

การผลิตกรดอะครีลิกจากดีไฮเดรชันของกรดแลคติก

Acrylic acid production from dehydration of lactic acid

โดย

สุพจน์ พัฒนะศรี

สัญญาเลขที่ GB-A\_60\_032\_21\_03

ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

กันยายน 2560

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปี 2560 (สัญญาเลขที่ GB-A\_60\_032\_21\_03) ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณในการให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยดังกล่าวมา ณ ที่นี้

## บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมโพแทสเซียมในปริมาณที่แตกต่างกันลงบนซีโอไลต์ Y ที่อัตราส่วน 0, 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่ถูกเตรียมโดยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา (15, 100 และ 500) ของซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดถูกทดสอบในปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติกที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันบรรยากาศและวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิคต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วนแตกต่างกัน และอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาของซีโอไลต์ Y และอัตราส่วนของตัวรองรับอะลูมินาต่อซีโอไลต์ Y มีผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติก ในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด ซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 100 และถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แสดงประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติกได้ดีที่สุด คือ 100 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดแลคติกและ 45.5 เปอร์เซ็นต์การเลือกเกิดกรดอะคริลิกและจะมีเปอร์เซ็นต์การเลือกเกิดอะซิโตนไฮไดรด์ที่ต่ำที่สุดเพราะว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีปริมาณความเป็นกรดและความเป็นเบสที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณอะลูมินาที่สูงจะมีแนวโน้มให้เกิดการทำลายต่อโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา และทำให้มีปริมาณกรดแก่มาก ซึ่งทำให้มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาต่ำ และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมโพแทสเซียมช่วยปรับปรุงการเลือกเกิดกรดอะคริลิกและช่วยลดการเลือกเกิดอะซิโตนไฮไดรด์

**คำสำคัญ (ไทย)** กรดอะคริลิก กรดแลคติก ดีไฮเดรชัน

## Abstract

In this research, the effect of different potassium loading over HY100 zeolite catalysts at 0, 2, 4, 6 and 8 wt.% prepared by incipient wetness impregnation method was studied. In addition, the effect of Si/Al molar ratios (15, 100 and 500) of HY zeolite modified with potassium at 6 wt.% was also investigated. All catalysts were tested in lactic acid dehydration reaction at 340 °C of reaction temperature under atmospheric pressure and characterized by various techniques. From the results, it was found that HY zeolite modified with different potassium loading, Si/Al molar ratios of HY zeolite and support ratios of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and HY zeolite affected the catalytic activity in lactic acid dehydration reaction, evidenced by characterization results. Among all the catalysts, the HY zeolite with Si/Al molar ratios of 100 and modified with potassium at 6 wt.% represented the best catalyst for lactic acid dehydration with 100% conversion and 45.5% selectivity for acrylic acid as well as the lowest acetaldehyde selectivity due to the suitability of total acidity and basicity of the catalyst. However, the catalyst with too high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content caused the structural collapse, high strong acid sites and high coke deposition resulting in the lowest catalytic performance. The catalytic results indicated that potassium modification of HY zeolite could improve acrylic acid selectivity and reduce acetaldehyde selectivity.

**Keywords:** Acrylic acid; Lactic acid; Dehydration



## สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	2
บทคัดย่อภาษาไทย	3
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	4
สารบัญเรื่อง	5
สารบัญตาราง	6
สารบัญภาพ	7
บทนำ	9
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	10
วิธีการวิจัย	10
ผลการทดลอง	13
สรุปผลการทดลอง	40
ข้อเสนอแนะ	40
บรรณานุกรม	41
ภาคผนวก	43
Reprint บทความวิจัย	43
ประวัตินักวิจัย	44

## สารบัญตาราง

	หน้า
<b>ตารางที่ 4.1</b> แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	14
<b>ตารางที่ 4.2</b> แสดงความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	16
<b>ตารางที่ 4.3</b> แสดงความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	18
<b>ตารางที่ 4.4</b> แสดงองค์ประกอบของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	21
<b>ตารางที่ 4.5</b> ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	24
<b>ตารางที่ 4.6</b> แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	27
<b>ตารางที่ 4.7</b> แสดงความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	30
<b>ตารางที่ 4.8</b> แสดงความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	32
<b>ตารางที่ 4.9</b> แสดงองค์ประกอบของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	34
<b>ตารางที่ 4.10</b> ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	37

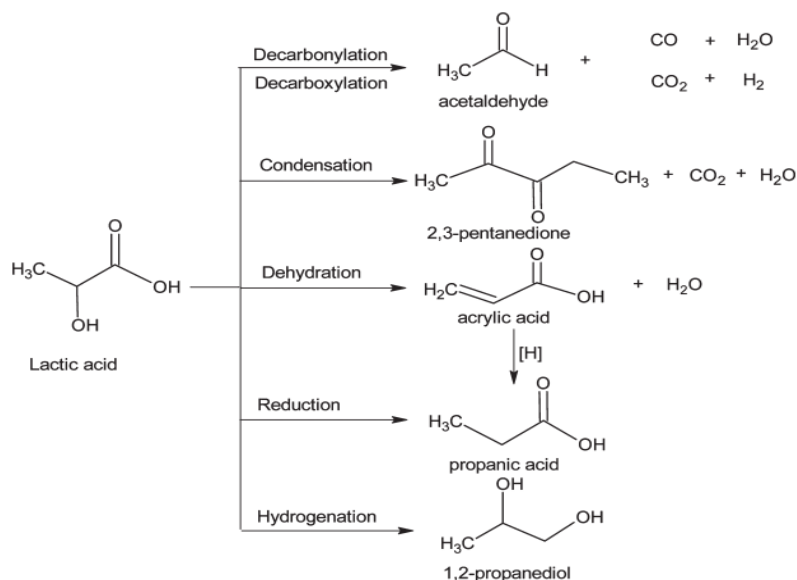
## สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสำหรับกรดแลคติก	9
รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา	12
รูปที่ 4.1 แสดงการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	13
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการดูดซับ-คายซับของไนโตรเจนไอโซเทอมของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	15
รูปที่ 4.3 แสดง NH <sub>3</sub> -TPD profile ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	16
รูปที่ 4.4 แสดง CO <sub>2</sub> -TPD profile ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	18
รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	19
รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวของโพแทสเซียมบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	20
รูปที่ 4.7 แสดงน้ำหนักที่หายไปของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมหลังจากใช้เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	21
รูปที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นและการเลือกเกิดของสารผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมเมื่อใช้เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 °C เป็นเวลา 90 นาที	23
รูปที่ 4.9 ค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิกบนตัวเร่งปฏิกิริยา (A) HY100, (B) 2%K/HY100 zeolite, (C) 4%K/HY100 zeolite, (D) 6%K/HY100 zeolite และ (E) 8%K/HY100 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C	21
รูปที่ 4.10 ค่าการเลือกเกิดของอะซิโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (A) HY100, (B) 2%K/HY100 zeolite, (C) 4%K/HY100 zeolite, (D) 6%K/HY100 zeolite และ (E) 8%K/HY100 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C	25
รูปที่ 4.11 ค่าการเลือกเกิดของกรดโพพิโอนิกบนตัวเร่งปฏิกิริยา (A) HY100, (B) 2%K/HY100 zeolite, (C) 4%K/HY100 zeolite, (D) 6%K/HY100 zeolite และ (E) 8%K/HY100 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C	25
รูปที่ 4.12 แสดงการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	26

รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะการดูดซับ-คายซับของไนโตรเจนไอโซเทอมของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกัน	28
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะการดูดซับ-คายซับของไนโตรเจนไอโซเทอมของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียม ที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	29
รูปที่ 4.15 แสดง NH <sub>3</sub> -TPD profile ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	30
รูปที่ 4.16 แสดง CO <sub>2</sub> -TPD profile ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	32
รูปที่ 4.17 แสดงสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	33
รูปที่ 4.18 แสดงการกระจายตัวของโพแทสเซียมบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	34
รูปที่ 4.19 แสดงน้ำหนักที่หายไปของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมหลังจากใช้เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	35
รูปที่ 4.20 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นและการเลือกเกิดของสารผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 °C เป็นเวลา 90 นาที	37
รูปที่ 4.21 ค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิกบนตัวเร่งปฏิกิริยา(A) 6%K/HY15 zeolite, (B) 6%K/HY100 zeolite และ (C) 6%K/HY500 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C	38
รูปที่ 4.22 ค่าการเลือกเกิดของอะซิโตนไฮดรอกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา(A) 6%K/HY15 zeolite,(B) 6%K/HY100 zeolite และ (C) 6%K/HY500 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C	38
รูปที่ 4.23 ค่าการเลือกเกิดของกรดโพพิโอนิกบนตัวเร่งปฏิกิริยา(A) 6%K/HY15 zeolite,(B) 6%K/HY100 zeolite และ (C) 6%K/HY500 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C	39

## 1. บทนำ

กรดอะคริลิก (Acrylic acid) ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีโดยส่วนใหญ่ได้นั้นได้มาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนของโพรพีลีน [1] ซึ่งกรดอะคริลิกจัดเป็นสารที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เนื่องจากสามารถเปลี่ยนรูปเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น ฝ้ายอ้อม สารยึดติด สารเคลือบผิว เส้นใย รวมทั้งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิเมอร์ [2,3] แต่สารตั้งต้นโพรพีลีนนั้นได้มาจากกระบวนการแตกสลายโมเลกุลด้วยน้ำ (Steam cracking process) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น แนฟทา (Naphtha) และ แอลพีจี (LPG) ซึ่งจัดเป็นสารที่ได้มาจากปิโตรเลียม [4,5] ซึ่งในอนาคตอาจหมดไปและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการผลิตกรดอะคริลิกจากสารชีวมวล (Biomass) จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเนื่องจากสารตั้งต้นที่หาทดแทนได้และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า โดยกรดแลคติก (Lactic acid) จัดเป็นสารสำคัญชนิดหนึ่งที่ได้จากสารชีวมวลซึ่งสามารถเตรียมได้จากกระบวนการหมักของกลูโคส เช่น อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น ทั้งนี้สามารถผลิตกรดอะคริลิกจากกรดแลคติกได้ผ่านปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติก (Lactic acid dehydration reaction) บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติความเป็นกรดและเบสเหมาะสม [6,7] แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างของกรดแลคติกพบว่าประกอบด้วย 2 หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ คือ หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) และ หมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid group) ทำให้กรดแลคติกสามารถเปลี่ยนไปเป็นสารอื่นได้อย่างหลากหลาย เช่น อะซีตัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid) 2,3-เพนเทนไดโอน (2,3-Pentanedione) และอื่นๆ ดังรูปที่ 1 [8-10]



รูปที่ 1.1 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสำหรับกรดแลคติก [10]

ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีส่วนสำคัญที่จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติกไปเป็นกรดอะคริลิก ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ถูกนำมาใช้สำหรับปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติกเนื่องจากมีค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดแลคติกและค่าการเลือกเกิดกรดอะคริลิกที่สูง [11,12] ในขณะเดียวกันโพแทสเซียมถูกใช้เพื่อปรับปรุงความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกเตรียมโดยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมโพแทสเซียมในปริมาณที่แตกต่างกันลงบนซีโอไลต์ Y และผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาของซีโอไลต์ Y ต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติกไปเป็นกรดอะคริลิกบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 ศึกษาผลของการเติมโพแทสเซียมในปริมาณที่แตกต่างกันลงบนซีโอไลต์ Y ต่อความเป็นกรด/เบสของตัวเร่งปฏิกิริยาและความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติก
- 2.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติกบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y

## 3. วิธีการวิจัย

### 3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก

เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 15, 100 และ 500 ตามลำดับ จากนั้นทำการปรับปรุงความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมจากสารประกอบโพแทสเซียมไนเตรต ( $\text{KNO}_3$ ) โดยนำโพแทสเซียมไนเตรตละลายในน้ำกลั่น แล้วนำมาหยดลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกัน ด้วยสัดส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมงในตู้ดูดควัน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เสร็จแล้วนำมาบดให้ละเอียดและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสในสภาวะอากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วนแตกต่างกัน

## 3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.1 ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) ด้วยเครื่อง SIEMENS D-5000 X-ray diffractometer ตั้งแต่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20$  ถึง  $80$  องศา ด้วยอัตรา  $2$  องศาต่อนาที

3.2.2 ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคายซับแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ -TPD) ด้วยเครื่อง Micromeritics Chemisorb 2750 pulse chemisorption system โดยทำการปรับปรุงสภาพพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $500$  °C เป็นเวลา  $1$  ชั่วโมง ในสภาวะแก๊สฮีเลียม แล้วทำการป้อนแก๊สแอมโมเนียที่อัตรา  $25$  ml/min เป็นเวลา  $1$  ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $40$  °C จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่  $600$  °C เป็นคายซับแก๊สที่อยู่บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.3 ความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ -TPD) ด้วยเครื่อง Micromeritics Chemisorb 2750 pulse chemisorption system โดยทำการปรับปรุงสภาพพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $500$  °C เป็นเวลา  $1$  ชั่วโมง ในสภาวะแก๊สฮีเลียม แล้วทำการป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยอัตรา  $25$  ml/min เป็นเวลา  $1$  ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $40$  °C จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่  $600$  °C เป็นคายซับแก๊สที่อยู่บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.4 สมบัติทางพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพของแก๊สไนโตรเจน ด้วยเครื่อง Micromeritics ASAP 2000 automated system

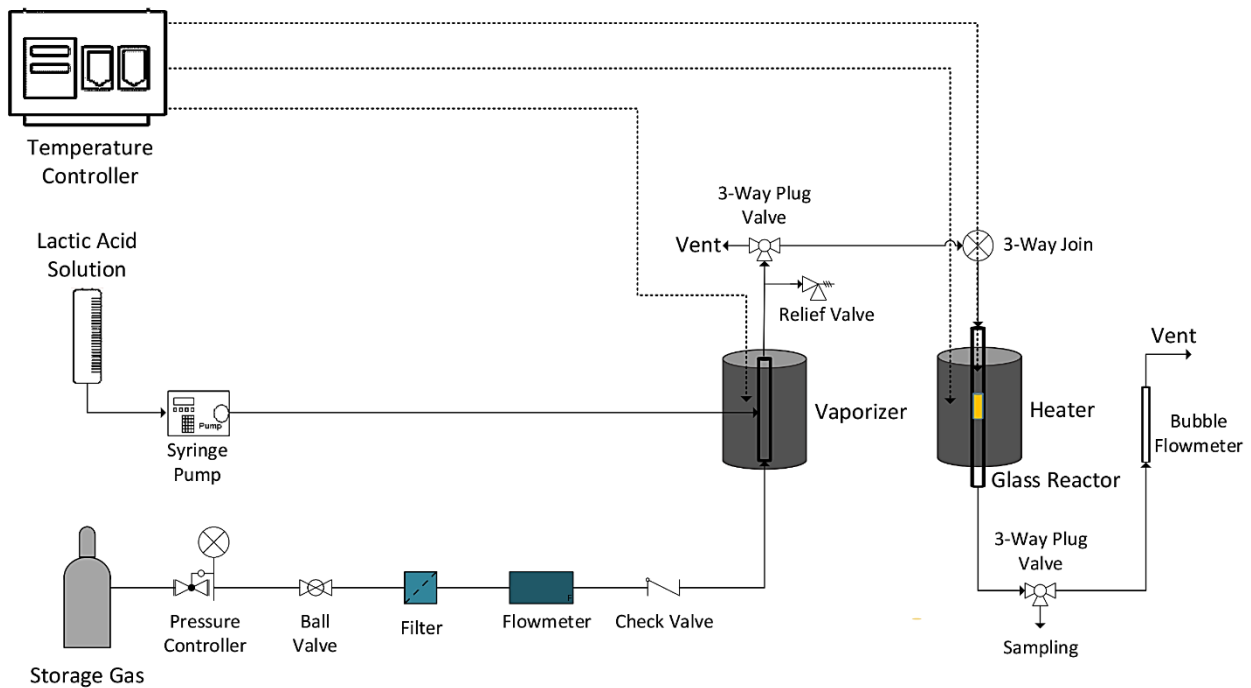
3.2.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM-EDX) โมเดล JEOL mode JSM-5800LV and Link Isis Series 300 program was performed for EDX.

3.2.6 คุณสมบัติทางความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) โดยการเผาในสภาวะออกซิเจนที่อุณหภูมิตั้งแต่  $20$  °C ถึง  $1,000$  °C ที่อัตราการให้ความร้อน  $10$  °C ต่อนาที

### 3.3 การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยามีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ป้อนสารละลายกรดแลคติกด้วยเครื่อง Syringe pump เข้าสู่เครื่องระเหย (Vaporizer) เพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวให้กลายเป็นไอ
- 2) ไอของสารละลายกรดแลคติกจะถูกพาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (Fix-bed reactor) ที่ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาไว้
- 3) สารตั้งต้นจะถูกเก็บก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ขณะที่สารผลิตภัณฑ์จะถูกเก็บหลังผ่านเครื่องปฏิกรณ์ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) แล้วนำมาวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา



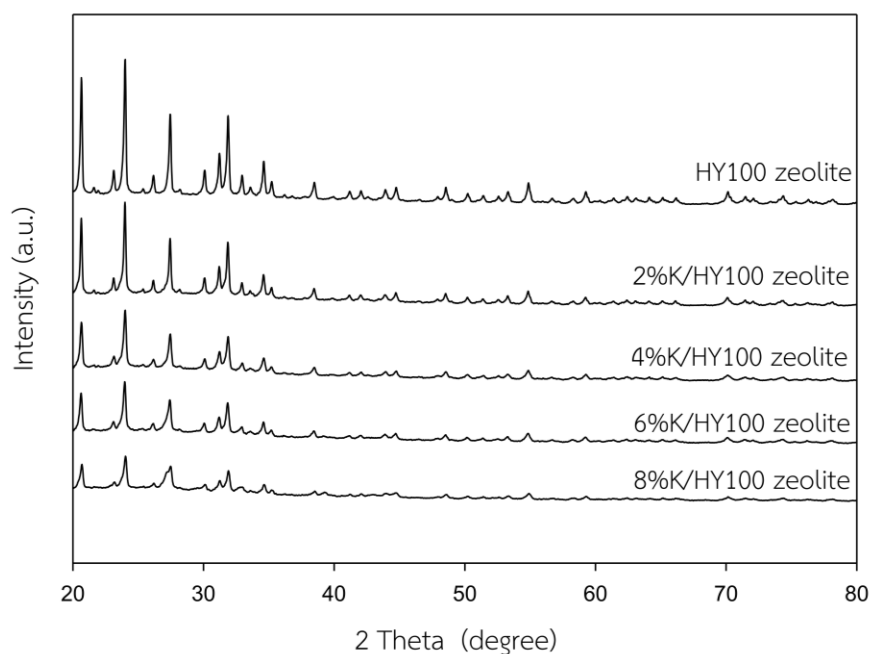
## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 ผลของการเติมโพแทสเซียมที่สัดส่วนแตกต่างกันบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y

#### 4.1.1 วิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

##### 4.1.1.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

กราฟการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y และซีโอไลต์ Y ที่ปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (XRD)



รูปที่ 4.1 แสดงการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.1 แสดงการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะพบพิกัดเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีมุม 2 theta เท่ากับ 20.3°, 23.7°, 27.0°, 31.8°, 34.2°, 38.4° และ 54.6° แสดงถึง โครงสร้างพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y [13] แต่เมื่อทำการเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ด้วยอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่าความเข้มของพิกัดค่าลดลงตามปริมาณโพแทสเซียมลงที่เพิ่มมากขึ้น แสดง

ถึงโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ถูกทำลายเมื่อปริมาณโพแทสเซียมมากขึ้น [14] และจากรูปที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะไม่พบพิกเอกลักษณะของโพแทสเซียม แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีของโพแทสเซียมบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y

#### 4.1.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน

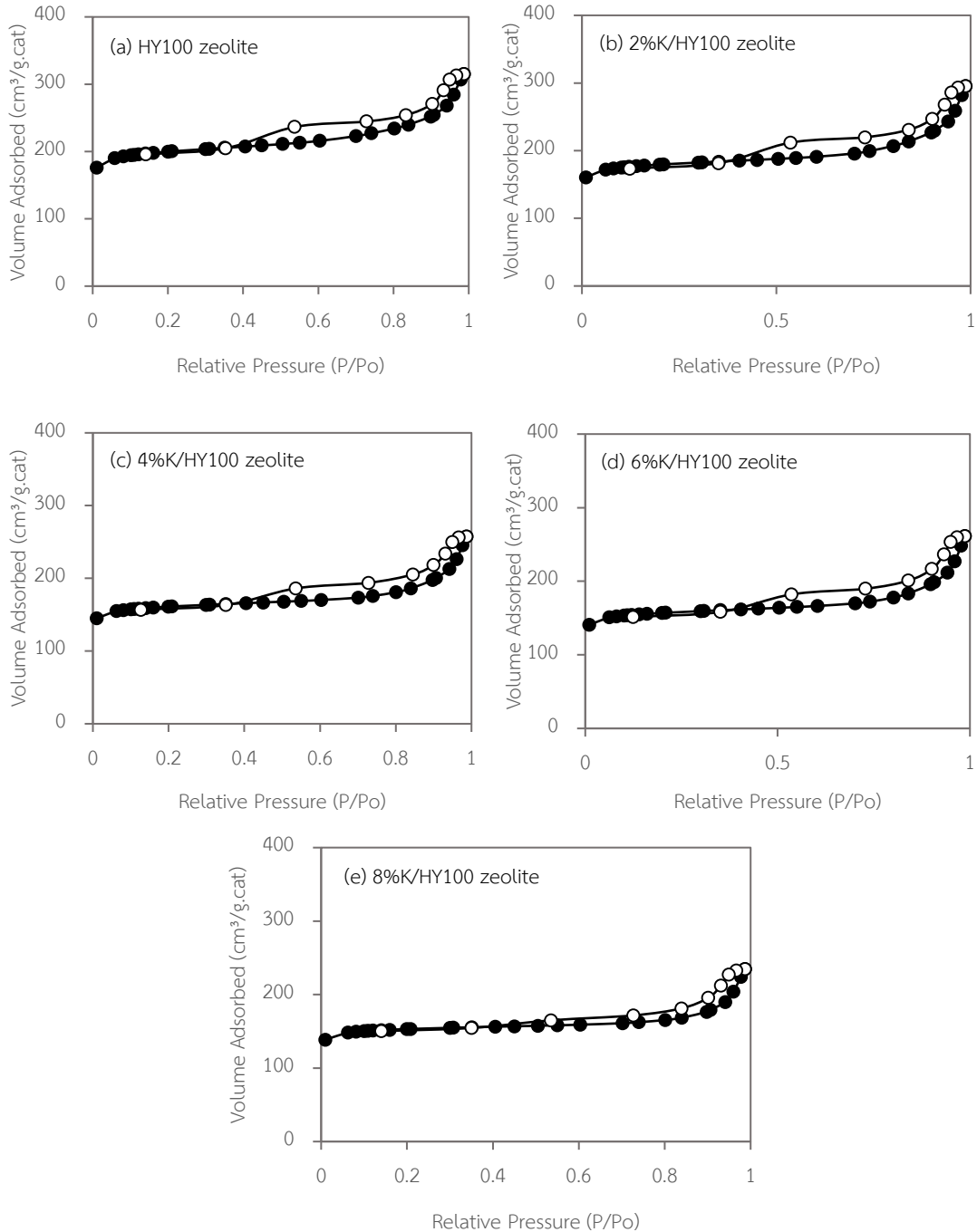
ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen physisorption) ซึ่งคำนวณโดยใช้วิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) method และ Barret-Joyner-Halenda (BJH) method โดยพื้นที่ผิว (BET surface area) ปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) และขนาดของรูพรุน (Pore size) ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียม แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 พบว่า BET surface area และ pore volume ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมจะมีค่าลดลงตามปริมาณของโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ เนื่องจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเติมเต็มไปด้วยโพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide) [10] ในขณะที่ pore size ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y มีค่ามากขึ้นจาก 6.1 เป็น 8.9 นาโนเมตร เนื่องจากโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกทำลายมากขึ้น เมื่อปริมาณโพแทสเซียมมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

**ตารางที่ 4.1** แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Catalysts	BET surface area	Pore volume <sup>a</sup>	Pore size <sup>a</sup>
	(m <sup>2</sup> /g)	(cm <sup>3</sup> /g)	(nm)
HY100 zeolite	675	0.26	6.1
2%K/HY100 zeolite	604	0.26	6.4
4%K/HY100 zeolite	541	0.21	6.7
6%K/HY100 zeolite	527	0.23	6.9
8%K/HY100 zeolite	513	0.16	8.9

<sup>a</sup> คำนวณโดยใช้วิธี Barret-Joyner-Halenda (BJH) desorption method

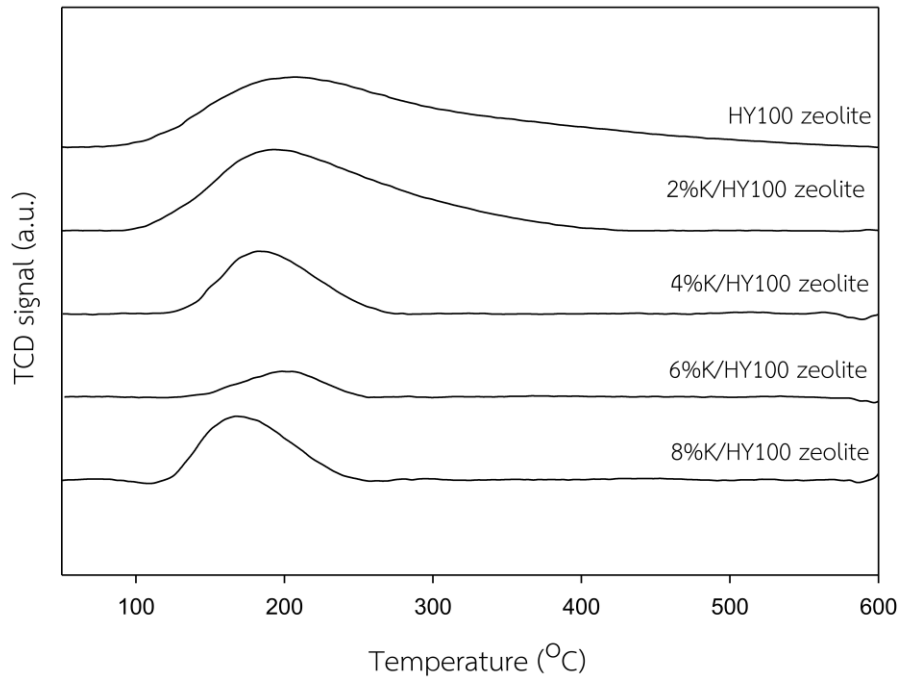
จากรูปที่ 4.2 พบว่าลักษณะของ nitrogen adsorption-desorption isotherm ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มีลักษณะเป็นแบบที่ 4 (type IV isotherm) โดยมีลักษณะเป็นฮิสเทอริสิสลูป (Hysteresis loop) ที่แสดงถึงขนาดโครงสร้างรูพรุนที่เป็นแบบ mesopore [15]



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการดูดซับ-คายซับของไนโตรเจนไอโซเทอมของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.1.1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นกรดด้วยเทคนิคการคายซับของแก๊สแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>-TPD)

คุณสมบัติความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคายซับของแก๊สแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>-TPD) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 แสดง NH<sub>3</sub>-TPD profile ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.2 แสดงความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Catalysts	Total acidity (mmol NH <sub>3</sub> /g.cat)
HY100 zeolite	17.95
2%K/HY100 zeolite	14.42
4%K/HY100 zeolite	5.73
6%K/HY100 zeolite	2.01
8%K/HY100 zeolite	5.46

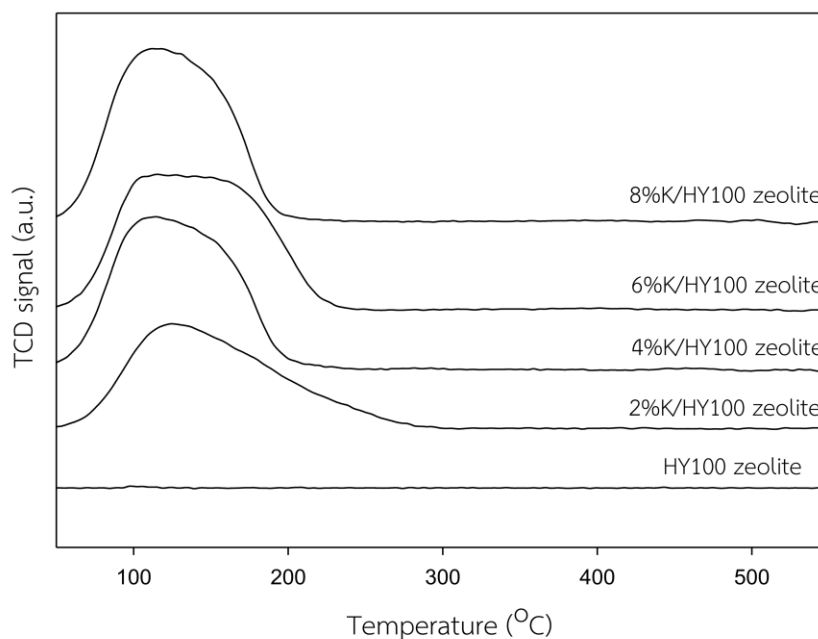
จากรูปที่ 4.3 แสดง  $\text{NH}_3$ -TPD profile ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจะสามารถแบ่งความแรงของกรดตามช่วงของอุณหภูมิได้ 3 ช่วงคือ 1) ที่อุณหภูมิ 100-200 °C แสดงถึงกรดอ่อน (weak acid site) 2) ที่อุณหภูมิ 200-400 °C แสดงถึงกรดปานกลาง (medium acid site) และ 3) ที่อุณหภูมิ 400-600 °C แสดงถึงกรดแก่ (strong acid site) [16] และพื้นที่ใต้กราฟ  $\text{NH}_3$ -TPD profile จะแสดงปริมาณความเป็นกรดทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมจะมีปริมาณความเป็นกรดและปริมาณกรดแก่มากที่สุด แต่เมื่อทำการปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมแล้วพบว่าปริมาณความเป็นกรดจะลดลงจาก 17.95 เป็น 2.01 mmol  $\text{NH}_3/\text{g.cat}$  ตามปริมาณโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นจนถึงที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณโพแทสเซียมที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y นั้นถูกทำลาย ซึ่งสามารถเรียงลำดับปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y จากมากไปน้อยได้ดังนี้ HY100 zeolite > 2%K/HY100 zeolite > 4%K/HY100 zeolite > 8%K/HY100 zeolite > 6%K/HY100 zeolite นอกจากนี้พบว่าความเป็นกรดปานกลางและกรดแก่ (medium-strong acidic site) ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y หายไปเมื่อทำการปรับปรุงด้วยโพแทสเซียม สามารถสรุปได้ว่าการเติมโพแทสเซียมไม่เพียงลดปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แต่ยังสามารถปรับปรุงความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย

#### 4.1.1.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเบสด้วยเทคนิคการคายซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ -TPD)

คุณสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคายซับของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ -TPD) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิการคายซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 250 °C แสดงถึงความเป็นเบสอ่อน (weak basic site) บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำการเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจาก 2, 4 และ 6

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ จะทำให้พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มีค่าเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.3 แต่เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่เติมโพแทสเซียมในอัตราส่วน 8 wt.% พบว่ามีความเป็นเบสที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณโพแทสเซียมที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ถูกทำลาย ซึ่งสามารถเรียงลำดับปริมาณความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y จากน้อยไปมากได้ดังนี้ HY100 zeolite < 2%K/HY100 zeolite < 4%K/HY100 zeolite < 8%K/HY100 zeolite < 6%K/HY100 zeolite



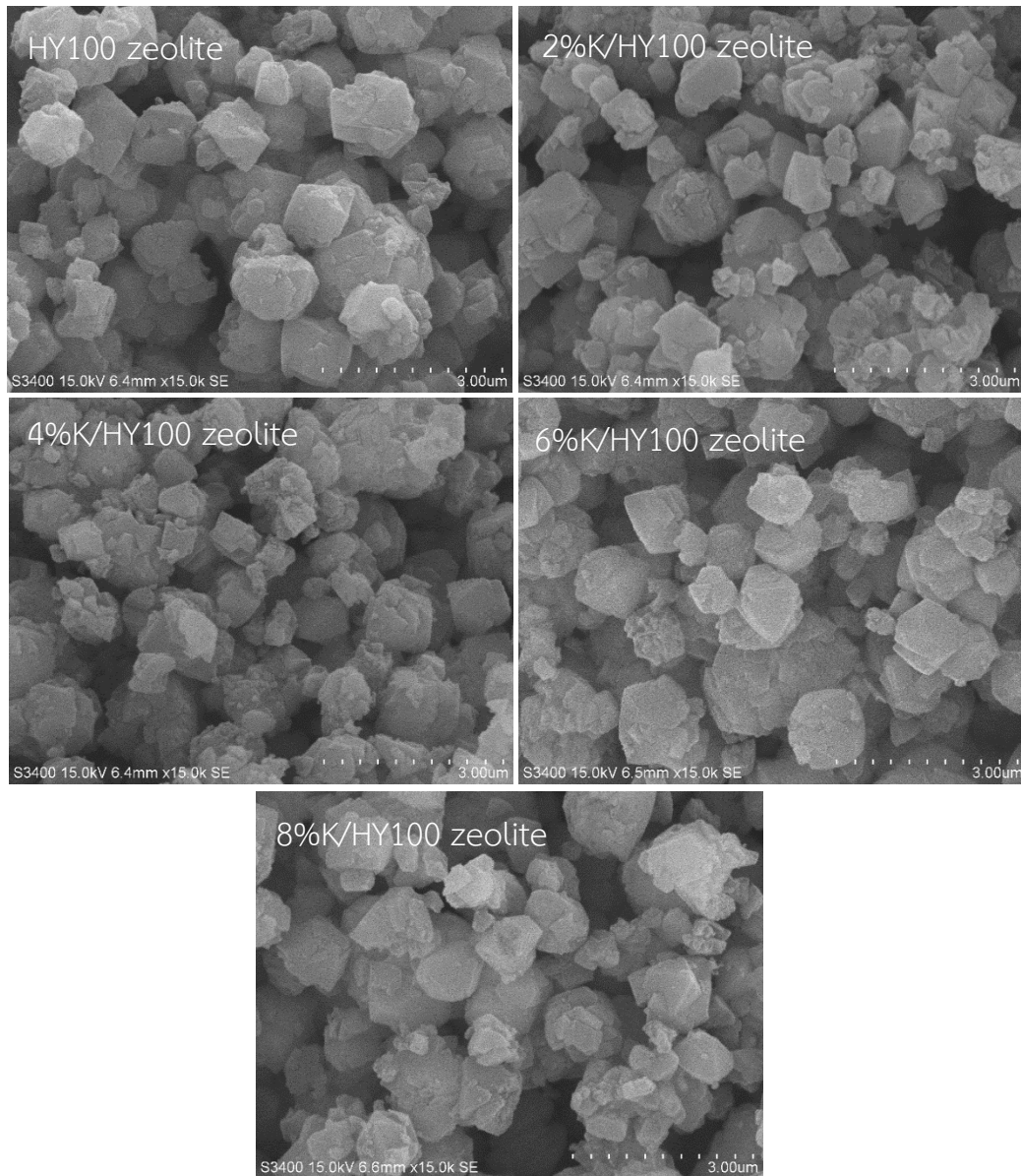
รูปที่ 4.4 แสดง CO<sub>2</sub>-TPD profile ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.3 แสดงความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Catalysts	Total basicity ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{g.cat}$ )
HY100 zeolite	0.01
2%K/HY100 zeolite	3.97
4%K/HY100 zeolite	4.81
6%K/HY100 zeolite	5.18
8%K/HY100 zeolite	5.14

#### 4.1.1.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM-EDX)

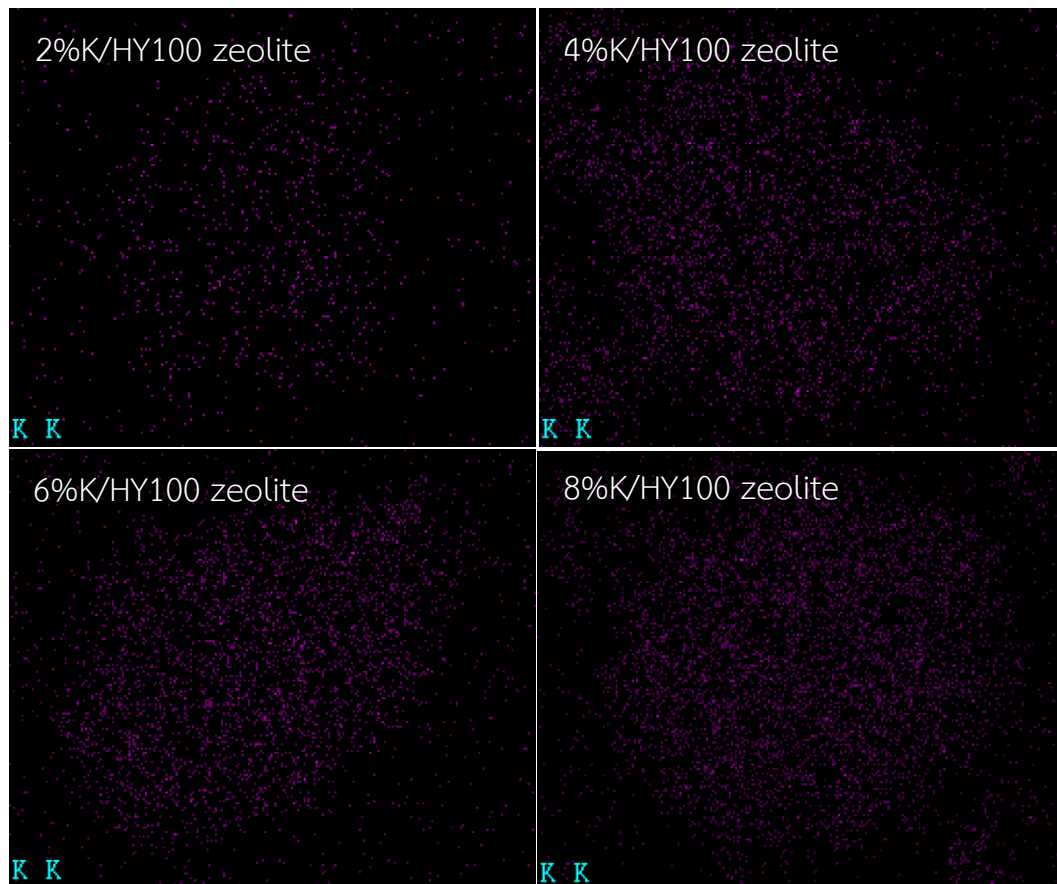
ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM-EDX) แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ทุกตัวมีลักษณะสัณฐานวิทยาคล้ายกันและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างแคบ แสดงให้เห็นว่าการเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y จะไม่ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y

องค์ประกอบของธาตุและการกระจายตัวของโพแทสเซียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อทำการเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y โพแทสเซียมสามารถกระจายตัวได้ดีบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y และจากตารางที่ 4.1 พบปริมาณโพแทสเซียมบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่าสามารถเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ได้ แต่ในขณะเดียวกันพบว่าปริมาณโพแทสเซียมที่วิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค EDX นั้นมีค่ามากกว่าปริมาณที่เติมลงไป เนื่องจากค่าที่วิเคราะห์จาก EDX เป็นปริมาณธาตุที่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้นไม่ใช่องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวของโพแทสเซียมบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์Y ที่

อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

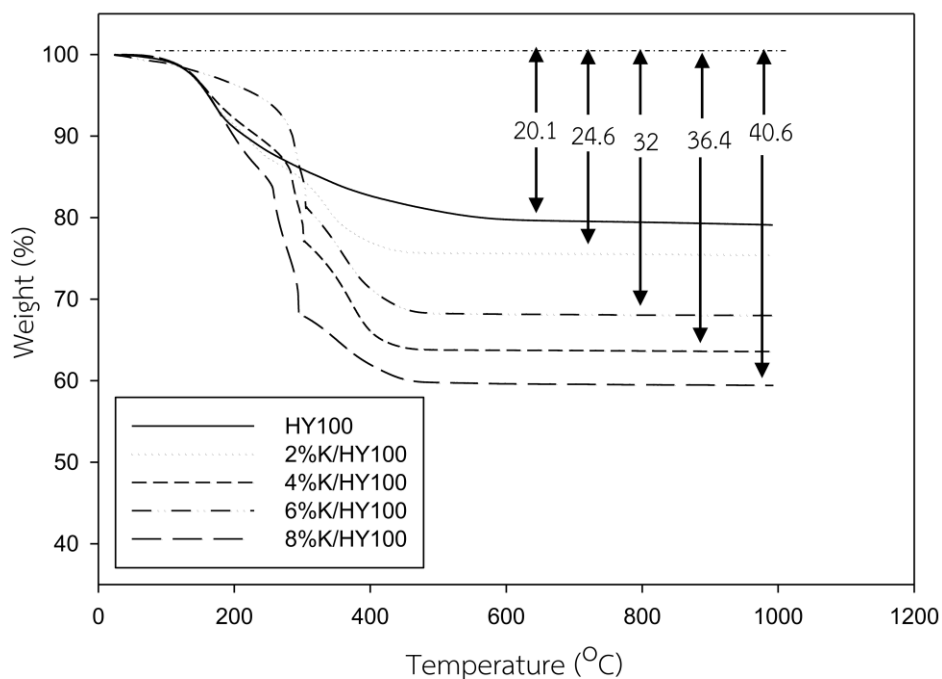


ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Catalysts	Percent by weight (wt.%)			
	O	Al	Si	K
HY100 zeolite	42.20	1.26	56.54	0
2%K/HY100 zeolite	47.02	1.17	49.40	2.41
4%K/HY100 zeolite	43.46	1.13	51.07	4.34
6%K/HY100 zeolite	46.95	1.18	45.55	6.32
8%K/HY100 zeolite	44.99	0.96	46.29	7.76

#### 4.1.1.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคทางอุณหภูมิจึง (Thermal analysis)

คุณสมบัติทางความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางอุณหภูมิจึง (Thermal analysis) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แสดงน้ำหนักที่หายไปของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมหลังจากใช้เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

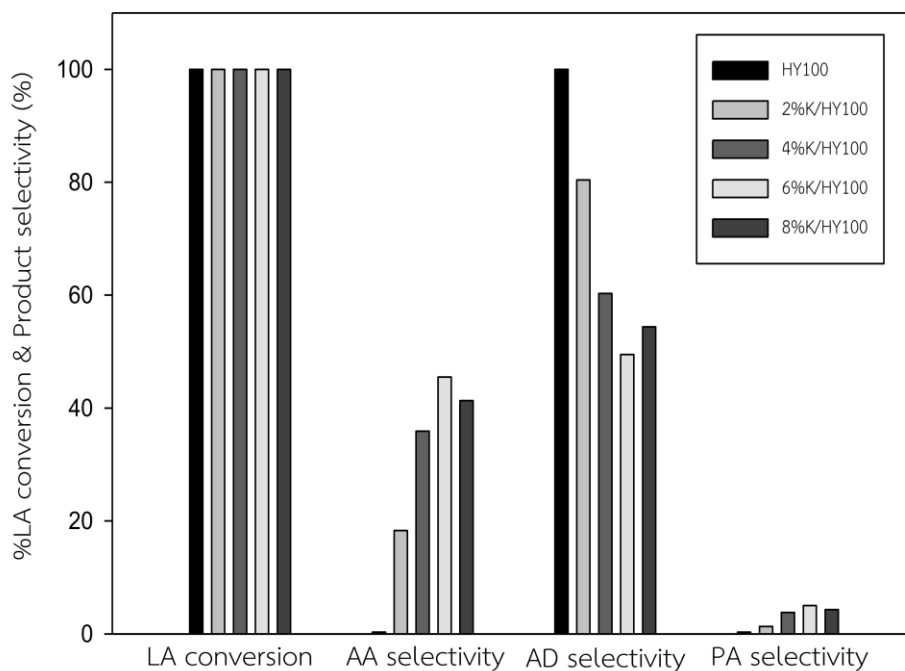
จากรูปที่ 4.7 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัว (Weight loss temperature) ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มี 2 ช่วงอุณหภูมิ คือประมาณ 160 °C และ 320 °C โดยการหายไปของน้ำหนักที่อุณหภูมิ 160 °C แสดงถึงการระเหยของน้ำ ในขณะที่การหายไปของน้ำหนักที่อุณหภูมิ 320 °C เนื่องจากเกิดการสะสมของคาร์บอน (coke deposit) [17] และเมื่อเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่อัตราส่วนเพิ่มขึ้น พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวลดลง และมีปริมาณการหายไปของน้ำหนักที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติมโพแทสเซียมทำให้เกิดการสะสมของคาร์บอน (coke deposit) บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่ถูกทำลายและปริมาณความเป็นกรดที่มากขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y

#### 4.1.2 วิเคราะห์ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดแลคติกเป็นกรดอะคริลิก (Lactic acid dehydration reaction) ถูกวัดโดยเริ่มจากนำตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Fixed-bed reactor แล้วทำการให้ความร้อนก่อนเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 40 mL/min ที่ความดันบรรยากาศ จากนั้นทำการป้อนสารละลายกรดแลคติกความเข้มข้น 34% โดยปริมาตร เข้าสู่เครื่องระเหย (Vaporizer) ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1 mL/hr เพื่อเปลี่ยนสถานะของกรดแลคติกจากของเหลวให้กลายเป็นไอ และจะถูกพาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยแก๊สไนโตรเจน และสุดท้ายสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกเก็บและนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี โดยใช้ DB-WAX capillary column และ FID detector

ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาถูกแสดงด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นและการเลือกเกิดของสารผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวมีค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดแลคติก (lactic acid conversion) เป็น 100 เปอร์เซ็นต์และมีค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิก (acrylic acid selectivity) ตั้งแต่ 0 – 45.5 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่เติมโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิกสูงที่สุดที่ 45.5 เปอร์เซ็นต์ และจากรูปที่ 4.8-4.11 พบว่าเมื่อเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วน 2 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าการ

เลือกเกิดของกรดอะคริลิก และกรดโพรพิโอนิกมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการเลือกเกิดของอะซีตอลดีไฮด์มีค่าลดลง เนื่องจากโพแทสเซียมสามารถปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นกรดและเบสให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ได้ จากการลดลงของความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ทำให้ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันที่เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงที่ทำให้เกิดอะซีตอลดีไฮด์มีค่าลดลงจาก 100 เป็น 49.5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มขึ้นของความเป็นเบสทำให้ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และปฏิกิริยารีดักชัน ของกรดแลคติก (Dehydration and Reduction reaction) มีค่าเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าการเลือกเกิดของอะซีตอลดีไฮด์ (Acetaldehyde) มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิก (Acrylic acid) มีค่าลดลง เนื่องมาจากการสะสมของคาร์บอนที่มาก และปริมาณความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้นจากโครงสร้างผลึกที่ถูกทำลาย ทำให้ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันเกิดมากขึ้น และปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเกิดลดลง

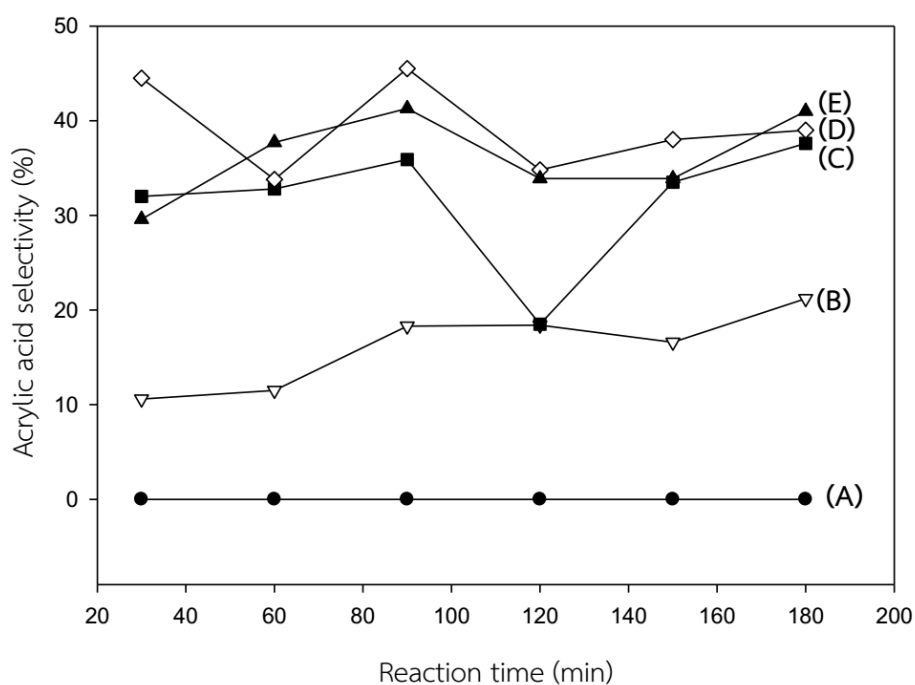


รูปที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นและการเลือกเกิดของสารผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมเมื่อใช้เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 °C เป็นเวลา 90 นาที

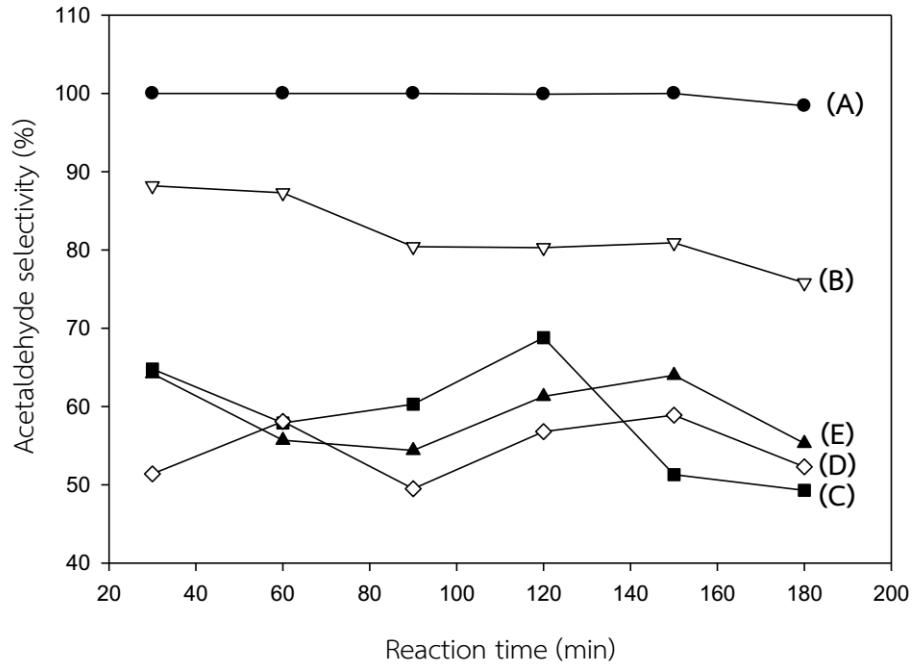
ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วย โพลแทสเซียมที่อัตราส่วน 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Catalysts	Lactic acid Conversion (%)	Product Selectivity <sup>a</sup> (%)		
		AA	AD	PA
HY100 zeolite	100	0.0	100	0.0
2%K/HY100 zeolite	100	18.3	80.4	1.3
4%K/HY100 zeolite	100	35.9	60.3	3.8
6%K/HY100 zeolite	100	45.5	49.5	5.0
8%K/HY100 zeolite	100	41.3	54.4	4.3

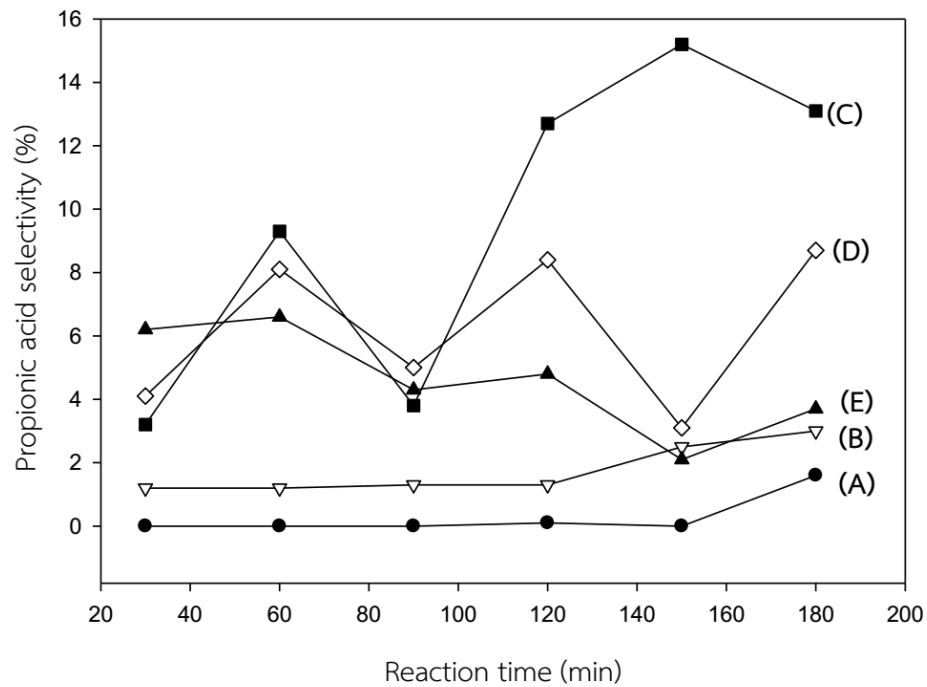
<sup>a</sup> AA-Acrylic acid, AD-acetaldehyde, PA-propionic acid. Reaction time 90 min, T=340°C



รูปที่ 4.9 ค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิกบนตัวเร่งปฏิกิริยา (A) HY100, (B) 2%K/HY100 zeolite, (C) 4%K/HY100 zeolite, (D) 6%K/HY100 zeolite และ (E) 8%K/HY100 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C



รูปที่ 4.10 ค่าการเลือกเกิดของอะซีทอลดีไฮด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา (A) HY100, (B) 2%K/HY100 zeolite, (C) 4%K/HY100 zeolite, (D) 6%K/HY100 zeolite และ (E) 8%K/HY100 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C



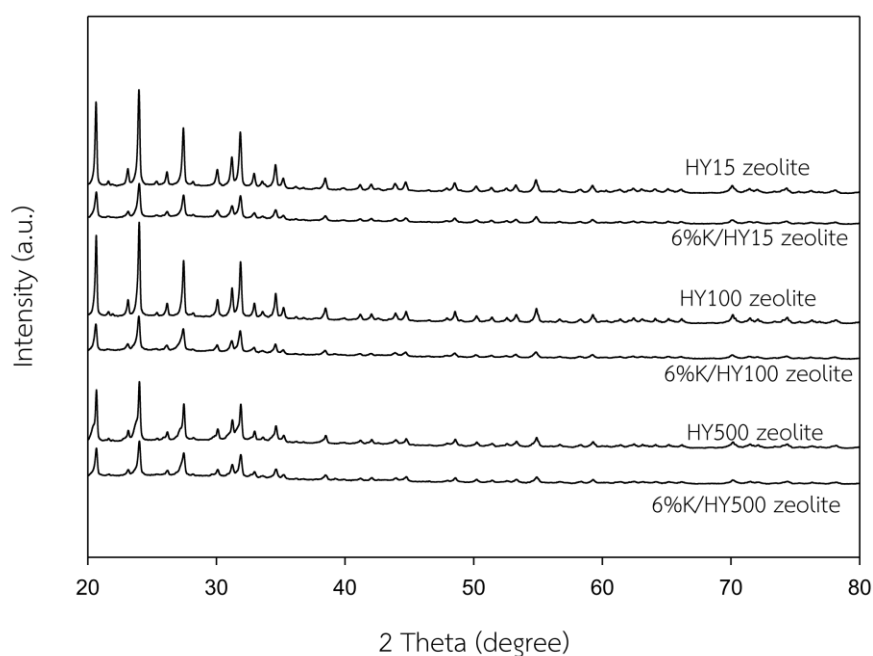
รูปที่ 4.11 ค่าการเลือกเกิดของกรดโพรพิโอนิกบนตัวเร่งปฏิกิริยา (A) HY100, (B) 2%K/HY100 zeolite, (C) 4%K/HY100 zeolite, (D) 6%K/HY100 zeolite และ (E) 8%K/HY100 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C

## 4.2 ผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y

### 4.2.1 วิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.2.1.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

กราฟการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกัน และถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (XRD)



รูปที่ 4.12 แสดงการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.12 แสดงการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกัน และถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะพบพีคเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีมุม 2 theta เท่ากับ 20.3°, 23.7°, 27.0°, 31.8°, 34.2°, 38.4° และ 54.6° แสดงถึง โครงสร้างพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y (zeolite faujasite) [13] แต่เมื่อทำการเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าความเข้มของพีคมีค่าลดลง แสดงถึงโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกา

ต่ออะลูมินาที่แตกต่างกัน (Si/Al=15, 100 และ 500) ถูกทำลายเมื่อทำการเติมโพแทสเซียม [14] และจากรูปที่ 4.12 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ทุกอัตราส่วนที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะไม่พบพีกเอกลักษณ์ของโพแทสเซียม แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีของโพแทสเซียมบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y

#### 4.2.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน

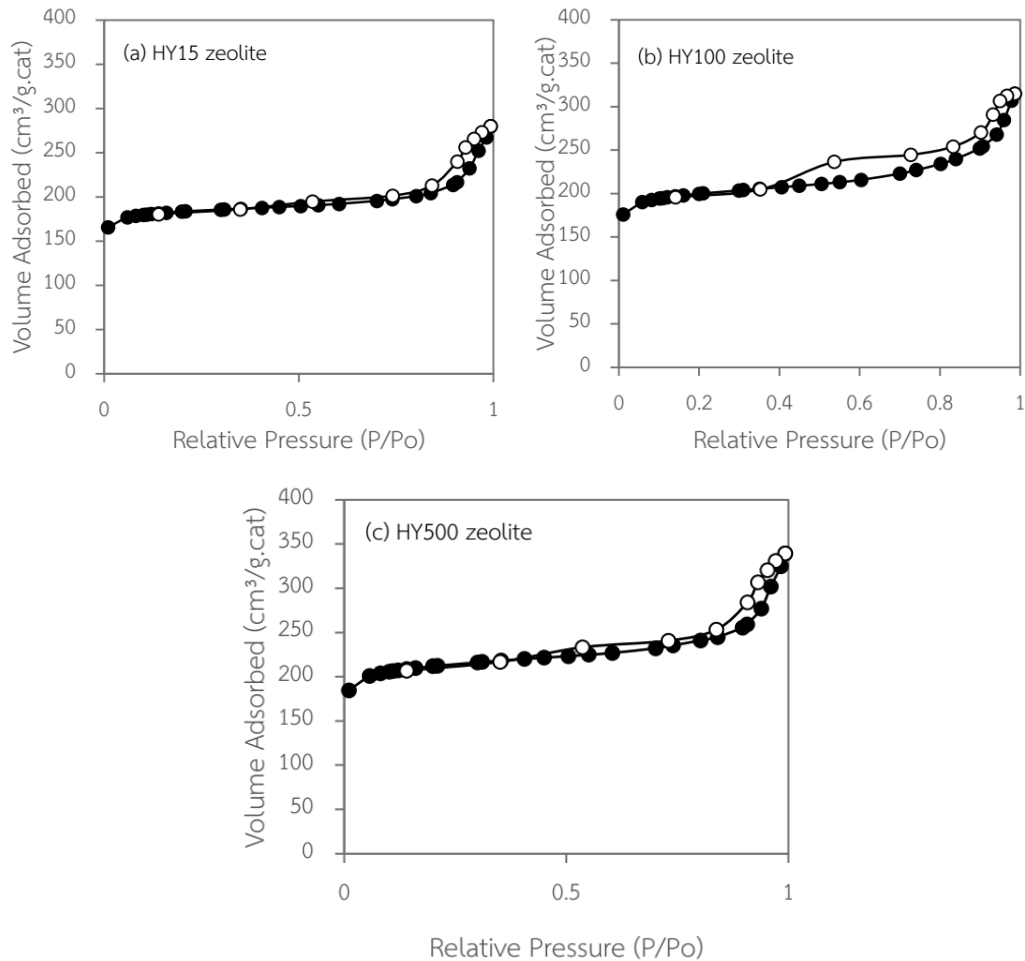
ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ซึ่งคำนวณโดยใช้วิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) method และ Barret-Joyner-Halenda (BJH) method โดยพื้นที่ผิว (BET surface area) ปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) และขนาดของรูพรุน (Pore size) ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียม แสดงได้ดังตารางที่ 4.6 พบว่า BET surface area และ pore volume ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่เพิ่มขึ้น แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีค่าลดลง เนื่องจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเติมเต็มไปด้วยโพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide) [8] ในขณะที่ pore size ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมมีค่ามากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ถูกทำลาย

**ตารางที่ 4.6** แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Catalysts	BET surface area (m <sup>2</sup> /g)	Pore volume <sup>a</sup> (cm <sup>3</sup> /g)	Pore size <sup>a</sup> (nm)
HY15 zeolite	617	0.19	9.4
HY100 zeolite	675	0.26	6.1
HY500 zeolite	717	0.26	7.5
6%K/HY15 zeolite	526	0.16	8.9
6%K/HY100 zeolite	527	0.23	6.9
6%K/HY500 zeolite	528	0.22	8.9

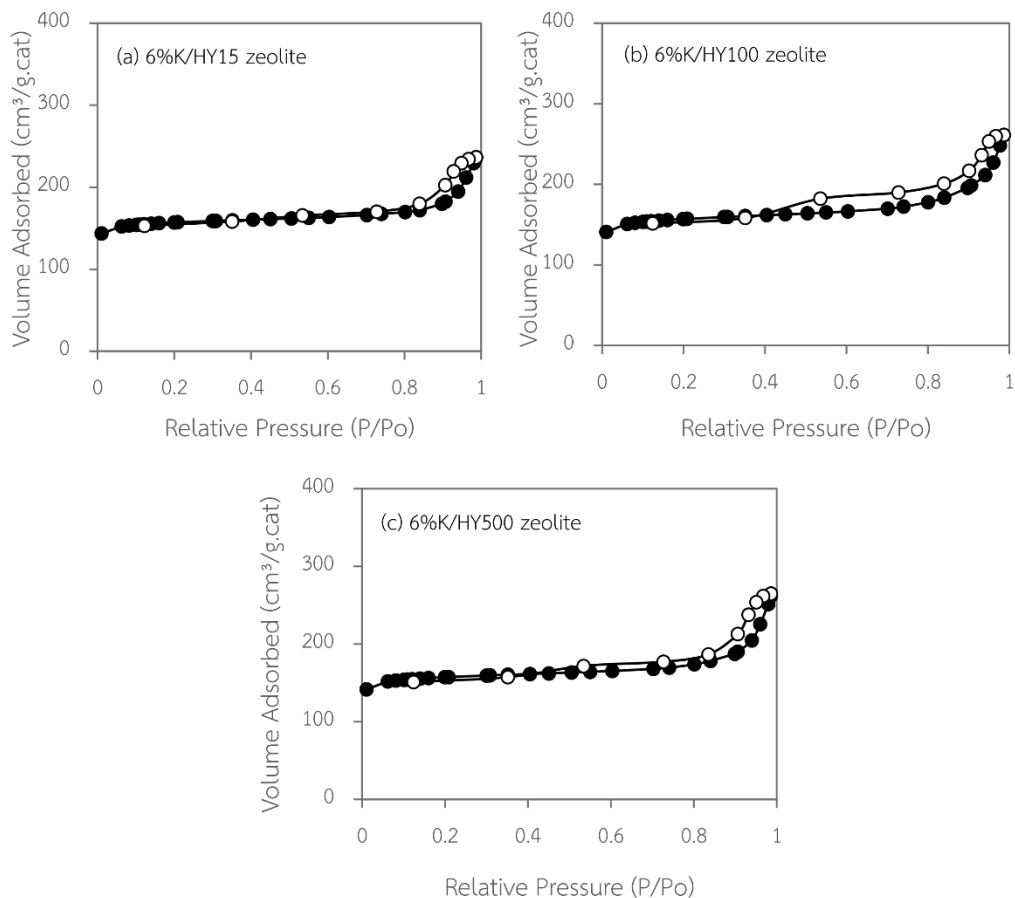
<sup>a</sup> คำนวณโดยใช้วิธี Barret-Joyner-Halenda (BJH) desorption method

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าลักษณะของ nitrogen adsorption-desorption isotherm ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่มีอัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ มีลักษณะเป็นแบบที่ 4 (type IV isotherm) โดยมีลักษณะเป็นฮิสเทอริซิสลูป (Hysteresis loop) ที่แสดงถึงขนาดโครงสร้างรูพรุนที่เป็นแบบ mesopore [15]



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะการดูดซับ-คายซับของไนโตรเจนไอโซเทอมของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกัน

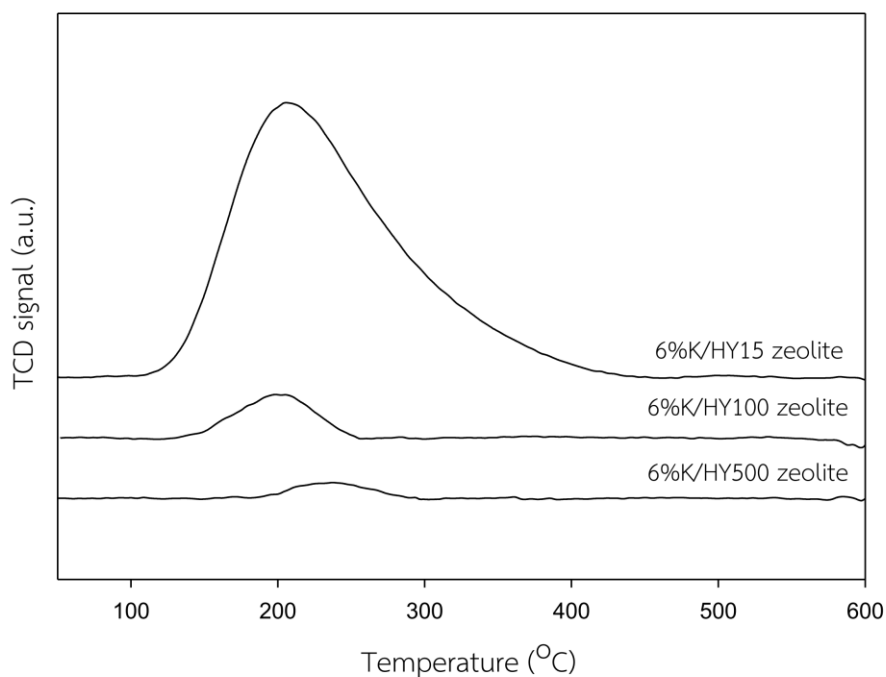




รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะการดูดซับ-คายซับของไนโตรเจนไอโซเทอมของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียม ที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.2.1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นกรดด้วยเทคนิคการคายซับของแก๊สแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>-TPD)

คุณสมบัติความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคายซับของแก๊สแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>-TPD) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.15 แสดง NH<sub>3</sub>-TPD profile ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.7 แสดงความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Catalysts	Total acidity (mmol NH <sub>3</sub> /g.cat)
6%K/HY15 zeolite	25.9
6%K/HY100 zeolite	2.01
6%K/HY500 zeolite	0.75

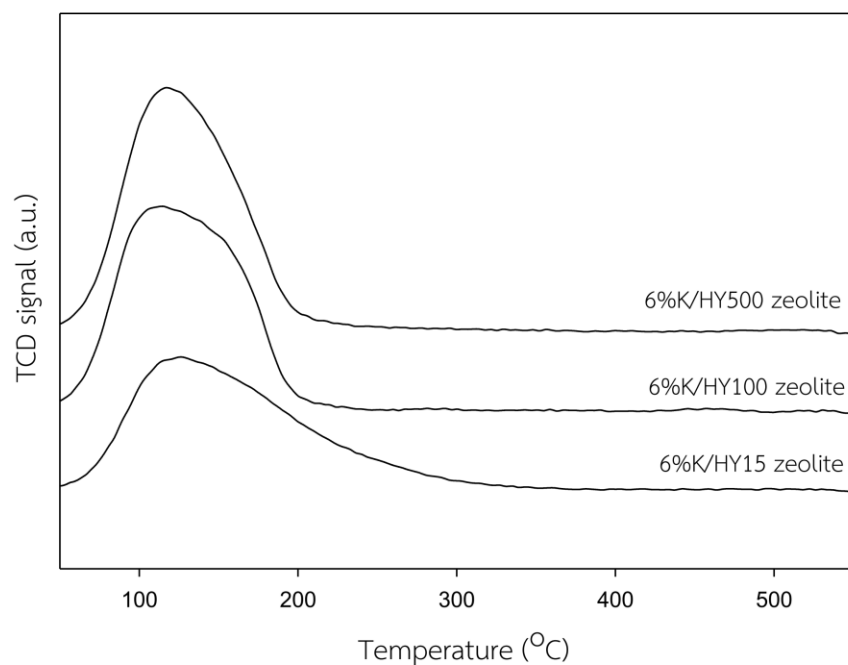
จากรูปที่ 4.15 แสดง NH<sub>3</sub>-TPD profile ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจะสามารถแบ่งความแรงของกรดตามช่วงของอุณหภูมิได้ 3 ช่วงคือ 1) ที่อุณหภูมิ 100-200 °C แสดงถึงกรดอ่อน (weak acid site) 2) ที่อุณหภูมิ 200-400 °C แสดงถึงกรดปานกลาง (medium acid site) และ 3) ที่อุณหภูมิ 400-600 °C แสดงถึงกรดแก่ (strong acid site) [16] และพื้นที่ใต้กราฟ NH<sub>3</sub>-TPD profile จะแสดงปริมาณความเป็นกรดทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.7 พบว่าตัวเร่ง

ปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่ 15 จะมีปริมาณความเป็นกรดและปริมาณกรดแก่มากที่สุด แต่เมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเพิ่มขึ้นพบว่าปริมาณความเป็นกรดจะลดลงจาก 25.9 เป็น 0.75 mmol NH<sub>3</sub>/g.cat เนื่องจากปริมาณอะลูมินาในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y สอดคล้องกับปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินามีค่าเพิ่มขึ้น หรือปริมาณอะลูมินามีค่าลดลง คุณสมบัติความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีค่าลดลง ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งสามารถเรียงลำดับปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y จากมากไปน้อยได้ดังนี้ 6%K/HY15 zeolite > 6%K/HY100 zeolite > 6%K/HY500 zeolite

#### 4.2.1.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเบสด้วยเทคนิคการคายซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>-TPD)

คุณสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคายซับของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>-TPD) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.8

จากรูปที่ 4.16 พบว่าอุณหภูมิการคายซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 250 °C แสดงถึงความเป็นเบสอ่อน (weak basic site) บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเพิ่มขึ้นจาก 15, 100 และ 500 ตามลำดับ จะทำให้พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มีค่าเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.8 เนื่องจากโพแทสเซียมสามารถเกิดรูปแบบ metal-aluminosilicate กับอะลูมิเนียมอะตอมได้ เมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินามีค่าเพิ่มมากขึ้น หรือปริมาณ Al ลดลง ทำให้โพแทสเซียมสามารถเกิดรูปแบบ metal-aluminosilicate กับอะลูมิเนียมอะตอมได้น้อยลง ทำให้เหลือปริมาณโพแทสเซียมมากขึ้น ความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถเรียงลำดับปริมาณความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y จากน้อยไปมากได้ดังนี้ 6%K/HY15 zeolite < 6%K/HY100 zeolite < 6%K/HY500 zeolite



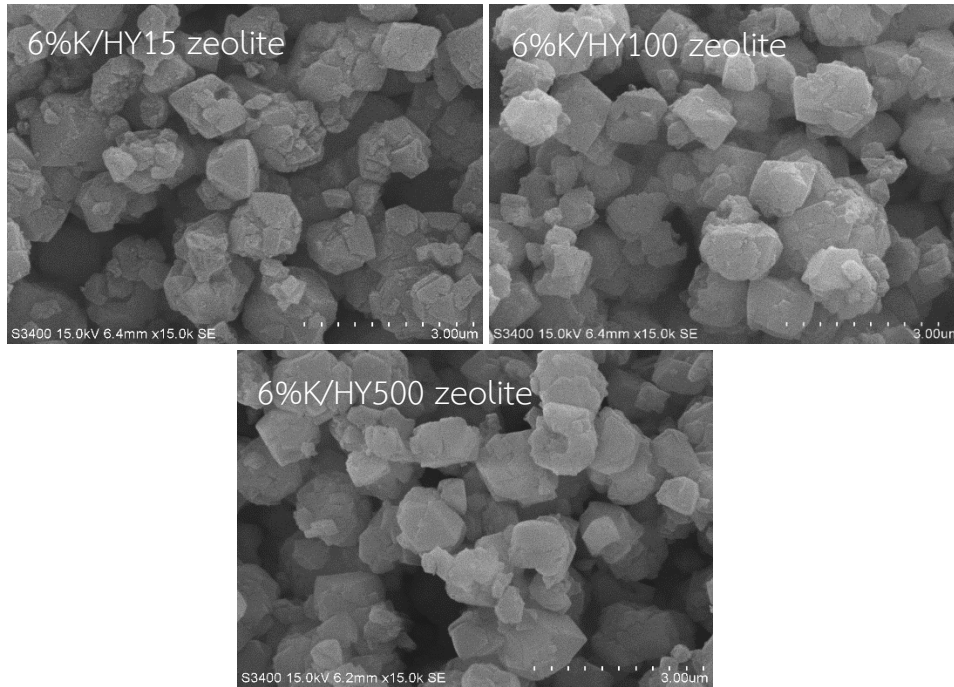
รูปที่ 4.16 แสดง CO<sub>2</sub>-TPD profile ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.8 แสดงความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Catalysts	Total basicity ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{g.cat}$ )
6%K/HY15 zeolite	4.13
6%K/HY100 zeolite	5.18
6%K/HY500 zeolite	5.23

#### 4.2.1.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่โครสโคป (SEM-EDX)

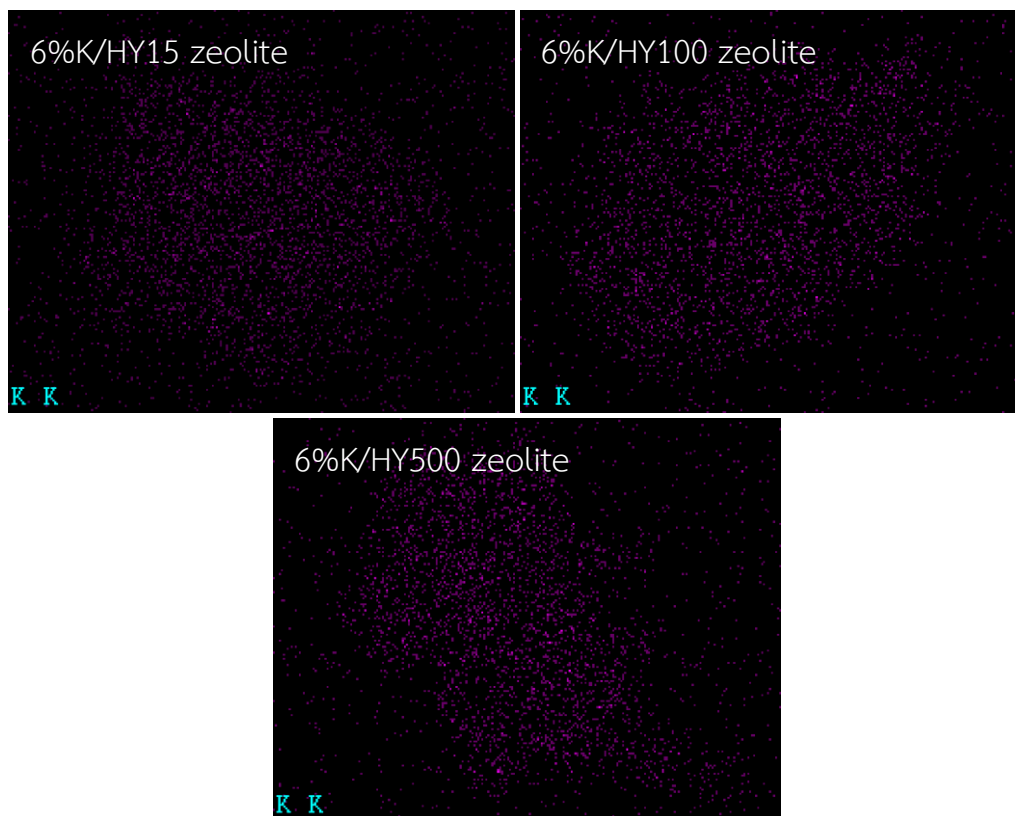
ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่โครสโคป (SEM-EDX) แสดงดังรูปที่ 4.17



**รูปที่ 4.17** แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.17 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันทุกตัวมีลักษณะสัณฐานวิทยาค้ำยกันและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างแคบ แสดงให้เห็นว่าการเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันจะไม่ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y

องค์ประกอบของธาตุและการกระจายตัวของโพแทสเซียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX จากรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อทำการเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y โพแทสเซียมสามารถกระจายตัวได้ดีบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกัน และจากตารางที่ 4.9 พบปริมาณโพแทสเซียมบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่าสามารถเติมโพแทสเซียมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ได้ แต่ในขณะเดียวกันพบว่าปริมาณโพแทสเซียมที่วิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค EDX นั้นมีค่ามากกว่าปริมาณที่เติมลงไป เนื่องจากค่าที่วิเคราะห์จาก EDX เป็นปริมาณธาตุที่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้นไม่ใช่องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยา



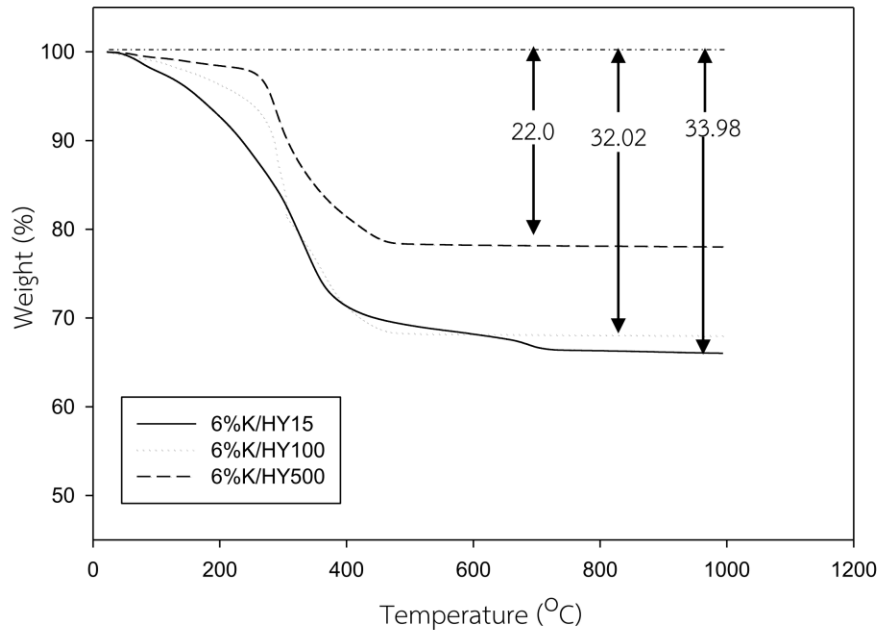
รูปที่ 4.18 แสดงการกระจายตัวของโพแทสเซียมบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.9 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Catalysts	Percent by weight (wt.%)			
	O	Al	Si	K
6%K/HY15 zeolite	45.29	6.22	42.16	6.34
6%K/HY100 zeolite	46.95	1.18	45.55	6.32
6%K/HY500 zeolite	43.67	0.18	49.17	6.97

#### 4.2.1.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคทางอุณหภูมิตัว (Thermal analysis)

คุณสมบัติทางความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางอุณหภูมิตัว (Thermal analysis) ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงน้ำหนักที่หายไปของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมหลังจากใช้เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

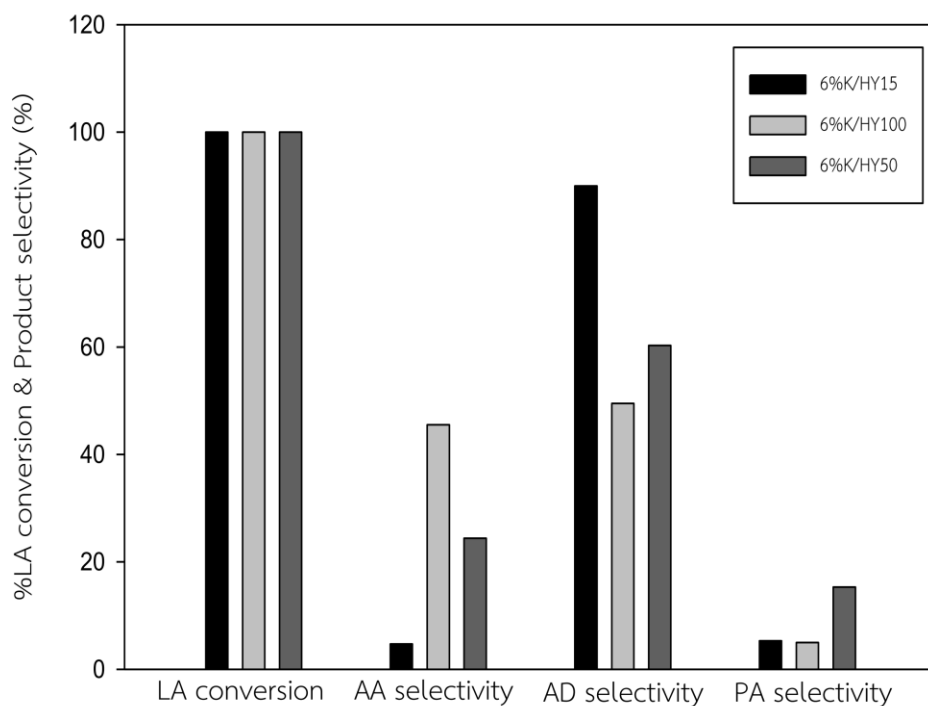
จากรูปที่ 4.19 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัว (Weight loss temperature) ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มี 2 ช่วงอุณหภูมิ คือประมาณ 140 °C และ 330 °C โดยการหายไปของน้ำหนักที่อุณหภูมิ 140 °C แสดงถึงการระเหยของน้ำ ในขณะที่การหายไปของน้ำหนักที่อุณหภูมิ 330 °C เนื่องจากเกิดการสะสมของคาร์บอน (coke deposit) [17] และเมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาลดลง พบว่ามีปริมาณการหายไปของน้ำหนักที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาน้อยๆ จะทำให้เกิดการสะสมของคาร์บอน (coke deposit) บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y มากขึ้น เนื่องจากปริมาณความเป็นกรดที่มากขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y

#### 4.1.2 วิเคราะห์ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาถูกแสดงด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นและการเลือกเกิดของสารผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.20-4.23 และตารางที่ 4.10

จากรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.10 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวมีค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดแลคติก (lactic acid conversion) เป็น 100 เปอร์เซ็นต์และมีค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิก (acrylic acid selectivity) ตั้งแต่ 4.7– 45.5 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่เติมโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิกสูงที่สุดที่ 45.5 เปอร์เซ็นต์ และจากรูปที่ 4.20-4.23 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 100 จะทำให้ค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการเลือกเกิดของอะซิโตนไฮไดรตมีค่าลดลง เนื่องจากการลดลงของความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ทำให้ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงที่ทำให้เกิดอะซิโตนไฮไดรตมีค่าลดลงจาก 90 เป็น 49.5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มขึ้นของความเป็นเบสทำให้ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และปฏิกิริยารีดักชัน ของกรดแลคติกมีค่าเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเพิ่มขึ้นเป็น 500 จะทำให้ค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิกลดลง ในขณะที่ค่าการเลือกเกิดของอะซิโตนไฮไดรตและกรดโพรพิโอนิกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากความเป็นเบสที่มากเกินไปทำให้ปฏิกิริยารีดักชันเกิดมากขึ้น จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่น้อยเกินไป จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีคุณสมบัติกรดที่มากเกินไป และในขณะที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินามากเกินไป จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีคุณสมบัติเบสที่มากเกินไป ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะนำมาใช้ในปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดอะคริลิกควรมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความเป็นกรดและเบสที่พอเหมาะในการเร่งปฏิกิริยา



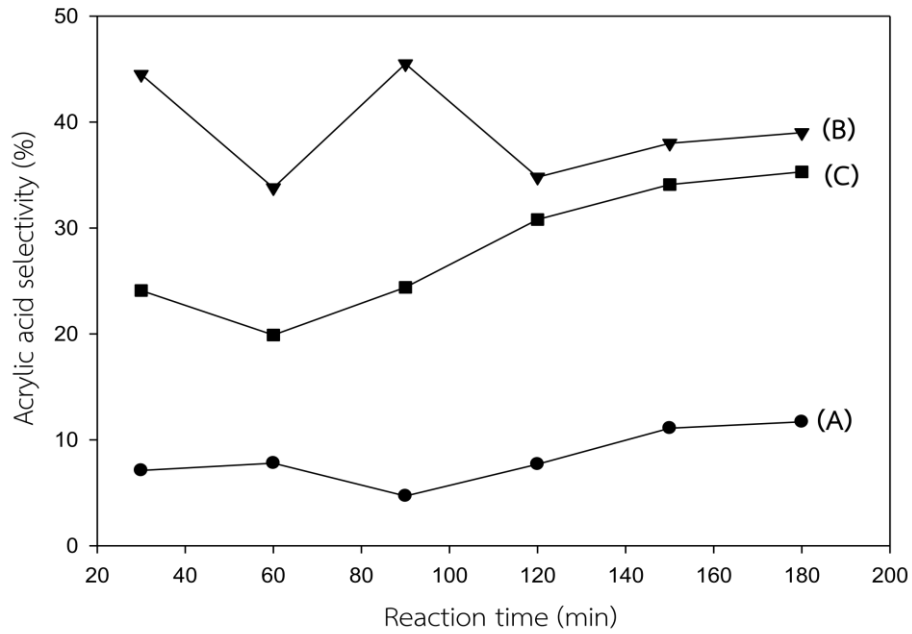


รูปที่ 4.20 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นและการเลือกเกิดของสารผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่มีอัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 °C เป็นเวลา 90 นาที

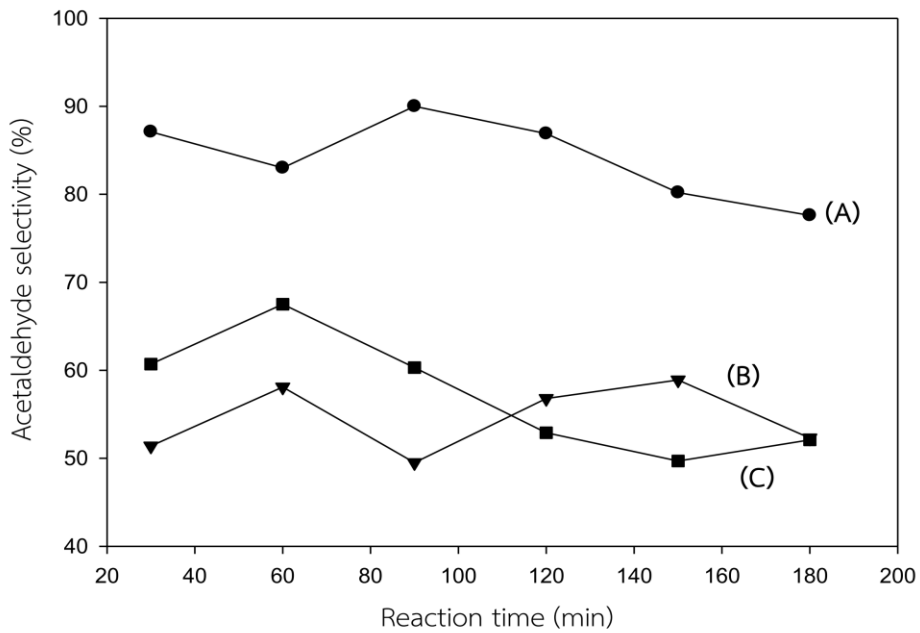
ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกันและถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่มีอัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Catalysts	Lactic acid Conversion (%)	Product Selectivity <sup>a</sup> (%)		
		AA	AD	PA
6%K/HY15 zeolite	100	4.7	90.0	5.3
6%K/HY100 zeolite	100	45.5	49.5	5.0
6%K/HY500 zeolite	100	24.4	60.3	15.3

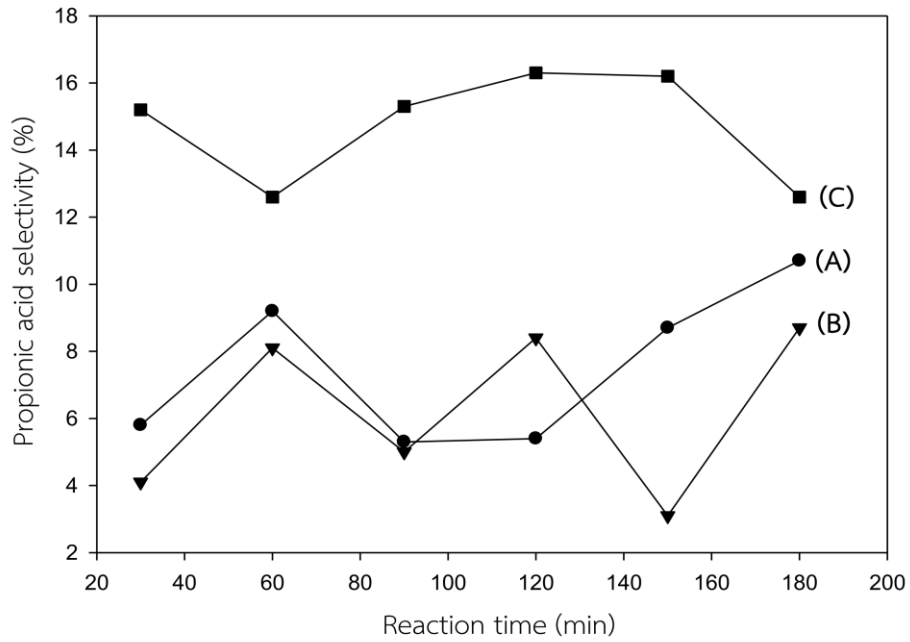
<sup>a</sup> AA-Acrylic acid, AD-acetaldehyde, PA-propionic acid. Reaction time 90 min, T=340°C



รูปที่ 4.21 ค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิกบนตัวเร่งปฏิกิริยา (A) 6%K/HY15 zeolite, (B) 6%K/HY100 zeolite และ (C) 6%K/HY500 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C



รูปที่ 4.22 ค่าการเลือกเกิดของอะซีทัลดีไฮด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา (A) 6%K/HY15 zeolite, (B) 6%K/HY100 zeolite และ (C) 6%K/HY500 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C



รูปที่ 4.23 ค่าการเลือกเกิดของกรดโพรพิโอนิกบนตัวเร่งปฏิกิริยา (A) 6%K/HY15 zeolite, (B) 6%K/HY100 zeolite และ (C) 6%K/HY500 zeolite ที่อุณหภูมิ 340 °C

## 5. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมโพแทสเซียมในปริมาณที่แตกต่างกันลงบนซีโอไลต์ Y ที่อัตราส่วน 0, 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ถูกเตรียมโดยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา (15, 100 และ 500) ของซีโอไลต์ Y ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดถูกทดสอบในปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติกที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันบรรยากาศ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเติมโพแทสเซียมลงบนซีโอไลต์ Y สามารถปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นกรดและเพิ่มความเป็นเบสให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ได้ ส่งผลทำให้สามารถเพิ่มการเกิดกรดอะคริลิก และลดการเกิดอะซิโตนไดไฮดริสได้ แต่ถ้าเติมในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ถูกทำลายส่งผลให้ความเป็นกรดเพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดกรดอะคริลิกลดลงและเพิ่มการเกิดอะซิโตนไดไฮดริส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่เติมโพแทสเซียมที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ค่าการเลือกเกิดของกรดอะคริลิกสูงสุดที่ 45.5 เปอร์เซ็นต์
2. อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่น้อยเกินไป จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีคุณสมบัติกรดที่มากเกินไป ส่งผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นอะซิโตนไดไฮดริส และในขณะที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่มากเกินไป เมื่อนำมาปรับปรุงด้วยโพแทสเซียม จะทำให้ความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ได้กรดอะคริลิกลดลงแต่ได้กรดโพพิโอนิกมากขึ้น โดยอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ 100 จะเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติก เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ 15 และ 500

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดแลคติกในระยะเวลาที่นานขึ้น
2. อุณหภูมิในกระบวนการแคลไซน์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา
3. ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ต่างกันมีผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา

## บรรณานุกรม

- [1] Lin, M.M. Selective oxidation of propane to acrylic acid with molecular oxygen. Applied Catalysis A: General 207(1) (2001): 1-16.
- [2] Boesel, L.F. and Reis, R.L. A review on the polymer properties of Hydrophilic, partially Degradable and Bioactive acrylic Cements (HDBC). Progress in Polymer Science 33(2) (2008): 180-190.
- [3] Bernkop-Schnürch, A. Thiomers: a new generation of mucoadhesive polymers. Advanced drug delivery reviews 57(11) (2005): 1569-1582.
- [4] Bettahar, M., Costentin, G., Savary, L., and Lavalley, J. On the partial oxidation of propane and propylene on mixed metal oxide catalysts. Applied Catalysis A: General 145(1) (1996): 1-48.
- [5] Culp, A., Holmes, K., Nagrath, R., and Nessenson, D. Propane to Acrylic Acid. (2013).
- [6] Sun, P., et al. Potassium modified NaY: A selective and durable catalyst for dehydration of lactic acid to acrylic acid. Catalysis Communications 10(9) (2009): 1345-1349.
- [7] Zhang, J., et al. Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>-modified NaY nanocrystallites: efficient catalyst for acrylic acid production through lactic acid dehydration. Catalysis Science & Technology 4(5) (2014): 1376.
- [8] Dusselier, M., Van Wouwe, P., Dewaele, A., Makshina, E., and Sels, B.F. Lactic acid as a platform chemical in the biobased economy: the role of chemocatalysis. Energy & Environmental Science 6(5) (2013): 1415.
- [9] Fan, Y., Zhou, C., and Zhu, X. Selective Catalysis of Lactic Acid to Produce Commodity Chemicals. Catalysis Reviews 51(3) (2009): 293-324.
- [10] Zhang, J., Zhao, Y., Pan, M., Feng, X., Ji, W., and Au, C.-T. Efficient Acrylic Acid Production through Bio Lactic Acid Dehydration over NaY Zeolite Modified by Alkali Phosphates. ACS Catalysis 1(1) (2011): 32-41.
- [11] Williams, B., Babitz, S., Miller, J., Snurr, R., and Kung, H. The roles of acid strength and pore diffusion in the enhanced cracking activity of steamed Y zeolites. Applied Catalysis A: General 177(2) (1999): 161-175.
- [12] Weitkamp, J. Zeolites and catalysis. Solid State Ionics 131(1) (2000): 175-188.

- [13] Echeandia, S., et al. Enhancement of phenol hydrodeoxygenation over Pd catalysts supported on mixed HY zeolite and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. An approach to O-removal from bio-oils. Fuel 117 (2014): 1061-1073.
- [14] Wong, K.M., Ramli, Z., and Nur, H. Effect of loaded alkali metals on the structural, basicity and catalytic activity of zeolite beta. Jurnal Teknologi 42(1) (2012): 43–55.
- [15] Storck, S., Bretinger, H., and Maier, W.F. Characterization of micro-and mesoporous solids by physisorption methods and pore-size analysis. Applied Catalysis A: General 174(1) (1998): 137-146.
- [16] Yan, J., Yu, D., Sun, P., and Huang, H. Alkaline Earth Metal Modified NaY for Lactic Acid Dehydration to Acrylic Acid: Effect of Basic Sites on the Catalytic Performance. Chinese Journal of Catalysis 32(3-4) (2011): 405-411.
- [17] Zhang, X., Lin, L., Zhang, T., Liu, H., and Zhang, X. Catalytic dehydration of lactic acid to acrylic acid over modified ZSM-5 catalysts. Chemical Engineering Journal 284 (2016): 934-941.

## ภาคผนวก

### Reprint ผลงานวิจัย

ผลของการเติมโพแทสเซียมต่อความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y (The effect of potassium addition on acidity of Y-zeolite catalysts), The Pure and Applied Chemistry International Conference 2017 (PACCON2017) "Green Convergence on Chemical Frontiers", Centra Government Complex Hotel & Convention Centre Bangkok, Thailand, February 2-3, 2017

## ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ผศ.ดร. สุพจน์ พัฒนะศรี  
(ภาษาอังกฤษ) Dr. Suphot Phatanasri

2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8

3. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10300

โทรศัพท์: 02-218-6890 โทรสาร: 02-218-6877 E-mail: s\_phatanasri@yahoo.com

4. ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัย	ปริญญา	สาขาวิชา	ปีที่ได้รับ พ.ศ.
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ปริญญาตรี	สาขาเคมี	2526
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ปริญญาโท	สาขาวิศวกรรมเคมี	2530
มหาวิทยาลัยเกียวโต	ปริญญาเอก	สาขาเคมีไฮโดรคาร์บอน	2535

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วิศวกรรมตัวเร่งปฏิกิริยา และวิศวกรรมเคมี

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย

6.1.1 การสังเคราะห์อะโรเมติกจากแก๊สปิโตรเลียมเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยา MFI ชนิดที่มีโลหะผสมอยู่ (ทุนวิจัย, สำนักงานสนับสนุนกองทุนวิจัย)



6.1.2 การแปรรูปเอทานอลที่ได้จากผลิตภัณฑ์ทางเกษตรไปเป็นเอทิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา MFI ชนิดดัดแปลง (ทุนวิจัย, สภาวิจัยแห่งชาติ)

## 6.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

6.2.1 Inui, T., Phatanasri, S., Matsuda, H. “Highly selective synthesis of ethene from methanol on a novel nickel-silicoaluminophosphate catalyst” (1990) Journal of the Chemical Society, Chemical Communications (3), pp. 205-206

6.2.2 Inoue, M., Dhupatemiya, P., Phatanasri, S., Tomoyuki Inui “Synthesis course of the Ni-SAPO-34 catalyst for methanol-to-olefin conversion” (1999) Microporous and Mesoporous Materials 28 (1), pp. 19-24

6.2.3 Phatanasri, S., Prasertdam, P., Sripusitto, A. “Aromatization of Light Paraffins over Ga-containing MFI-type Catalyst” (2000) Korean Journal of Chemical Engineering 17 (4), pp. 409-413

6.2.4 Prasertdam, P., Inoue, M., Mekasuvandumrong, O., Thanakulrangsarn, W., Phatanasri, S. “Effect of organic solvents on the thermal stability of porous silica-modified alumina powders prepared via one pot solvothermal synthesis” (2000) Inorganic Chemistry Communications 3 (11), pp. 671-676

6.2.5 Suphot P, Piyasan P, Thana P. “Influence of Fe or Zn Loading Metal on Toluene Methylation over MFI-Type Zeolite Catalysts”. (2000) Korean J. Chem.Eng. 17(4): 414-419.

6.2.6 Suphot P, Piyasan P, Sipira K, Somchai P. “Isomerization of n-Hexane over Platinum Ion-Exchanged Zeolite Beta”. (2000) React. Kinet. Catal. Lett. 71: 281-287.

6.2.7 Piyasan P, Suphot P, Jumpod M. “Activation of Pd-Ag Catalyst for Selective Hydrogenation of Acetylene via Nitrous Oxide Addition”. (2000) React. Kinet. Catal. Lett. 70(1): 125-131.

6.2.8 Piyasan P, Suphot P, Jumpod M. "Activation of Acetylene Selective Hydrogenation Catalysts Using Oxygen Containing Compounds". (2000) Catal. Today 63: 209-213.

6.2.9 Piyasan P, Suphot P, Jakrit R, Pornsawan K. "Effect of Pd on the Stability Improvement of Cu/H-MFI for NO Removal Under Hydrothermal Pretreatment Conditions". (2001) J. Mol. Catal. A 169: 113-126.

6.2.10 Petranovskii, V., Gurin, V., Bogdanchikova, N., Phatanasri, S., Praserthdam, P. "An effect of zeolite type upon properties of copper nanoparticles and clusters produced within them" (2002) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 4806, pp. 233-239

6.2.11 P. Praserthdam , B. Ngamsom, N. Bogdanchikova, S. Phatanasri, M. Pramothana. "Effect of pretreatment with oxygen and/or oxygen-containing compounds on the catalytic performance of Pd-Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for acetylene hydrogenation". Applied Catalysis A. 230 (2002). pp. 41-51.

6.2.12 Tonto, P., Mekasuwandumrong, O., Phatanasri, S., Pavarajarn, V., Praserthdam, P. "Preparation of ZnO nanorod by solvothermal reaction of zinc acetate in various alcohols" (2008) Ceramics International 34 (1), pp. 57-62

6.2.13 Chaemchuen, S., Phatanasri, S., Verpoort, F., Sae-Ma, N., Suriye, K. "The structure - Reactivity relationship for metathesis reaction between ethylene and 2-butene on WO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> catalysts calcinated at different temperatures" (2012) Kinetics and Catalysis 53 (2) , pp. 247-252

6.2.14 Chaemchuen, S., Limsangkass, W., Netiworaraksa, B., Phatanasri, S., Sae-Ma, N., Suriye, K. "Novel catalyst of mixed SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> supported tungsten for metathesis of ethene and 2-butene" (2012) Bulgarian Chemical Communications 44 (1) , pp. 87-91

6.2.15 Limsangkass, W.,Suriye, K., Praserthdam, P., Phatanasri, S.,Panpranot, J. “Effect of extra support on metathesis of ethylene and 2-butene over tungsten catalysts” (2012) CHISA 2012 - 20th International Congress of Chemical and Process Engineering and PRES 2012 - 15th Conference PRES

6.2.16 Limsangkass, W.,Phatanasri, S.,Praserthdam, P.,Panpranot, J.,Jareewatchara, W., Na Ayudhya, S.K., Suriye, K. “Effect of Nano-sized TiO<sub>2</sub> Additional Support in WO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> Catalyst Systems on Metathesis of Ethylene and Trans-2-Butene to Propylene” (2013) Catalysis Letters , pp. 1-7 Article in Press

6.2.17 Wimonrat Limsangkass, Piyasan Praserthdam, Suphot Phatanasri, Joongjai Panpranot, Narongrat Poovarawan, Wuttitthep Jareewatchara, Sirachaya Kunjara Na Ayudhya, Kongkiat Suriye “Comparative Effect of Nano-Sized ZrO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> Additional Supports in Silica-Supported Tungsten Catalysts on Performance in Metathesis of Ethylene and 2-Butene to Propylene” Catalysis Letters September 2014, Volume 144, Issue 9, pp 1524-1529

6.3 งานวิจัยที่กำลังทำ:

6.3.1 การผลิตโอเลฟินเบาจากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์สังเคราะห์

6.3.2 การผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์สังเคราะห์

6.3.3 การผลิตโพรพิลีนจากเอทิลีน และบิวทีนโดยปฏิกิริยาเมตาทีซิส (ภายใต้การสนับสนุนทุนวิจัยโดยบริษัท เอสซีจี เคมิคัล และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย)

## 7. กิจกรรมทางสังคม

อาจารย์ที่ปรึกษาชมรมพุทธศาสตร์และประเพณี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย