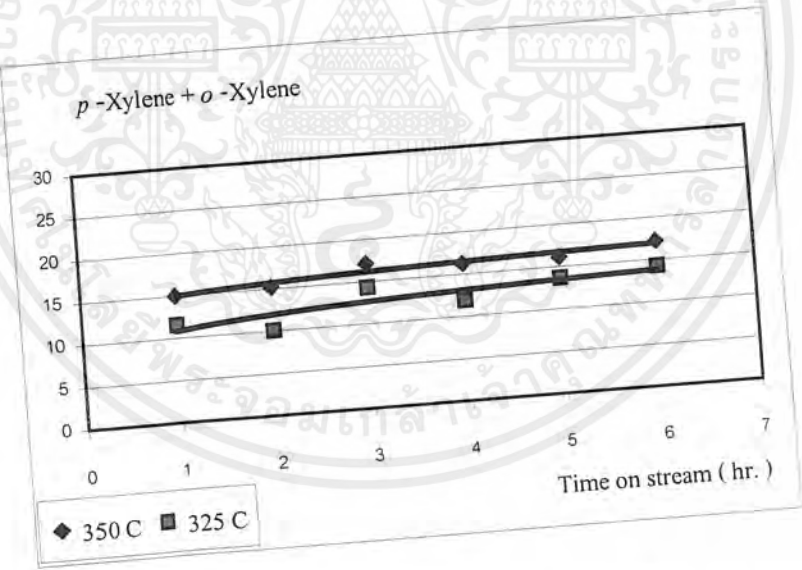
เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันจาก 350 องศาเซลเซียส เป็น 325 องศาเซลเซียส ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียสแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบด้วยไซลีนทั้ง 3 ไอโซเมอร์โดยพบ *m*-Xylene ในปริมาณที่สูงกว่า *p*-Xylene และ *o*-Xylene ตามเทอร์โมไดนามิกส์ [1] ในการทำปฏิกิริยานี้ไม่สามารถแยก *m*-Xylene ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดจากปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันออกจากกันได้ จึงไม่สามารถเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิที่ 325 และ 350 องศาเซลเซียสได้

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำปริมาณ *p*-Xylene และ *o*-Xylene มาใช้พิจารณาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา (Activity) จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิที่ 325 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ปริมาณ *p*-Xylene และ *o*-Xylene รวมกันแล้ว มีปริมาณสูงกว่าที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนี้ มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาดีกว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความแรงของกรดมีค่าสูงเช่นกัน นอกจากนั้นยังพิจารณาได้จากทฤษฎีการชน

ของโมเลกุล (Collision theory) ที่อุณหภูมิสูงการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้น ทำให้มีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นด้วย [9]



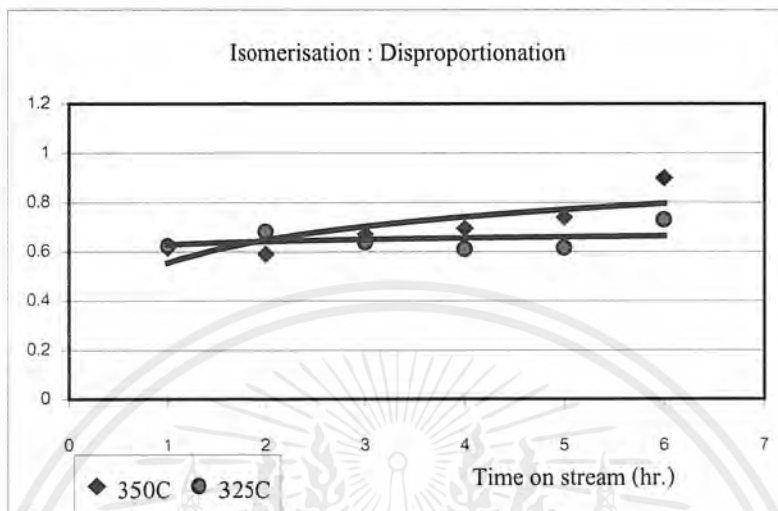
รูปที่ 4.20 เปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 325 °C



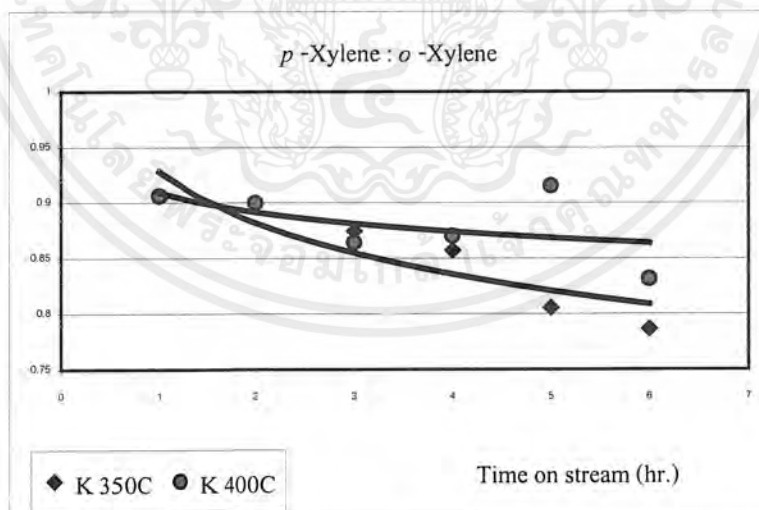
รูปที่ 4.21 ปริมาณโดยรวมของ p-Xylene และ o-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 325 และ 350 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาสัดส่วนระหว่างปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพอพอซิเนชัน พบว่าสัดส่วนนี้ โดยเปรียบเทียบที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 325 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าผลการ

ทดลองที่ได้มีผลที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.22 แสดงว่าอุณหภูมิในช่วงที่ศึกษาไม่มีผลชัดเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและปฏิกิริยาคิสพราวพอชันเนชัน



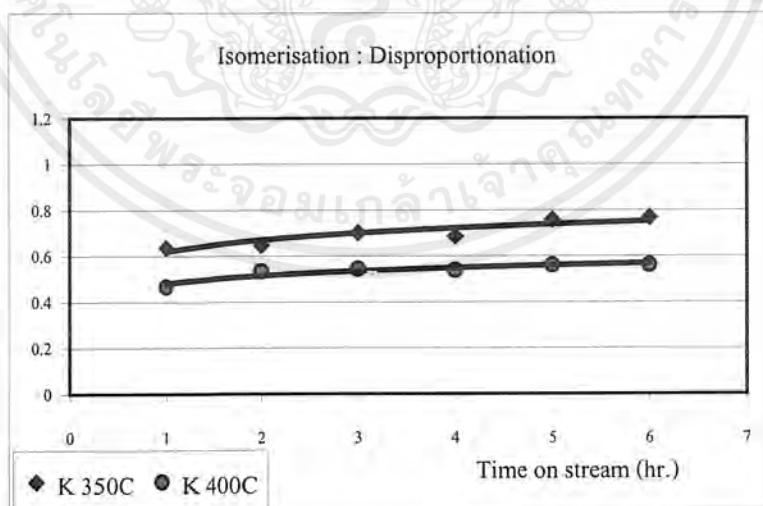
รูปที่ 4.22 สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพราวพอชันเนชัน (Isomerisation : Disproportionation, I/D) จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 325 และ 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาคิสพราวพอชันเนชัน (Isomerisation : Disproportionation, I/D) จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 และ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะโพแทสเซียม

แต่เมื่อทดลองทำการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะ โพลแทสเซียมเพื่อลดการเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 10 ตัว นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงแล้วเช่นกัน พบว่าเส้นแนวโน้มของสัดส่วนระหว่างปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันของการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 และ 400 องศาเซลเซียส แสดงความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เส้นแนวโน้มของสัดส่วนระหว่างปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันอยู่ต่ำกว่าเส้นแนวโน้มที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันเกิดขึ้นได้ดีกว่าปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน [2]

ในส่วนของความจำเพาะเจาะจง สัดส่วนของ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene ยังคงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 และ 400 องศาเซลเซียส พบว่าสัดส่วนของ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 350 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.24 อธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นนี้ได้จากการพิจารณาความแรงของกรด กล่าวคือ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้ความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้นเป็นเหตุให้ *p*-Xylene เกิดได้มากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นสัดส่วนของ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene จึงมีค่าสูงกว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.24 สัดส่วนของ *p*-Xylene ต่อ *o*-Xylene จากการทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 350 และ 400 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุโลหะ โพลแทสเซียม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) และภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope) ของซีโอไลต์ ชนิด Y ที่ได้ พบว่าเป็นซีโอไลต์ชนิด Y ที่มีผลึกสมบูรณ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผลึกโดยเฉลี่ย 0.5 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตามซีโอไลต์ Y ที่สังเคราะห์ได้ ไม่สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerisation) เนื่องจากซีโอไลต์นี้มีความเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ไม่สามารถปรับปรุงซีโอไลต์ให้มีฤทธิ์เป็นกรดได้

จากการศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า พบว่านอกจากเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันแล้วยังเกิดปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน (Disproportionation) ควบคู่ด้วย ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ดังนี้ คือ เบนซีน (C_6) โทลูอีน (C_7) ไซลีนทั้ง 3 ไอโซเมอร์ (C_8) ไตรเมทิลเบนซีน (C_9) และผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 10 ตัว (C_{10}) ปริมาณเล็กน้อย สรุปการเกิดปฏิกิริยาและตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาได้ ดังนี้

- เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (% Conversion) ของ *m*-Xylene มีค่าลดลงเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ (Deactivation) ส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเกิดได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน แต่ความจำเพาะเจาะจงของ *p*-Xylene ซึ่งแปรตามความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าลดลงเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ
- การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ไม่ทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา (Activity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้านี้ลดลง นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังมีเสถียรภาพดีขึ้นอันเนื่องมาจากการกระทำทางความร้อน (Heat treatment) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ตามการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน และปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน อีกทั้งไม่ผลต่อความจำเพาะเจาะจงของการเกิด *p*-Xylene ด้วย
- เมื่อเวลาในการสัมผัส (Contact time) ของ *m*-Xylene กับตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลง ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene มีค่าลดลงด้วย เนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลง อย่างไรก็ตามเวลาในการสัมผัสของ *m*-Xylene กับ

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาในการทดลองนี้ไม่แสดงให้เห็นความแตกต่างทั้งใน
สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันและ
ความจำเพาะเจาะจงของ *p*-Xylene

- การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการบรรจุโลหะโพแทสเซียมลงในตัวเร่งปฏิกิริยา
ทางการค้า พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 10 ตัวและเปอร์เซ็นต์
การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ *m*-Xylene มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ปรับปรุง ทั้งนี้เนื่องมาจากการลดลงของความแรงของกรด
(Acid strength) ของตัวเร่งปฏิกิริยา และผลจากความแรงของกรดที่ลดลงทำให้
ความจำเพาะเจาะจงของ *p*-Xylene ลดลงด้วย อย่างไรก็ตามโลหะโพแทสเซียมที่บรรจุ
ในตัวเร่งปฏิกิริยาไม่รบกวนความจำเพาะเจาะจงในการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน
และปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน
- เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูง
ขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีการชนของโมเลกุล (Collision theory) และความแรง
ของกรดที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนั้นการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงทำให้
ปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันเกิดขึ้นได้ดีกว่าปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเนื่องจาก
ความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าสูงขึ้น และยังทำให้ความจำเพาะเจาะจง
ของ *p*-Xylene มีค่าสูงขึ้นด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. การทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 250 – 300 องศาเซลเซียส โดยที่ยังใช้ตัว
เร่งปฏิกิริยาทางการค้านี้ในการทำปฏิกิริยา น่าที่จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา
ไอโซเมอไรเซชันมีค่าสูงกว่าการเกิดปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน โดยที่ความสามารถ
ในการเกิดปฏิกิริยาและ ความจำเพาะเจาะจงของผลิตภัณฑ์ลดลงไม่มากนัก
นัก เนื่องตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีความแรงของกรดค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังอาจช่วยลด
ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ตัวได้อีกด้วย
2. การลดลงของเวลาในการสัมผัส (Contact time) ของ *m*-xylene กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่
มากกว่าในการทดลองนี้ จะทำให้เห็นความแตกต่างของการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอ-
ไรเซชันและการเกิดปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันที่ชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อเวลาในการทำ
ปฏิกิริยาลดลง ทำให้การแข่งขันของปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันลดลงเนื่องจาก

ปฏิกิริยาคิสพอรอพรอซินะชัน เป็นปฏิกิริยาโมเลกุลเชิงคู่ (Bimolecular reaction) ในขณะที่ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่เป็นปฏิกิริยาโมเลกุลเชิงเดี่ยว (Monomolecular reaction) ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีผลกระทบน้อยกว่าเมื่อเวลาในการสัมผัสของ *m*-xylene กับตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง จึงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนขึ้น



ภาคผนวก

ผลการวิจัยด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟีแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างแสดงการคำนวณผลิตภัณฑ์ที่ได้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี

350 °C		Area	Area/C atom	%normalise area	RF	Callibrate %mol	Total
C ₆	Benzene	1949	324.83	2.9	0.97	2.82	2.82
C ₇	Toluene	19960	2851.43	25.44	0.96	24.35	24.35
C ₈	Ehylbenzene	0	0	0	0.89	0	35.81
	<i>p</i> -Xylene	7361	920.13	8.21	0.86	7.07	
	<i>m</i> -Xylene	18207	2275.88	20.31	1.03	20.82	
	<i>o</i> -Xylene	7425	928.13	8.28	0.96	7.92	
C ₉	Unk1	5047	560.78	5		5	20.33
	Unk2	13499	1499.89	13.38		13.38	
	Cumene	1963	218.11	1.95		1.95	
C ₁₀₊		1534	153.4	1.37		1.37	14.53
		1877	187.7	1.67		1.67	
		2495	249.5	2.23		2.23	
		2964	296.4	2.64		2.64	
		1814	181.4	1.62		1.62	
		4572	457.2	4.08		4.08	
		1027	102.7	0.92		0.92	
Total			11207.46	100		97.84	97.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิจัยผลิตภัณฑ์

%Conversion

$$\% \text{Conversion} = (\% \text{mol C}_6 + \% \text{mol C}_7 + \% \text{mol C}_8 + \% \text{mol C}_9 + \% \text{mol C}_{10}^+) - \% \text{mol } m\text{-Xylene}$$

Isomerisation/Disproportionation (I/D)

$$I/D = (\% \text{mol } o\text{-Xylene} + \% \text{mol } p\text{-Xylene}) / \% \text{mol C}_7$$

p-Xylene/*o*-Xylene (p/o)

$$p/o = \% \text{mol } p\text{-Xylene} / \% \text{mol } o\text{-Xylene}$$

ตารางที่ 2 ตารางแสดงสภาวะที่ใช้ศึกษากระบวนการไอโซเมอไรเซชันของ *m*-Xylene ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า

การทดลอง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	Carrier gas	อัตราการไหลของ Carrier gas (ml/min)
1	UOP-4120	325	N ₂	68
2	UOP-4120	350	N ₂	68
3	Regen	350	N ₂	68
4	UOP-4120	350	N ₂	100
5	K-UOP-4120	350	N ₂	68
6	K-UOP-4120	400	N ₂	68
7	TPA-UOP-4120	350	N ₂	68

ตารางที่ 3 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 1

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
C ₆	1.95	0.00	2.05	1.48	0.00	0.00
C ₇	18.55	14.74	22.41	19.47	22.21	19.50
C ₈	28.84	24.52	35.10	29.77	34.98	38.88
C ₉	24.83	26.15	18.39	36.29	18.53	24.75
C ₁₀ ⁺	24.21	33.27	20.07	11.31	22.44	15.19
Total	98.38	98.69	98.01	98.33	98.16	98.32

ตารางที่ 4 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 1

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
<i>p</i> -Xylene	5.44	4.72	6.79	5.61	6.41	6.54
<i>m</i> -Xylene	17.29	14.47	20.82	17.88	21.31	24.67
<i>o</i> -Xylene	6.12	5.33	7.48	6.29	7.26	7.68
Total	28.84	24.52	35.10	29.77	34.98	38.88

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิจัยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 1

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
%Conversion	81.09	84.21	77.19	80.45	76.85	73.66
I/D	0.62	0.68	0.64	0.61	0.62	0.73
p/o	0.89	0.89	0.91	0.89	0.88	0.85

ตารางที่ 6 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 2

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
C ₆	2.82	2.75	2.12	1.74	1.34	0.66
C ₇	24.35	25.68	25.50	23.41	21.80	19.12
C ₈	35.81	36.39	40.97	39.93	39.66	46.34
C ₉	20.33	19.77	20.95	22.53	23.22	25.13
C ₁₀ ⁺	14.53	13.17	8.14	10.25	11.94	6.90
Total	97.84	97.77	97.67	97.86	97.96	98.15

ตารางที่ 7 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 2

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
<i>p</i> -Xylene	7.07	7.16	8.01	7.58	7.49	7.82
<i>m</i> -Xylene	20.82	21.22	23.87	23.68	23.52	29.15
<i>o</i> -Xylene	7.92	8.02	9.09	8.67	8.65	9.37
Total	35.81	36.39	40.97	39.93	39.66	46.34

ตารางที่ 8 แสดงผลการวิจัยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 2

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
%Conversion	77.01	76.55	73.81	74.18	74.43	69.00
I/D	0.62	0.59	0.67	0.69	0.74	0.90
p/o	0.89	0.89	0.88	0.87	0.87	0.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและสิ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 3

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
C ₆	0.00	2.09	2.09	1.68	0.00	1.00
C ₇	18.23	22.99	22.99	21.39	21.19	19.70
C ₈	33.43	35.77	35.77	35.64	35.78	38.50
C ₉	21.46	18.66	18.66	19.43	18.22	18.81
C ₁₀ ⁺	25.31	18.46	18.46	19.96	22.98	20.19
Total	98.45	97.96	97.96	98.09	98.16	98.20

ตารางที่ 10 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 3

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
<i>p</i> -Xylene	5.89	6.77	6.94	6.69	6.63	6.77
<i>m</i> -Xylene	20.99	21.11	21.21	21.42	21.57	23.58
<i>o</i> -Xylene	6.55	7.47	7.63	7.53	7.58	8.15
Total	33.43	35.35	35.77	35.64	35.78	38.50

ตารางที่ 11 แสดงผลการวิจัยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 3

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
%Conversion	77.46	76.85	76.75	76.67	76.59	74.62
I/D	0.68	0.62	0.63	0.66	0.67	0.76
p/o	0.90	0.91	0.91	0.89	0.88	0.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 4

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
C ₆	2.38	2.53	1.81	1.79	1.37	0.84
C ₇	26.32	26.84	24.25	24.80	23.24	20.48
C ₈	40.41	41.38	40.58	41.96	44.21	45.35
C ₉	21.73	19.87	21.44	21.99	22.16	23.32
C ₁₀ ⁺	6.81	7.03	9.71	7.27	6.96	8.10
Total	97.66	97.65	97.80	97.80	97.93	98.10

ตารางที่ 13 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 4

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
<i>p</i> -Xylene	7.83	7.89	7.73	7.70	7.69	7.67
<i>m</i> -Xylene	23.69	24.66	24.02	25.23	27.40	28.44
<i>o</i> -Xylene	8.89	8.83	8.84	9.02	9.12	9.23
Total	40.41	41.38	40.58	41.96	44.21	45.35

ตารางที่ 14 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 4

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
%Conversion	73.97	72.99	73.78	72.57	70.53	69.65
I/D	0.64	0.62	0.68	0.67	0.72	0.83
p/o	0.88	0.89	0.87	0.85	0.84	0.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 5

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
C ₆	2.48	2.05	1.40	1.53	1.06	1.00
C ₇	28.22	27.47	25.99	25.49	24.02	22.94
C ₈	43.05	43.01	44.74	44.02	47.48	48.30
C ₉	21.55	22.29	22.86	23.52	22.85	22.99
C ₁₀ ⁺	2.17	2.71	2.63	3.17	2.41	2.78
Total	97.47	97.54	97.62	97.73	97.84	97.99

ตารางที่ 16 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 5

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
<i>p</i> -Xylene	8.55	8.44	8.52	8.07	8.13	7.76
<i>m</i> -Xylene	25.06	25.20	26.49	26.52	29.26	30.68
<i>o</i> -Xylene	9.44	9.38	9.74	9.42	10.09	9.86
Total	43.05	43.01	44.74	44.02	47.48	48.30

ตารางที่ 17 แสดงผลการวิจัยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 5

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
%Conversion	72.40	72.34	71.13	71.21	68.58	67.31
I/D	0.64	0.65	0.70	0.69	0.76	0.77
p/o	0.91	0.90	0.87	0.86	0.81	0.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 18 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 6

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
C ₆	13.93	10.49	9.76	9.29	15.37	8.58
C ₇	30.74	29.38	30.05	29.40	26.47	29.21
C ₈	34.10	38.09	39.56	38.01	35.93	40.31
C ₉	15.38	17.06	15.82	18.12	17.46	17.14
C ₁₀ ⁺	3.11	2.33	2.13	2.57	2.17	2.17
Total	97.27	97.35	97.32	97.39	97.39	97.42

ตารางที่ 19 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 6

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
<i>p</i> -Xylene	6.81	7.44	7.58	7.36	7.09	7.45
<i>m</i> -Xylene	19.77	22.38	23.20	22.20	21.08	23.91
<i>o</i> -Xylene	7.52	8.27	8.77	8.45	7.75	8.96
Total	34.10	38.09	39.56	38.01	35.93	40.31

ตารางที่ 20 แสดงผลการผลการวิจัยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 6

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
%Conversion	77.49	74.97	74.12	75.18	76.31	73.51
I/D	0.47	0.53	0.54	0.54	0.56	0.56
p/o	0.91	0.90	0.86	0.87	0.92	0.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 57 อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 21 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 7

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
C ₆	1.00591	1.19985	1.28028	1.30476	1.73621	1.51648
C ₇	24.1148	23.3514	25.5068	26.3115	26.5766	26.2471
C ₈	50.6953	46.636	45.8719	45.0887	43.6367	44.398
C ₉	20.1799	20.1799	22.4041	22.3643	22.8261	22.8262
C ₁₀ ⁺	1.89422	1.89422	2.63409	2.54703	2.83488	2.6272
Total	97.8901	93.2615	97.6972	97.6164	97.6105	97.615

ตารางที่ 22 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 7

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
<i>p</i> -Xylene	8.33	7.96	8.35	8.51	8.32	8.45
<i>m</i> -Xylene	32.45	28.77	27.62	26.76	25.76	26.24
<i>o</i> -Xylene	9.91	9.90	9.90	9.82	9.56	9.70
Total	50.70	46.64	45.87	45.09	43.64	44.40

ตารางที่ 23 แสดงผลการวิจัยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ 7

	Time on stream (hr)					
	1	2	3	4	5	6
%Conversion	65.44	64.49	70.07	70.86	71.85	71.37
I/D	0.76	0.41	0.38	0.38	0.36	0.37
p/o	0.84	0.80	0.84	0.87	0.87	0.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 58 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Wiseman ,P. in Petrochemical ,pp. 89-100 ,Ellis-Horwood, 1986
2. Tseng-Chang ,T. ,Shang-Bin ,L. and Ikai ,W. ,“ Disproportionation and Transalkylation of Alkylbenzene over Zeolite Catalysts” ,Appl. Catal. ,181 ,1999 ,355-398
3. Guisnet ,M. and Gnep ,N.S. ,Zeolite as Catalysis in Xylene Isomerisation Process.in Zeolite: Science and Teachnology ,pp. 571-582 ,Hagve ,1984
4. Jones ,C.W. ,Zones ,S.I. and Davis ,M.E. , “*m*-Xylene Reaction over Zeolites with Unidimensional Pore Systems” , Appl. Catal. ,181 ,1999 ,289-303
5. Derouane ,E.G. ,Molecular Shape-Selectivity Catalysis by Zeolites.in Zeolite: Science and Teachnology ,pp. 347-371 ,Hagve ,1984
6. Scherzen ,J. and Gruia ,A.J. ,Hydrocracking Science and Teachnology ,New York , 1996
7. Kokotailo ,G.T. ,Lawton ,S.L. and Olsen ,D.H. “Structure of Synthetic Zeolite ZSM-5” Nature ,272 ,1978 ,437-438
8. ตะวัน สุชน้อย ,“การออกแบบและการจัดสร้างชุดทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา” ,โครงการทุนสนับสนุนนักวิจัยใหม่ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(ส่วนกลาง) รหัสโครงการ CO-06-22-22-001 ,2541
9. Gates ,B.C. ,Catalytic Chemistry ,John Wiley&Sons ,Canada ,15-19 ,1992

บรรณานุกรม

1. Aboul-Gheit ,A. ,Abdel-Hamid ,S. ,Mohamed ,S. and EI-Desouky ,D. , “ Catalytic *para*-Xylene Maximization: III. Hydroisomerisation of *meta*-Xylene on H-ZSM-5 Catalysis Containing Different Platinum Contents” *J. Chem. Technol Biotechnol.* ,74 ,1999 , 771-777
2. Lanewala ,M.A. and Bolton ,A.P. , “The Isomerisation of the Xylenes Using Zeolite Catalysts” *J. Org. Chem.* ,34 ,1969 ,3107-3112
3. John ,H.H. ,Neubauer ,H.D. and Birke ,P. , “Zeolite Containing Catalysts for the Conversion of C₈-aromatics Fractions” *Catal. Today* ,49 ,1999 ,211-220
4. Guisnet ,M. ,Morin ,S. and Gnep ,N.S. , “Influence of Coke Deposits on the Selectivity of *m*-Xylene Transformation and on the Isomerisation Mechanism” , *Appl. Catal.* ,168