

ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU BEA และ MFI

ต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิก

Effect of FAU-, BEA- and MFI-type Zeolite Catalysts on the Catalytic Cracking of Acrylic

สุภาภรณ์ คางคำ*

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

แขวงหิรัญรูจี เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10600

สมโภช ภูพีระสุพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

วิทยาเขตอุเทนถวาย แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Supaporn Khangkham*

Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University,

Hiran Ruchi, Thonburi, Bangkok, 10600

Sompoch Pooperasupong

Division of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of

Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus, Patumwan, Patumwan, Bangkok, 10330

Somsak Damronglerd

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,

Wang Mai, Patumwan, Bangkok, 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU, BEA และ MFI ต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิก เพื่อนำกลับมาเป็นมอนอเมอร์หรือสารมีมูลค่าโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ ความดันสูงแบบแบตช์ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจน ผลการศึกษพบว่า การแตกตัวของอะคริลิกเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 300

องศาเซลเซียส เมื่อมีการใช้ซีโอไลต์ร่วมด้วย ซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิด สามารถแสดงสมบัติความเป็นกรดที่แตกต่างกันตามรูปแบบการจัดเรียงโครงสร้างภายในของซีโอไลต์แต่ละชนิดแม้ว่าจะมีสัดส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาใกล้เคียงกันก็ตาม สภาพความเป็นกรดส่งผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ในรูปของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ในขณะที่องค์ประกอบที่พบในผลิตภัณฑ์ของเหลวมีความสัมพันธ์กับความจำเพาะเชิงโครงสร้างของซีโอไลต์ การศึกษาพบว่า ซีโอไลต์ชนิด FAU เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพมากที่สุดสำหรับการนำกลับคืนมอนอเมอร์หรือสารมีมูลค่า เช่น เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ เนื่องจากให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงถึงร้อยละ 83 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ซีโอไลต์ชนิด MFI ซึ่งมีสมบัติความเป็นกรดสูงนั้นให้ผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์ของแข็งสูงที่สุด งานวิจัยนี้สามารถนำกลับคืนมอนอเมอร์ประมาณร้อยละ 21-26 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้

คำสำคัญ : การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา; ซีโอไลต์; ตัวเร่งปฏิกิริยา; อะคริลิก

Abstract

The purpose of conducting research was to study the effect of heterogeneous catalyst, namely FAU-, BEA- and MFI-type zeolites on the catalytic cracking of acrylic to recover monomer or valuable substances using a high-pressure batch reactor under oxygen-free atmosphere. The results showed that the cracking of acrylic at a temperature of 300 °C could occur in the presence of zeolites. Acidity of three different types of zeolites seemed to vary dependently on framework structures, in spite of their quite equivalent $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios. The degree of zeolites acidity significantly influenced the product distribution in gaseous, liquid and solid form whilst the composition of the liquid fraction directly related to the shape selectivity of the zeolites. FAU type zeolite was found to be the most appropriate catalyst for recovery of monomer or valuable substances including methyl methacrylate monomer since it yielded highest liquid products up to 83 weight percentages whereas MFI type zeolite with high acidity was effective in producing gaseous and solid products. In this research, approximately 21 to 26 weight percentages of monomer could be recovered, depending on the zeolite used.

Keywords: catalytic cracking; zeolite; catalyst; acrylic

1. บทนำ

อะคริลิก (acrylic) เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งซึ่งสังเคราะห์มาจากอนุพันธ์ของกรดอะคริลิก (acrylic acid) อยู่ในรูปของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethylmethacrylate) มีสมบัติที่โดดเด่นในด้านความแข็งแรง ความคงทนต่อสภาพภูมิอากาศ ความ

โปร่งใส น้ำหนักเบา ความเหนียว และสมบัติเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ที่ทำให้สามารถขึ้นรูปตามแบบที่ต้องการได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงนำอะคริลิกมาประยุกต์ใช้งานหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ใช้เป็นวัสดุทดแทนกระจก อุปกรณ์สำนักงาน ป้ายโฆษณา อุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วน

ยานยนต์ เป็นต้น โดยมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันในแต่ละปีจะมีปริมาณเศษอะคริลิกเหลือทิ้งหลายร้อยตันจากกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมและจากขั้นตอนการตัดชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องมีการจัดการเศษอะคริลิกเหล่านี้ เช่น รีไซเคิล ซึ่งมีหลายวิธีทั้งแบบเชิงกล (mechanical recycling) และเชิงความร้อน (thermal recycling/incineration) โดยแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมด้านต่าง ๆ ทั้งนี้การแปรสภาพพลาสติกด้วยวิธีการสลายตัวเชิงความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 400-700 องศาเซลเซียส หรือที่เรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการจัดการขยะพลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม [1-6] เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้มักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สามารถนำกลับมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการต่าง ๆ หรือใช้เป็นแหล่งพลังงานในรูปของน้ำมันเชื้อเพลิงจึงมีข้อดีทั้งในแง่การลดปริมาณขยะพลาสติกและการเพิ่มมูลค่าให้ขยะพลาสติก อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานมากอีกทั้งเชื้อเพลิงหรือสารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นสารผสมหลายองค์ประกอบจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการแยกเพื่อคัดเอาเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจะนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ส่งผลให้มีมูลค่าในการดำเนินการต่ำและเป็นข้อจำกัดของกระบวนการ การประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับกระบวนการทางความร้อนหรือที่เรียกว่าการแตกตัวเชิงเร่ง (catalytic cracking) เป็นอีกหนึ่งแนวทางที่น่าสนใจเพราะสามารถลดข้อด้อยของกระบวนการแตกตัวเชิงความร้อน เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้สามารถดำเนินกระบวนการโดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำลง จึงเป็นการประหยัดต้นทุนด้านพลังงาน อีกทั้งยังช่วยให้การควบคุมกระบวนการทำได้โดยง่าย [7,8]

ซีโอไลต์ (zeolite) เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) จำพวกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการแตกสลายโครงสร้างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เป็นอย่างดีภายในโครงสร้างซีโอไลต์ประกอบด้วยรูพรุนที่มีขนาดและรูปแบบเฉพาะตัว จึงสามารถควบคุมขนาดโมเลกุลของสารผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังสามารถจำกัดและปรับแต่งโครงสร้างโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ได้ตามความต้องการด้วยสมบัติการเลือกจำเพาะเชิงโครงสร้าง (shape selective property) จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปพลาสติกโดยใช้ซีโอไลต์มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไป หรือสารเคมีอื่น ๆ ที่มีมูลค่า และยังก่อให้เกิดประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมในเชิงการบริหารจัดการขยะให้เกิดประโยชน์สูงสุด [9-13] ปัจจุบันมีการค้นพบซีโอไลต์แล้วกว่า 200 ชนิด [14,15] แต่มีเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งของขยะพลาสติกในระดับอุตสาหกรรม การวิจัยเกี่ยวกับการใช้ซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ ในกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อผลิตเชื้อเพลิงหรือสารมีมูลค่าจึงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้จึงศึกษาการแตกตัวของเศษอะคริลิกเหลือทิ้งจากขั้นตอนการตัดแต่งชิ้นงานจากภาคอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นอะคริลิก เพื่อนำกลับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีมูลค่าและมอนอเมอร์ ในขั้นต้นได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของอะคริลิกด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก/ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลอนาลิซิส เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้นตอนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาได้ดำเนินการโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงแบบแบตช์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ 3 ชนิด ที่มีความแตกต่างกันในเชิงโครงสร้าง ได้แก่

faujasite (FAU), beta polymorph A (BEA) และ mordenite framework inverted (MFI) ซึ่งจะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถสร้างความเข้าใจในอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการรีไซเคิลขยะหรือขึ้นส่วนผลิตภัณฑ์ประเภทอะคริลิกให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าหรือผลิตภัณฑ์ที่สามารถหมุนเวียนเข้ากระบวนการผลิตได้

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 สารเคมี

เซอะคริลิกได้รับการสนับสนุนจากบริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด มีขนาด 3-5 มิลลิเมตร มวลโมเลกุลเฉลี่ย 100,000 กรัมต่อโมล ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด MFI (Zeolyst International, USA), BEA (Süd-Chemie, Germany) และ FAU (Tosoh Corporation, Japan) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU ผ่านการกำจัดอลูมิเนียม (dealuminate) ตามวิธีของ Ngamcharussrivichai และคณะ [16] แก๊สที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบต่าง ๆ ดังนี้ ไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ (Praxair, Thailand) ฮีเลียม 99.995 เปอร์เซ็นต์ (Praxair, Thailand) อาร์กอน (Praxair, Thailand) และแอมโมเนีย 10 เปอร์เซ็นต์ ในอาร์กอน (Linde, Thailand)

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของอะคริลิก

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของอะคริลิกกระทำโดยใช้เทคนิคเทอร์โมแกลวิเมตริก/ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลอนาลิซิส (TG/DTA, PerkinElmer Pyris diamond, USA) ทดสอบการ

เปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอะคริลิกในช่วงอุณหภูมิ 50-1,000 องศาเซลเซียส ณ อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

2.2.2 การตรวจสอบลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD, Bruker D8 Advance XRD system, Germany) ทดสอบในช่วงมุมตกกระทบ (2 θ) 5-80 องศา วิเคราะห์ผลโดยการเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐานการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์จากฐานข้อมูลของ International Zeolite Association (IZA) [14] การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของซีโอไลต์ทำโดยใช้เทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (XRF, Philips PW 2400, Netherlands) พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) และขนาดรูพรุน (pore size) ของ ซีโอไลต์วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับและการคายไนโตรเจน (N₂ adsorption/desorption measurement, Micromeritics ASAP 2010, USA) โดยทดสอบในช่วงความดันสัมพัทธ์ระหว่าง 0.01 ถึง 0.2 ข้อมูลที่ได้นำไปคำนวณขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะตามสมการของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) และสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ตามลำดับ สมบัติความเป็นกรด (acidity) ของซีโอไลต์ทดสอบโดยใช้เทคนิคการคายแอมโมเนียแบบโปรแกรมอุณหภูมิ (TPD-NH₃, Micromeritics AutoChem II 2920, USA) [17] ในช่วงอุณหภูมิ 50-800 องศาเซลเซียส ข้อมูลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์สัญญาณพีก TCD (thermal conductivity detector signal deconvolution) ตามลักษณะการแจกแจงแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) โดยเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองกับสัญญาณพีกที่ได้

จากการทดลองจริงและประเมินสมบัติความเป็นกรดในรูปของปริมาณตำแหน่งกรดทั้งหมด (number of acid site) และความแรงของตำแหน่งกรด (strength of acid site) โดยใช้ amorphous silica-alumina (ASA) ที่ทราบปริมาณตำแหน่งกรดที่แน่นอนเป็นสารสอบเทียบ

2.2.3 การทดสอบการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา

การทดสอบการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิกดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงแบบแบตช์ (high pressure stirred batch reactor, Parr instrument Model 4561 Mini Bench Top Reactor / PID controller 4848, USA) ทำจากสแตนเลสสตีล T316 ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ส่วนประกอบของชุดเครื่องปฏิกรณ์แสดงในรูปที่ 1 เศษอะคริลิกและตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์จะบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้อัตราส่วนระหว่างซีโอไลต์ต่ออะคริลิกเท่ากับ 1 : 100 โดยน้ำหนัก กำจัดแก๊สออกซิเจนในระบบโดยการป้อนแก๊สไนโตรเจนผ่านเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องด้วยอัตรา 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงปิดวาล์วทั้งหมดและให้ความร้อนจนอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ได้จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน คงไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 120 นาที โดยมีการกวนตลอดเวลาด้วยอัตราการหมุนใบกวน 100 รอบต่อนาที เมื่อครบระยะเวลายังลดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์สู่อุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็วด้วยระบบน้ำหล่อเย็น โดยบันทึกข้อมูลน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งในรูปของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แล้วผลิตภัณฑ์ของเหลวจะนำไปกลั่นในเครื่องระเหยแบบหมุน (Büchi Model R-210, Switzerland) ณ อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความดัน 200 มิลลิบาร์ เพื่อแยกเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวส่วนเบา (light

fraction) และผลิตภัณฑ์ของเหลวส่วนหนัก (heavy fraction) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (% yield) สามารถคำนวณจากสมการที่ 1

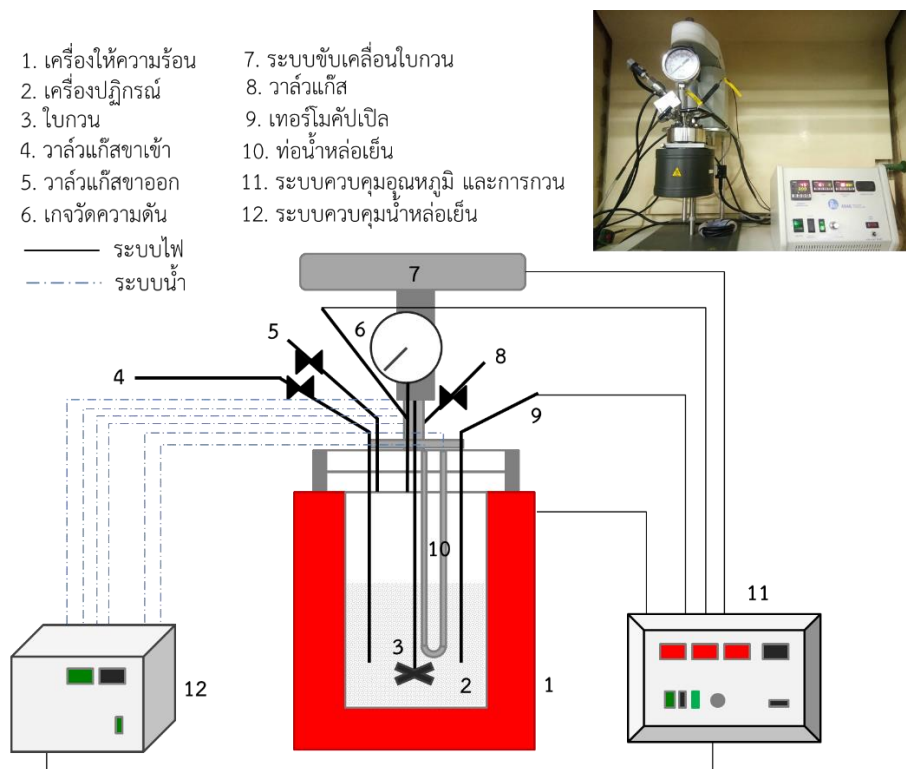
$$Y_i(\%) = \frac{M_{Pd,i}}{M_A} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ $Y_i(\%)$ คือ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ $M_{Pd,i}$ คือ มวลของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลวหนัก ของเหลวเบา หรือแก๊ส และ M_A คือ มวลเริ่มต้นของอะคริลิก ทั้งนี้การทดสอบการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิกด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แต่ละชนิดทำการทดลอง 3 ซ้ำ คำนวณหาค่าเฉลี่ย (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) รายงานผลการทดลองในรูปของค่าเฉลี่ยร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในลักษณะของแถบค่าคลาดเคลื่อน (error bar)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์ของเหลวกระทำด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS, Shimadzu GC-MS-QP2010, Japan) โดยใช้คาปิลารีคอลัมน์ชนิด DB-5ms (0.25 มิลลิเมตร x 30 เมตร x 0.25 ไมโครเมตร) มีฮีเลียมเป็นแก๊สพาณ อัตราการไหลในคอลัมน์ 1.51 มิลลิลิตรต่อนาที ความเร็วเชิงเส้น 0.444 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิคอลัมน์ 40 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีผลิตภัณฑ์แก๊สใช้อัตราส่วนสปลิท (อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของแก๊สที่ระบายทั้งต่ออัตราการไหลของแก๊สเข้าคอลัมน์) เท่ากับ 2 : 1 และสำหรับกรณีของผลิตภัณฑ์ของเหลวจะเจือจางให้มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร โดยใช้คาร์บอนไดซัลไฟด์เป็นตัวทำละลาย (Sigma-Aldrich, Switzerland) และใช้อัตราส่วนสปลิท 100 : 1

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

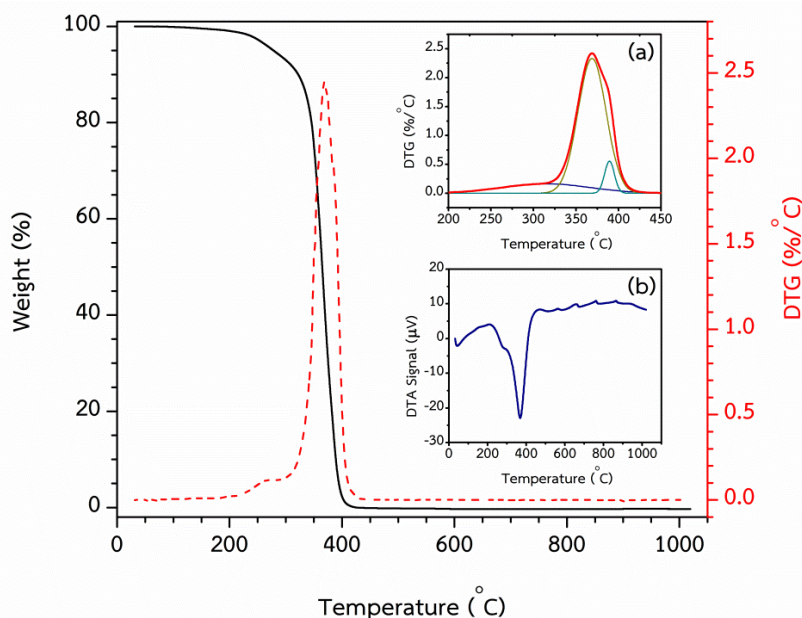
3.1 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของอะคริลิก



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงแบบแบตช์สำหรับกระบวนการการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิก

เทอร์โมแกรมการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของอะคริลิกในช่วงอุณหภูมิ 50-1,000 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกัลลิเมตริก/ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลอนาลิซิสแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งพบว่าเส้นกราฟแสดงน้ำหนักของอะคริลิก (เส้นทึบสีดำ) มีลักษณะลดลงเป็นเส้นโค้งอันมีสาเหตุมาจากการสูญเสียน้ำหนักอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยพบการสูญเสียน้ำหนักอย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิ 200-450 องศาเซลเซียส ดังที่เห็นได้จากกราฟแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อหน่วยอุณหภูมิ (DTG, เส้นประสีแดง) และเมื่อแยกสัญญาณพีค DTG ตามลักษณะการแจกแจงแบบเกาส์เซียน (รูปที่ 2a) เพื่อวิเคราะห์ผลเชิงลึกทำให้พบพฤติกรรมการสูญเสียน้ำหนักใน 3 ช่วง

กล่าวคือ ช่วงที่หนึ่งเป็นการสูญเสียน้ำหนักอย่างช้า ๆ ระหว่าง 200-400 องศาเซลเซียส โดยอัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าสูงสุด ณ อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการหลอมของอะคริลิก ช่วงที่สองเป็นการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วระหว่าง 320-450 องศาเซลเซียส โดยอัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าสูงสุด ณ อุณหภูมิประมาณ 375 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของอะคริลิกแบบ end-chain scission ร่วมกับ random scission และช่วงที่สามเป็นการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิแคบ ๆ ระหว่าง 360-420 องศาเซลเซียส โดยอัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าสูงสุด ณ อุณหภูมิประมาณ 390 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของอะคริลิกแบบ random scission [18]



รูปที่ 2 เทอร์โมแกรมการสลายตัวของอะคริลิก เส้นกราฟน้ำหนักของอะคริลิก (เส้นทึบสีดำ) และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อหน่วยอุณหภูมิ (เส้นประสีแดง) โดย (a) การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อหน่วยอุณหภูมิ และผลการแจกแจงแบบเกาส์เซียน และ (b) การเปลี่ยนแปลงพลังงาน

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงาน (DTA, รูปที่ 2b) พบว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200-450 องศาเซลเซียส เป็นแบบดูดความร้อน (endothermic) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายใน (enthalpic transition) ซึ่งช่วยสนับสนุนแนวคิดเกี่ยวกับพฤติกรรมการสลายตัวของอะคริลิกตามที่ได้อภิปรายไว้เนื่องจากการหลอม การสลายตัวแบบ end-chain scission และแบบ random scission นั้นล้วนเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อนทั้งสิ้น

การพิจารณาข้อมูลการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่กล่าวทั้งหมดข้างต้น ทำให้สามารถกำหนดได้ว่ากระบวนการแตกตัวของอะคริลิกนั้น ควรทำโดยใช้อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดของการสลายตัวช่วงที่หนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้

อุณหภูมิดังกล่าว สำหรับการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงแบบแบตช์ต่อไป

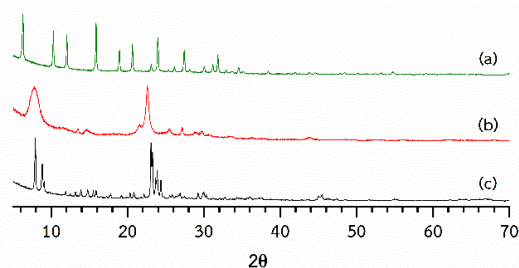
3.2 ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์

3.2.1 สันฐานวิทยา องค์ประกอบทางเคมี และพื้นที่ผิวจำเพาะ

การตรวจสอบลักษณะทางสันฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยากระทำโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐานการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์จากฐานข้อมูลของ IZA ผลการทดสอบพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ ดังรูปที่ 3 มีลักษณะเป็นพีคที่มีฐานแคบและคมชัดมากซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์และเป็นระเบียบ ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU, BEA และ

MFI ที่ปรากฏขึ้นนั้นสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ USY (Beta) และ ZSM-5 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีและแสดงในรูปอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินามีค่าเท่ากับ 30 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) เท่ากับ 25 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด BEA (Beta) และ MFI (ZSM-5) ในขณะที่ขนาดรูพรุนซึ่งคำนวณจากข้อมูลการดูดซับและการคายไนโตรเจนโดยใช้สมการ BJH สามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ FAU (USY) > BEA (Beta) > MFI (ZSM-5) ลักษณะ

สมบัติที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ได้แก่ (a) FAU (USY), (b) BEA (Beta) และ (c) MFI (ZSM-5)

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

ชนิดซีโอไลต์	รูปแบบ XRD ^a (ตามฐานข้อมูล IZA)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ ratio ^b	ขนาดรูพรุน ^c (Å)	พื้นที่ผิวจำเพาะ ^d (m ² g ⁻¹)	ปริมาณตำแหน่งกรด ^e (mmol g ⁻¹)
FAU	USY	30	68.1	1,310	1.68
BEA	Beta	25	34.7	466	1.94
MFI	ZSM-5	25	31.4	309	2.21

^aวิเคราะห์จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์; ^bวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี; ^cคำนวณจากข้อมูลการดูดซับและการคายไนโตรเจนโดยใช้สมการ BJH; ^dคำนวณจากข้อมูลการดูดซับและการคายไนโตรเจนโดยใช้สมการ BET; ^eวิเคราะห์จากข้อมูลการคายแอมโมเนียแบบโปรแกรมอุณหภูมิ

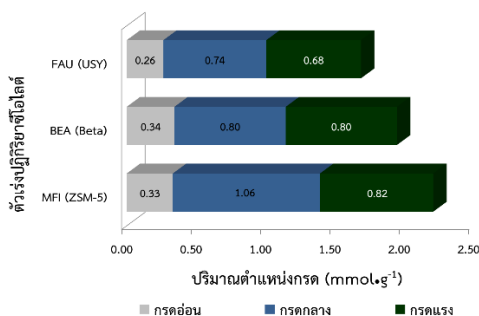
3.2.2 สมบัติความเป็นกรด

ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ในรูปของปริมาณตำแหน่งกรดทั้งหมด (Number of acid sites) ตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการคายแอมโมเนียแบบโปรแกรมอุณหภูมิได้ระบุไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิดมีปริมาณตำแหน่งกรดทั้งหมดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันโดยสามารถเรียงลำดับปริมาณตำแหน่งกรดทั้งหมดจากมากไปน้อยได้ดังนี้ MFI (ZSM-5) > BEA (Beta) > FAU (USY) นอกจากนี้ความ

เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ในรูปของความแรงของตำแหน่งกรด (Strength of acid sites) ได้ประเมินจากข้อมูลอุณหภูมิที่เกิดการคายแอมโมเนียโดยใช้วิธีการแยกสัญญาณฟิตตามลักษณะการแจกแจงแบบเกาส์เซียนดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องในระดับ $R^2 > 0.99$ ในทุกชุดข้อมูล ผลการวิเคราะห์สัญญาณฟิตชี้ให้เห็นว่าพฤติกรรมการคายแอมโมเนียเกิดได้ใน 3 ช่วงอุณหภูมิ กล่าวคือ ช่วงแรกเป็นการคายแอมโมเนียออกจากตำแหน่งกรดอ่อน (Weak acid sites) โดยมีอัตราการคายสูงสุด (ยอดฟิต) ณ อุณหภูมิประมาณ 110 - 140 องศาเซลเซียส

ช่วงที่สองเป็นการคายแอมโมเนียออกจากตำแหน่งกรดกลาง (Medium acid sites) โดยมีอัตราการคายสูงสุด ณ อุณหภูมิประมาณ 160 - 230 องศาเซลเซียส และช่วงสุดท้ายเป็นการคายแอมโมเนียออกจากตำแหน่งกรดแรง (Strong acid sites) โดยมีอัตราการคายสูงสุด ณ อุณหภูมิสูงกว่า 320 องศาเซลเซียสขึ้นไป

ปริมาณตำแหน่งกรดจำแนกตามความแรงสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของตำแหน่งกรดแต่ละชนิดดังที่แสดงผลไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) มีปริมาณตำแหน่งกรดแรงและกรดกลางน้อยที่สุดในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด MFI (ZSM-5) นอกจากจะมีปริมาณตำแหน่งกรดกลาง

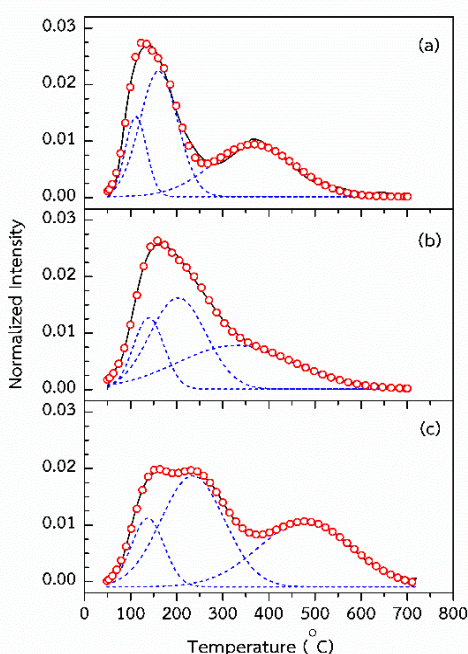


รูปที่ 5 ปริมาณตำแหน่งกรดจำแนกตามความแรงของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ

และกรดแรงจำนวนมากที่สุดแล้ว การคายแอมโมเนียออกจากตำแหน่งกรดดังกล่าวยังเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่ากรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) และ BEA (Beta) อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งบ่งชี้ว่าตำแหน่งกรดกลางและกรดแรงของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด MFI (ZSM-5) มีความแรงมากกว่าของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) และ BEA (Beta) ดังนั้นแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิด จะมีสัดส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาใกล้เคียงกัน แต่สามารถแสดงสมบัติความเป็นกรดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์ เมื่อพิจารณาทั้งในแง่ปริมาณตำแหน่งกรดทั้งหมดรวมกับความแรงของตำแหน่งกรดสามารถเรียงลำดับสมบัติความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ได้ดังนี้ MFI (ZSM-5) > BEA (Beta) > FAU (USY)

3.3 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิก

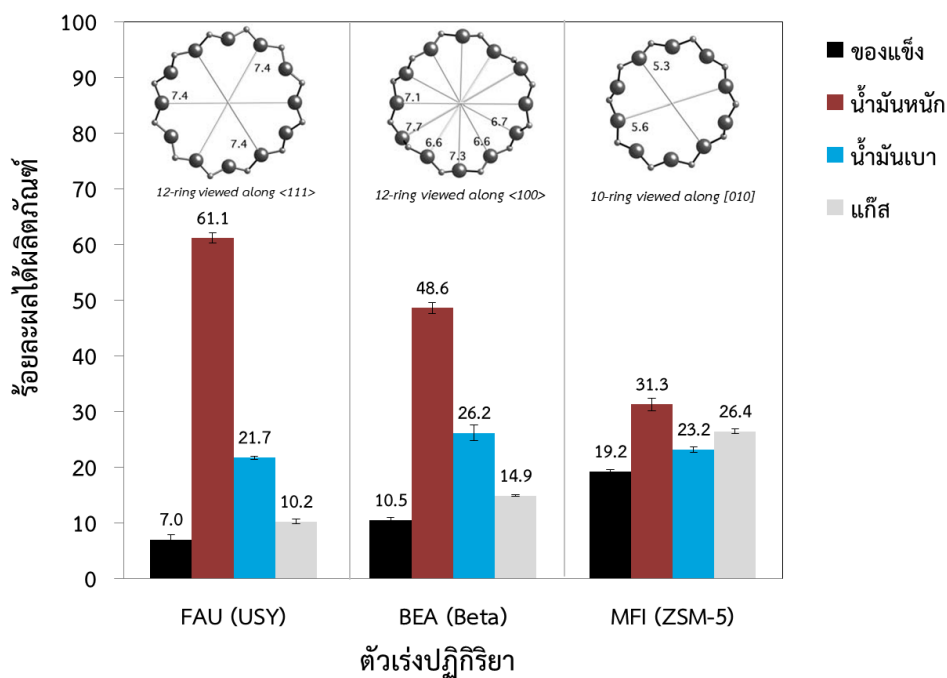
การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิกด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY), BEA (Beta) และ MFI (ZSM-5) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงแบบแบตช์สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยไม่พบอะคริลิกหลงเหลืออยู่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอะคริลิกทั้งหมดได้ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ในขณะที่ผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์ของแข็งเกิดเป็น



รูปที่ 4 การคายแอมโมเนียแบบโปรแกรมอุณหภูมิ (เส้นทึบ) รูปแบบการแจกแจงแบบเกาส์เซียน (เส้นประ) และแบบจำลอง (จุดโปร่ง) ของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ได้แก่ (a) FAU (USY), (b) BEA (Beta) และ (c) MFI (ZSM-5)

ผลิตภัณฑ์ร่วม (co-product) การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดแตกต่างกันตามชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 6 กล่าวคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น โดยสามารถเรียงลำดับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากมากไปน้อยได้ดังนี้ FAU (USY) > BEA (Beta) > MFI (ZSM-5) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Manos และคณะ [19] ในทางกลับกันหากพิจารณาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือผลิตภัณฑ์แก๊สจะพบแนวโน้มที่ตรงกันข้าม คือ MFI (ZSM-5) > BEA (Beta) > FAU (USY) ทั้งนี้ตามทฤษฎีแล้วผลิตภัณฑ์ข้างเคียงทั้ง 2 ชนิด เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการแตกตัวอย่างรุนแรง ซึ่งสอดคล้องอย่างยิ่งกับสมบัติความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สามารถสรุปได้ว่าสมบัติความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยามีอิทธิพลอย่างมากต่อการกระจายตัวของ

ผลิตภัณฑ์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูงจะให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งและผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้นและให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อยลง นอกจากนี้ขนาดรูพรุนก็ถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง กล่าวคือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด MFI (ZSM-5) ซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็กที่สุดจะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงกว่าและให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวหนักน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดอื่น ในขณะที่การแตกตัวของอะคริลิกบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด BEA (Beta) ซึ่งมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นจะเกิดผลิตภัณฑ์ของเหลวหนักปริมาณมากขึ้นถึงร้อยละ 48 โดยน้ำหนัก ยิ่งไปกว่านั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) ซึ่งมีรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุดจะให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวหนักในปริมาณมากอย่างเห็นได้ชัดถึงร้อยละ 61 โดยน้ำหนัก สอดคล้องกับงานวิจัยของ



รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิกและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ของ Manos และคณะ [19] ทั้งนี้เป็นเพราะตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) มีโครงสร้างที่มีลักษณะพิเศษที่เรียกว่า supercage ซึ่งเกิดจากการบรรจุกันของช่องรูพรุนขนาดเล็กจนเกิดเป็นโพรงขนาดใหญ่อยู่ภายในโครงสร้าง [15] เมื่อพิจารณาจากข้อมูลการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์และปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นจะถือว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของอะคริลิกในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงแบบแบตช์โดยให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวนักและเบารวมกันสูงถึงประมาณร้อยละ 83 โดยน้ำหนัก

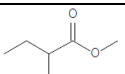
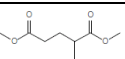
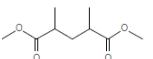
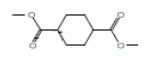
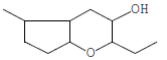
3.4 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิกด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY), BEA (Beta) และ MFI (ZSM-5) ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรเมตรี พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิด ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนไม่เกิน 4 อะตอม (C_1 - C_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สำหรับผลิตภัณฑ์ของเหลวนักที่มีลักษณะใสไม่มีสีนั้น พบว่าเป็นเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (methyl methacrylate monomer (MMA, $C_5H_8O_2$) หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 5-6 อะตอม และมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (C_5 - C_6 oxygenated hydrocarbon) ซึ่งมีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงกับเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (C_5 - C_6) ได้แก่ propanoic acid, 2-methyl ester, methyl ester และ butanoic acid โดยพบได้ในทุกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ของเหลวนักซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้นเหนียวสีน้ำตาลเข้มนั้นพบว่าเป็นสาร

ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ โดยมีจำนวนอะตอมคาร์บอนตั้งแต่ 3 อะตอม จนถึง 16 อะตอม (C_3 - C_{16}) และมีการกระจายตัวของสารประกอบแตกต่างกันตามชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ การวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรีพบว่า ผลิตภัณฑ์ของเหลวนักส่วนหนักที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด MFI (ZSM-5) นั้นมีองค์ประกอบที่หลากหลายในรูปของสารประกอบจำพวกอะโรมาติก (aromatic compound) และอะลิไซคลิก (alicyclic compound) จึงมีความเป็นไปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดนี้ซึ่งมีโครงสร้างสามมิติเป็นช่อง/ท่อขนานในลักษณะซิกแซก 10 membered ring (sinusoidal 10-MR ring channel) อีกทั้งยังมีความเป็นกรดแรง และมีตำแหน่งกัมมันต์ที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยานั้นเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน (aromatization) และไซโคลเซชัน (cyclization) [20-23] ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) ที่มีช่องรูพรุนขนาด 12-MR และมีโพรง supercage ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด BEA (Beta) ที่มีโครงสร้างสามมิติจัดเรียงเป็นช่องอย่างเป็นระเบียบประกอบเข้ากันจำนวนมากจนเกิดเป็นลักษณะชั้น (layer) แต่ละชั้นเชื่อมเข้ากันผ่านอะตอมออกซิเจนเกิดเป็นรูพรุนขนาด 12-MR นั้นจะพบองค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบโซ่ตรงและโซ่กิ่ง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Manos และคณะ [19] Elordi และคณะ [23] และ Rahimi และคณะ [24] ตัวอย่างสารประกอบที่พบในผลิตภัณฑ์ของเหลวแสดงดังตารางที่ 2

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิด ช่วยให้อาจสามารถนำกลับคืนเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ในปริมาณร้อยละ 21-26 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) นั้น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพสำหรับการ

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสารประกอบที่พบในผลิตภัณฑ์ของเหลว

ผลิตภัณฑ์ ของเหลว (Liquid fraction)	องค์ประกอบ (Composition)	สูตรโครงสร้าง (Formula)	FAU (USY)	BEA (Beta)	MFI (ZSM-5)
ของเหลวส่วนเบา (Light fraction)	$C_5H_{10}O_2$		X	X	X
	$C_5H_8O_2$ (MMA)		X	X	X
	$C_6H_{12}O_2$		X	X	X
ของเหลวส่วน หนัก (Heavy fraction)	$C_3H_6O_2$			X	X
	$C_4H_6O_2$			X	X
	$C_4H_8O_2$		X	X	X
	$C_5H_8O_2$		X	X	X
	$C_5H_{10}O_2$		X	X	X
	$C_6H_{12}O_2$		X	X	X
	$C_8H_{12}O_2$			X	X
	$C_8H_{14}O_4$				X
	C_9H_{12}				X
	$C_{10}H_{14}$				X
	$C_9H_{16}O_4$		X	X	X
	$C_{10}H_{16}O_4$		X	X	X
	$C_{11}H_{20}O_2$				X
	$C_{16}H_{22}O_4$		X	X	X

แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นที่ใต้กราฟคิดเป็นสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 1 จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC/MS

ประยุกต์ใช้ในกระบวนการแตกตัวของอะคริลิกในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ภายใต้ความดันเพื่อผลิตเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์รวมทั้งผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนเหลว เนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยร้อยละผลได้ของเหลวสูงถึงร้อยละ 83 และมีชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นไม่หลากหลาย ซึ่งอาจเป็นผลดีต่อกระบวนการแยกและการทำให้บริสุทธิ์ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด MFI (ZSM-5) และ BEA (Beta) ให้ค่าเฉลี่ยร้อยละผลได้ของแก๊สและผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาค่อนข้างสูงจึงมีความเป็นไปได้ที่จะให้ผลที่ดีหากนำไปใช้ในกระบวนการแบบต่อเนื่อง

4. สรุปผลการทดลอง

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของอะคริลิกด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ประเภทซีโอไลต์ชนิด MFI (ZSM-5), BEA (Beta) และ FAU (USY) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงแบบแบดซ์สามารถทำภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยมีผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นผลิตภัณฑ์หลักในขณะที่ผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์ของแข็งเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยามีอิทธิพลอย่างมากต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูงจะให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งและผลิตภัณฑ์แก๊สมากและให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อย ขนาดรูพรุนส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกันโดยซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU (USY) ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุด ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด BEA (Beta) และ MFI (ZSM-5) ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบที่หลากหลายในรูปของสารประกอบจำพวกอะโรมาติกและอะไซคลิก งานวิจัยนี้สามารถนำกลับคืนเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ในปริมาณร้อยละ 21-26 โดยขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่เลือกใช้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์อะคริลิก สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก และภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวิเคราะห์ วัสดุอุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวกที่ใช้ในงานวิจัย

6. รายการอ้างอิง

- [1] Kaminsky, W. and Eger, C., 2001, Pyrolysis of filled PMMA for monomer recovery, J. Anal. Appl. Pyrol. 58-59: 781-787.
- [2] Kaminsky, W., Predel, M. and Sadiki, A., 2004, Feedstock recycling of polymers by pyrolysis in a fluidised bed, Polym. Degrad. Stab. 85: 1045-1050.
- [3] Smolders, K. and Baeyens, J., 2004, Thermal degradation of PMMA in fluidised beds, Waste Manage. 24: 849-857.
- [4] Scheirs, J. and Kaminsky, W., 2006, Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels, John Wiley & Sons, Wiltshire. 785 p.
- [5] Achyut, K.P., Singh, R.K. and Mishra, D.K., 2010, Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of

- value added products: A world prospective, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14: 233-248.
- [6] นีรา วงศ์ยานวัตร, มาลี สันติคุณาภรณ์ และชาญณรงค์ อัครเวศานภาพ, 2561, การสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยกระบวนการไพโรไลซิส, *ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* 26(2): 354-362.
- [7] Weitkamp, J. and Puppe, L., 2010, *Catalysis and Zeolites: Fundamentals and Applications*, Springer, Heidelberg, 564 p.
- [8] Aguado, J., Serrano, D.P. and Escola, J.M., 2008, Fuels from waste plastics by thermal and catalytic processes: A review, *Ind. Eng. Chem. Res.* 47: 7982-7992.
- [9] Chester, A.W. and Derouane, E.G., 2010, *Zeolite Characterization and Catalysis: A Tutorial*, Springer, Heidelberg, 358 p.
- [10] Wong, S.L., Ngadi, N., Abdullah, T.A.T. and Inuwa, I.M., 2017, Conversion of low density polyethylene (LDPE) over ZSM-5 zeolite to liquid, *Fuel* 192: 71-82.
- [11] Jiraroj, D., Chaipurimat, A., Kerdsa, N., Hannongbua, S. and Tungasmita, D.N., 2016, Catalytic cracking of polypropylene using aluminosilicate catalysts, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 120: 529-539.
- [12] Garforth, A.A., Ali, S., Martinez, J.H. and Akah, A., 2004, Feedstock recycling of polymer wastes, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 8: 419-425.
- [13] Buzetzk, E., Sidorová, K., Cvengrošová, Z., Kaszonyi, A. and Cvengroš, J., 2011, The influence of zeolite catalysts on the products of rapeseed oil cracking, *Fuel Process. Technol.* 92: 1623-1631.
- [14] Treacy, M.M.J. and Higgins, J.B., 2001, *Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites*, 4th Ed., Elsevier, Amsterdam, 586 p.
- [15] Baerlocher, C., McCusker, L. and Olson, D.H., 2007, *Atlas of Zeolite Framework Types*, 6th Ed., Elsevier, Amsterdam, 404 p.
- [16] Ngamcharussrivichai, C., Wu, P. and Tatsumi, T., 2005, Active and selective catalyst for liquid phase Beckmann rearrangement of cyclohexanone oxime, *J. Catal.* 235: 139-149.
- [17] Damjanović, L. and Auroux, A., 2010, Determination of Acid/Base Properties by Temperature Programmed Desorption (TPD) and Adsorption Calorimetry, pp. 107-167, In Chester, A.W. and Derouane, E.G., *Zeolite Characterization and Catalysis: A Tutorial*, Springer, Heidelberg.
- [18] Pielichowski, K. and Njuguna, J., 2005, *Thermal Degradation of Polymeric Materials*, Rapra Technology Limited, Shropshire, 306 p.
- [19] Manos, G., Garforth, A. and Dwyer, J., 2000, Catalytic degradation of high-density polyethylene over different zeolitic structures, *Ind. Eng. Chem. Res.* 39: 1198-1202.
- [20] Adjaye, J.D. and Bakhshi, N.N., 1995, Production of hydrocarbons by catalytic upgrading of a fast pyrolysis bio-oil. Part II:

- Comparative catalyst performance and reaction pathways, Fuel Process. Technol. 45: 185-202.
- [21] Liu, C., Deng, Y., Pan, Y., Gu, Y., Qiao, B. and Gao, X., 2004, Effect of ZSM-5 on the aromatization performance in cracking catalyst, J. Mol. Catal. A: Chem. 215: 195-199.
- [22] Corma, A., Huber, G.W., Sauvanaud, L. and O'Connor, P., 2007, Processing biomass-derived oxygenates in the oil refinery: Catalytic cracking (FCC) reaction pathways and role of catalyst, J. Catal. 247, 307-327.
- [23] Elordi, G., Olazar, M., Artetxe, M., Castaño, P. and Bilbao, J., 2012, Effect of the acidity of the HZSM-5 zeolite catalyst on the cracking of high density polyethylene in a conical spouted bed reactor, Appl. Catal. A 415-416: 89-95.
- [24] Rahimi, N. and Karimzadeh, R., 2011, Catalytic cracking of hydrocarbons over modified ZSM-5 zeolites to produce light olefins: A review, Appl. Catal. A 398: 1-17.