



การเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลเป็นไบโอเจ็ทด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Catalytic conversion of ethanol to biojet over zeolite catalysts

สุวิมล ไทยน้อย¹ พัสตราภรณ์ กิจศิริ¹ และ อาทิตย์ อัสวสุชี^{1*}

¹สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Suwimon Thainoi¹ Phattraphorn Kijisiri¹ and Artit Ausavasukhi^{1*}

¹Applied Chemistry, Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima, 30000 Thailand

*Corresponding Author, E-mail: ausavasukhi@gmail.com

Received: 13 November 2019 | Revised: 10 April 2020 | Accepted: 21 April 2020

บทคัดย่อ

น้ำมันไบโอเจ็ทสามารถผลิตได้จากเอทานอลที่ได้จากกระบวนการหมักผ่านปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และปฏิกิริยาอื่นๆ ซึ่งเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซีโอไลต์ HZSM-5 มีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูงในการเปลี่ยนเอทานอลเป็นน้ำมันไบโอเจ็ท ในขณะที่ซีโอไลต์อื่นๆ (HBeta, HMordenite และ HY) ให้เอทิลีนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ (ความหนาแน่นของกรดสูง) ให้ % การเลือกสรรน้ำมันไบโอเจ็ทมากขึ้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน และความเข้มข้นของเอทานอลมีผลต่อการกระจายผลิตภัณฑ์ และประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา สภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด (HZSM-5(11)) พบว่าเป็นดังนี้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน 21.12 นาที และความเข้มข้นของเอทานอล 99.5 % โดยปริมาตร ภายใต้สภาวะนี้ให้ % การเลือกสรรน้ำมันไบโอเจ็ทสูงสุด 43.77 % โดยทั่วไปซีโอไลต์ HZSM-5 สามารถเสื่อมสภาพได้เนื่องจากการเกิดโค้ก ภายหลังการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง % การเปลี่ยนแปลงเอทานอล และการเลือกสรรน้ำมันไบโอเจ็ทมีค่าใกล้เคียงเดิม

ABSTRACT

Biojet can be produced from ethanol obtained by fermentation process via dehydration and other reactions as green alternative routes. HZSM-5 zeolite showed high activity in the conversion of ethanol to biojet, while other zeolites (HBeta, HMordenite, and HY) mainly formed ethylene. The HZSM-5 with a lower Si/Al ratio (high acid density) provided more biojet selectivity. Reaction temperature, W/F and ethanol concentration have a significant effect on the product distribution and catalytic activity. The optimum reaction conditions on the best catalyst (HZSM-5(11)) were found as follows; reaction temperature of 450 °C, W/F of 21.12 minutes and ethanol concentration of 99.5 % (v/v). Under such conditions, the selectivity of biojet was 43.77%. Generally, HZSM-5 zeolite can deactivate due to coke formation. After the catalyst regeneration, both the ethanol conversion and biojet selectivity were still maintained.

คำสำคัญ: การเปลี่ยนเอทานอล ซีโอไลต์ น้ำมันไบโอเจ็ท สารประกอบไฮโดรคาร์บอน

Keywords: Ethanol conversion, Zeolite, Biojet, Hydrocarbon

บทนำ

องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศได้กำหนดให้เครื่องบินพาณิชย์ทุกลำที่ผ่าน่านฟ้ายุโรปต้องมีกรรมสมน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพหรือน้ำมันไบโอเจ็ท (Biojet) ลงในเครื่องบิน เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาภาวะโลกร้อนจากการเผาไหม้ ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากพืชนั้นสามารถช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ เนื่องจากพืชที่ถูกใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงชีวภาพสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันไบโอเจ็ทมาใช้ในอุตสาหกรรมการบินนั้นยังมีข้อจำกัดในเรื่องของราคา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตจากน้ำมันพืชที่ใช้บริโภค ซึ่งมีกระบวนการทางเคมีหลายขั้นตอนเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นน้ำมันไบโอเจ็ท เช่น ไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ดีออกซิจีเนชัน (Deoxygenation) และไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) (Zarchin, 2015; Liu, 2014) นอกจากนี้ยังสามารถผลิตน้ำมันไบโอเจ็ทผ่านกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจากแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) (Kumabe, 2010) ซึ่งขั้นตอนการเตรียมแก๊สสังเคราะห์สามารถเตรียมได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ของถ่านหิน หรือแก๊สธรรมชาติ หรือสารชีวมวล ซึ่งเตรียมจากวัสดุที่มีราคาแพง อีกทั้งยังดำเนินการที่ความดันสูง ทำให้ไม่สามารถดำเนินการได้ในเชิงพาณิชย์

แนวทางใหม่สำหรับการผลิตน้ำมันไบโอเจ็ทคือการใช้เอทานอลที่ได้จากกระบวนการหมักสารชีวมวลหรือไบโอเอทานอล (Bioethanol) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตสารไฮโดรคาร์บอน จากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาซีโอไลต์ที่มีสมบัติเป็นกรด เช่น ซีโอไลต์ชนิด ZSM-11 สำหรับการผลิตโอเลฟินส์ขนาดเล็ก (Light olefins) และเบนซิน โทลูอีน ไซลีน (Liu et al., 2016) ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สำหรับการผลิตเบนซิน โทลูอีน ไซลีน (Inaba, 2006; Sousa, 2016) เอทิลีน (Sousa, 2016; Moon, 2019) และโพรพิลีน (Sousa et al., 2016) ซีโอไลต์ชนิด Mordenite สำหรับการผลิตเบนซิน โทลูอีน ไซลีน (Inaba et al., 2006) และ

ซีโอไลต์ชนิด Beta สำหรับการผลิตเบนซิน โทลูอีน ไซลีน (Inaba, 2006; Sujeerakulkai, 2016) และสารไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูงในช่วงคาร์บอนมากกว่า 9 อะตอม (Sujeerakulkai and Jitkarnka, 2016) จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าส่วนใหญ่ไม่ได้มุ่งเน้นการผลิตสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในช่วงของน้ำมันไบโอเจ็ท (C₉-C₁₅) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของซีโอไลต์ อิทธิพลของอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al ratio) ของซีโอไลต์ ความเข้มข้นของเอทานอล และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่สำหรับการเปลี่ยนเอทานอลเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในช่วงน้ำมันไบโอเจ็ท

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5, Mordenite, Beta และ Y ที่มีตำแหน่งที่ว่างไวเป็นกรดในการเปลี่ยนเอทานอลเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง รวมถึงศึกษาอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของซีโอไลต์ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูงและให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ในช่วงน้ำมันไบโอเจ็ท โดยใช้เอทานอลที่มีน้ำปนในสารป้อนเพื่อลดต้นทุนในการผลิตที่ความเข้มข้น 95.0 % โดยปริมาตร โดยเปรียบเทียบกับการใช้เอทานอลความเข้มข้น 99.5 % โดยปริมาตร และดำเนินการเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันบรรยากาศมากไปกว่านั้นยังศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่

วิธีการดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีตำแหน่งที่ว่างไวเป็นกรด

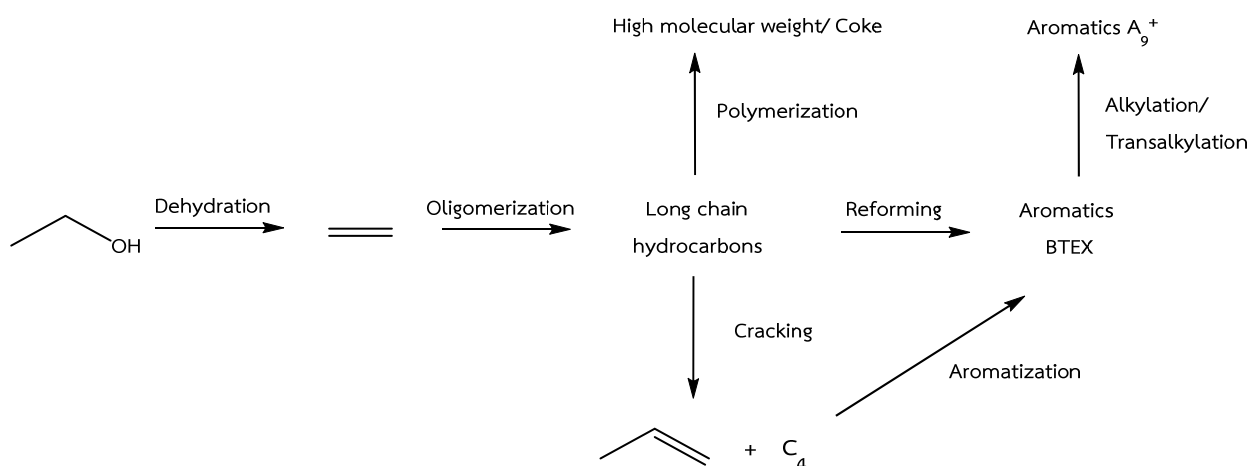
นำซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (บริษัท Zeolyst, Zeocat และ Tricat), Mordenite, Beta และ Y (บริษัท Tosoh) ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่างกัน ซึ่งอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนเกรดการค้ามาทำการเผาในบรรยากาศของอากาศที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย HZeolite(Si/Al ratio) เช่น HZSM-5(11) หมายถึงตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อยู่ในรูปกรด และมีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเป็น 11

การทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอล

ทดสอบการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยป้อนเอทานอลความเข้มข้น 95.0 % โดยปริมาตร (เจือจางจากเอทานอล 99.5 % โดยปริมาตร) หรือ 99.5 % โดยปริมาตร (บริษัท Merck) เข้าสู่ถึงปฏิกรณ์ที่ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำหนัก 0.025-0.200 กรัม โดยใช้ปั๊มรีด (อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน (W/F) 3.52-28.17 นาที) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350-550 องศาเซลเซียส โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพาด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นที่เหลือด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบออนไลน์ โดยใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณชนิดการไอออไนซ์ด้วยเปลวไฟ (Flame ionization detector) (รุ่น GC Clarus 500 บริษัท PerkinElmer)

การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊ส (Gas adsorption analysis) (รุ่น Bell Sorp mini II บริษัท Bel Japan) วิเคราะห์ขนาดผลึกด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) (รุ่น JSM-7800F บริษัท JEOL) วิเคราะห์อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence) (รุ่น XGT5200 บริษัท Horiba) และวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis) (รุ่น TGA/DSC1 บริษัท Mettler Toledo)



รูปที่ 1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Borghet et al., 2015)

การทดสอบการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่

นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเร่งปฏิกิริยาแล้วมาทำการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของอากาศ จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แล้วทำการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาซ้ำภายใต้สภาวะการทดลองเดิม

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

ชนิดของซีโอไลต์

จากการศึกษาการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลเป็นน้ำมันไบโอเจ็ท โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตำแหน่งที่ว่างไว้เป็นกรด ได้แก่ HZSM-5, HMordenite, HBeta และ HY ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	% การเลือกสรรผลิตภัณฑ์									
	C ₂ ⁼		C ₃ ⁼		C ₄ ⁺		BTEX		A ₉ ⁺	
	Initial	6 h	Initial	6 h	Initial	6 h	Initial	6 h	Initial	6 h
HZSM-5(15)	5.92	8.72	24.91	27.75	24.33	34.32	5.19	4.75	39.65	24.46
HMordenite(15)	76.11	99.89	14.75	0.11	6.30	0.00	0.19	0.00	2.65	0.00
HBeta(14)	90.02	99.02	3.80	0.56	4.53	0.4	0.15	0.00	1.51	0.01
HY(7.5)	99.78	99.80	0.16	0.05	0.06	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00

% การเปลี่ยนแปลงเอทานอล = 100 %

สภาวะการทดลอง: อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน 21.12 นาที่ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 1 พบว่าซีโอไลต์ที่มีตำแหน่งที่ว่างไวเป็นกรดสามารถเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลเป็นน้ำมันไบโอเจ็ทได้ โดยให้ % การเปลี่ยนแปลงเอทานอลเท่ากับ 100% และให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นเอทิลีน (C₂⁼) โพรพิลีน (C₃⁼) สารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 4 อะตอมที่ไม่มีโครงสร้างแบบแอโรมาติกส์ (C₄⁺) เบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน ซิลีน (BTEX) และสารแอโรมาติกส์ที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 9 อะตอม (A₉⁺) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5(15) ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเป็น 15 ให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น C₂⁼ ต่ำ เนื่องจาก C₂⁼ สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื้อให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น C₄⁺, BTEX และ A₉⁺ เพิ่มขึ้น (รูปที่ 1) ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HMordenite(15), HBeta(14) และ HY(7.5) ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมใกล้เคียงกันและต่ำกว่า พบว่าให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น C₂⁼ สูง แต่ให้สารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (C₄⁺, BTEX และ A₉⁺) ต่ำ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการเร่งปฏิกิริยาโอลิโกเมโรเซชันของ C₂⁼ มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบรีเดียล-เอลลี (Rideal-Eley mechanism) ซึ่ง C₂⁼ จะถูกโปรโตเนชัน (Protonation) ด้วยตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นคาร์โบแคตไอออน จากนั้น C₂⁼ ที่อยู่ในสถานะแก๊สจะเข้าทำปฏิกิริยา (Ding et al., 2009) ถ้า C₂⁼ ที่อยู่ในสถานะแก๊สมีโอกาสที่จะเข้าใกล้กับ C₂⁼ ที่ถูกโปรโตเนชันมาก ปฏิกิริยาก็จะเกิดมากขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 มีรูพรุนขนาด 0.54 x 0.56 นาโนเมตร ซึ่งมีรูพรุนที่เล็กส่งผลให้ C₂⁼ เกิดปฏิกิริยาต่อเนื้อได้ง่ายให้สารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HMordenite(15), HBeta(14) และ HY(7.5) มีรูพรุนขนาด 0.67 x 0.70, 0.66 x

0.77 และ 0.72 นาโนเมตรตามลำดับ ซึ่งมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นโอกาสที่ C₂⁼ จะเกิดปฏิกิริยาโอลิโกเมโรเซชันนั้นยากขึ้น (Bhatia, 1990) จึงให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็น C₂⁼ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนเหมาะสมสามารถเปลี่ยน C₂⁼ ให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นได้ และมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับผลิตน้ำมันไบโอเจ็ท จากการศึกษาวิจัยของ Sujeerakulkai and Jitkarnka (2016) พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HBeta ให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารไฮโดรคาร์บอน A₉⁺ สูง เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามาก (ค่าอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อนประมาณ 158 นาที่) แต่ในการทดลองนี้ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HBeta ให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในสภาวะการทดลองเดียวกัน โดยเมื่อทำการทดลองเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HBeta โดยการเพิ่มอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อนจาก 21.12 เป็น 42.24 นาที่ พบว่าให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์ A₉⁺ เพิ่มขึ้นจาก 1.51% เป็น 8.75% แต่ยังมีค่าน้อยกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 จากผลการทดลองดังกล่าวจึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 สำหรับการศึกษาอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสำหรับการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อไป

อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	%การเลือกสรรผลิตภัณฑ์									
	C ₂ ⁻		C ₃ ⁻		C ₄ ⁺		BTEX		A ₉ ⁺	
	Initial	6 h	Initial	6 h	Initial	6 h	Initial	6 h	Initial	6 h
HZSM-5(11)	7.17	9.67	22.63	31.68	19.96	31.98	5.16	3.43	45.04	23.25
HZSM-5(15)	5.92	8.72	24.91	27.75	24.33	34.32	5.19	4.75	39.65	24.46
HZSM-5(25)	22.18	29.90	26.29	24.40	30.36	30.90	3.26	2.77	17.92	12.50
HZSM-5(28)	13.00	30.40	29.50	30.80	31.10	22.20	3.82	2.47	22.60	14.10
HZSM-5(40)	38.60	58.80	24.80	18.20	27.30	15.80	2.31	1.31	7.00	5.88
HZSM-5(122)	98.80	99.40	0.57	0.24	0.57	0.35	0.02	0.00	0.01	0.00
HZSM-5(140)	98.60	98.40	0.63	0.78	0.77	0.54	0.01	0.05	0.01	0.19
HZSM-5(188)	99.20	99.00	0.26	0.33	0.57	0.63	3.08	0.00	0.00	0.00

% การเปลี่ยนแปลงเอทานอล = 100 %

สภาวะการทดลอง: อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน 21.12 นาที่ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

รหัสการค้าของซีโอไลต์	บริษัท	ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดผลึก (ไมโครเมตร)
CBV2314	Zeolyst	HZSM-5(11)	425	0.8-1.0
CBV3024E	Zeolyst	HZSM-5(15)	405	0.5-2.0
PZ-2/25H	Zeocat	HZSM-5(25)	400	0.1-0.2
CBV5524G	Zeolyst	HZSM-5(28)	425	0.5-0.8
CBV8014	Zeolyst	HZSM-5(40)	425	0.5-2.0
TZP-2525	Tricat	HZSM-5(122)	425	3.0-3.5
CBV28014	Zeolyst	HZSM-5(140)	400	0.5-2.0
PZ-2/500H	Zeocat	HZSM-5(188)	400	0.5-1.5

จากตารางที่ 2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำทำให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น C₂⁻ ต่ำ เนื่องจาก C₂⁻ สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื้อเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพิ่มขึ้น โดยให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์ A₉⁺ มากถึง 45.04% เมื่อใช้ซีโอไลต์ HZSM-5(11) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำจะมีจำนวนอะลูมิเนียมมากทำให้มีตำแหน่งกรดมาก (Liu et al., 2017) เป็นผลให้ C₂⁻ ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลสามารถเกิดปฏิกิริยาโอลิโกเมโรเซชัน และปฏิกิริยาต่อเนื้ออื่นๆ ได้มากขึ้น (รูปที่ 1) ซึ่งปฏิกิริยาโอลิโกเมโรเซชันเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากเกิดผ่านสารตัวกลางชนิดคาร์โบแคตไอออนชนิดปฐมภูมิ (Primary carbocation) ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องมีปริมาณกรดมากเพียงพอ (Talukdar, 1997) เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณกรดมากเพียงพอที่จะสามารถเปลี่ยน C₂⁻ เป็นสารไฮโดรคาร์บอน

C₄⁺ มากขึ้น ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอน C₄⁺ ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิง (Reforming) หรือแอโรมาไทเซชัน (Aromatization) ให้ผลิตภัณฑ์เป็นแอโรมาติกส์ BTEX และสารแอโรมาติกส์ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาแอลคิลเลชัน (Alkylation) และทรานส์แอลคิลเลชัน (Transalkylation) ได้สารไฮโดรคาร์บอนที่เป็น A₉⁺ (รูปที่ 1) ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้เป็นน้ำมันไบโอดีเซล ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณกรดมากจะให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น A₉⁺ เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูง ซึ่งมีปริมาณกรดต่ำจะให้ C₂⁻ เป็นผลิตภัณฑ์หลัก เพราะไม่มีตำแหน่งกรดที่เพียงพอที่จะสามารถเร่งปฏิกิริยาโอลิโกเมโรเซชันของ C₂⁻ ได้

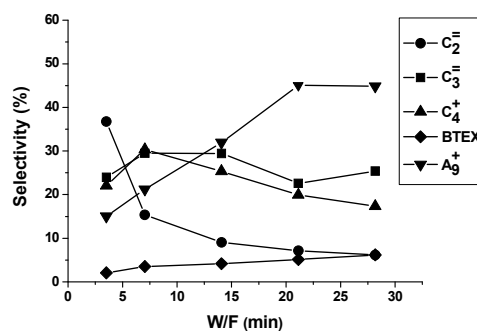
มากไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่ใกล้เคียงกันได้แก่ HZSM-5(25) และ HZSM-5(28) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา

HZSM-5(28) ให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น A_9^+ 22.60% ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(25) ให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น A_9^+ เพียง 17.92% เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(25) และ HZSM-5(28) ไปวิเคราะห์ขนาดผลึก พบว่ามีขนาดผลึกที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 3) โดยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(28) มีขนาดผลึกที่ใหญ่กว่า (0.5-0.8 ไมโครเมตร) ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(25) (0.1-0.2 ไมโครเมตร) ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่ากลไกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์ A_9^+ เป็นปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดผลึกใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องได้เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang et al. (2017) ซึ่งพบว่าการเพิ่มขนาดผลึกส่งผลต่อการเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น A_9^+ สูง เนื่องจากมีเวลานานในการทำปฏิกิริยาในผลึก (Longer intra-crystalline residence time) เมื่อพิจารณาถึงความแรงกรด (Acid strength) ต่อประสิทธิภาพการเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น A_9^+ พบว่ามีรายงานวิจัยของ Gao et al. (2016) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความแรงกรดสูงจะให้การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็นแอโรมาติกส์สูง อย่างไรก็ตามในกรณีของตัวเร่ง

ปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ใช้ในการทดลองนี้ (Si/Al ในช่วง 11-188) จะมีความแรงกรดที่ไม่แตกต่างกัน ดังที่ Xu et al. (2007) รายงานว่าความแรงของกรดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมจนถึงประมาณ 5 จากนั้นค่าความแรงกรดจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม ทำให้เชื่อมั่นว่าในงานวิจัยนี้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น A_9^+ ถูกกำหนดโดยปริมาณตำแหน่งกรดที่ว่างไว้ จากผลการทดลองในตารางที่ 2 จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5(11) ในการศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะอื่นๆ ต่อไป

อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อนต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อนในการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น โดยศึกษาที่ 3.52 7.04 14.08 21.12 และ 28.17 นาที ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 2



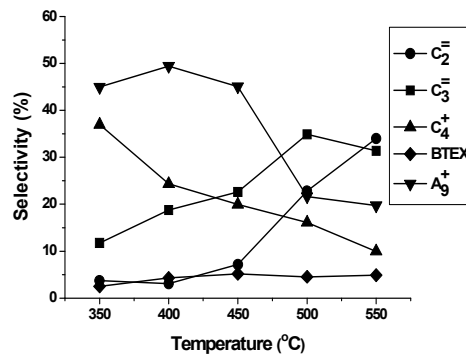
รูปที่ 2 อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อนต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) สภาวะการทดลอง: เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 2 พบว่าที่อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อนต่ำ หรือเวลาสัมผัสต่ำ (Contact time) ให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น C_2^- 36.7 และ A_9^+ 15.1% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน หรือเพิ่มเวลาในการสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า % การเลือกสรร C_2^- ลดลง ในขณะที่ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น C_3^- , C_4^+ , BTEX และ A_9^+ เพิ่มขึ้นในช่วงแรก และเมื่อเพิ่มเวลาในการสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น C_4^+ มีค่าลดต่ำลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในช่วง

น้ำมันไบโอเจ็ทเป็นปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง และอาจเกิดปฏิกิริยาเป็นสารแอโรมาติกส์ผ่านกลไกการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิง ซึ่งเวลาในการสัมผัสระหว่างสารตั้งต้น และตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจะทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น โดยการเปลี่ยนเวลาสัมผัสทำให้ทราบถึงทิศทางในการดำเนินไปของปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลเป็นสารไฮโดรคาร์บอน (รูปที่ 1)

อุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาที่ 350 400 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11)

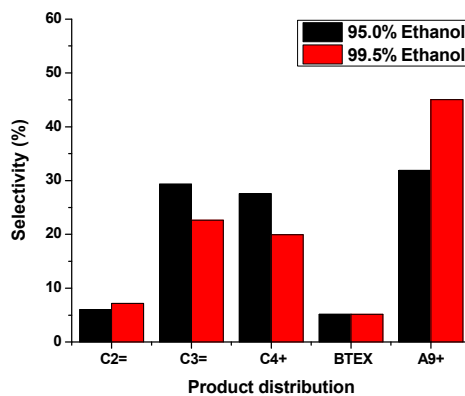
สภาวะการทดลอง: อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน 21.12 นาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

จากรูปที่ 3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 350 เป็น 400 องศาเซลเซียส ให้การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น A₉⁺ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ C₂= สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส พบว่า % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น C₂= สูงขึ้น แต่ A₉⁺ ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาโอลิโกเมอไรเซชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ที่อุณหภูมิสูง C₂= จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาโอลิโกเมอไรเซชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ผลิตภัณฑ์ C₄⁺ ลดลง และเป็นผลทำให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น A₉⁺ ลดลง แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่า % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์

เป็น C₂= เพิ่มขึ้นมาก แต่ยังคงให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น BTEX และ A₉⁺ สูง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงกลไกการเร่งปฏิกิริยาการเกิดผลิตภัณฑ์เป็น BTEX และ A₉⁺ มีลักษณะที่แตกต่างไปจากเดิม กล่าวคือโอเลฟินส์ขนาดเล็กที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกสลาย (Cracking) สามารถเกิดปฏิกิริยาเอโรมาไทเซชันให้ผลิตภัณฑ์เป็น BTEX และ A₉⁺ (รูปที่ 1) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีผลอย่างมากต่อทิศทางการเกิดปฏิกิริยา

ความเข้มข้นของเอทานอลต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของเอทานอลที่ 95.0 และ 99.5 % โดยปริมาตร ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความเข้มข้นของเอทานอลต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11)

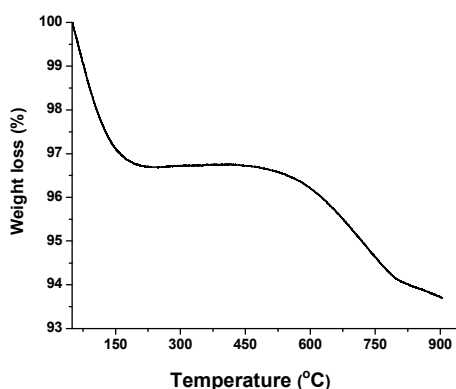
สภาวะการทดลอง: อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน 21.12 นาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4 เมื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) เมื่อใช้เอทานอลที่มีความเข้มข้น 95.0 % โดยปริมาตรเป็นสารป้อน พบว่าเมื่อสารป้อนมีปริมาณน้ำมากขึ้น (ซึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และเป็นสารป้อนร่วม) ให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์เป็น A_9^+ ลดลงจาก 45.01 เป็น 31.91 % เนื่องจากโมเลกุลของน้ำจะไปดูดซับบนตำแหน่งที่ว่างไว้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา และขัดขวางการดูดซับของ C_2^- และสารอินเตอร์มีเดียอื่น ๆ ทำให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาลดลง อย่างไรก็ตามการใช้เอทานอลที่มีความเข้มข้น 95.0 % โดยปริมาตรเป็นสารป้อนสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอเจ็ท

โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5(11) พบว่ายังคงมีประสิทธิภาพสูงในการเร่งปฏิกิริยา

การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่

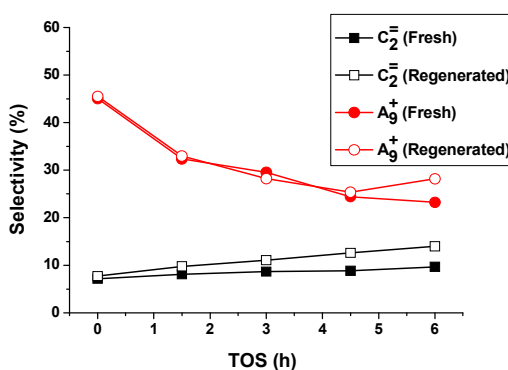
จากการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลพบว่าเมื่อเวลาในการเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากการสะสมตัวของสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ทำให้ขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่างไว สอดคล้องกับผลการทดลองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักด้วยความร้อนดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เทอร์โมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

จากรูปที่ 5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) ที่ผ่านการใช้งานแล้วมีการสลายตัวของสารในช่วงอุณหภูมิ 50-270 องศาเซลเซียส โดยมีการสูญเสียน้ำหนัก 3.04 % ซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวของน้ำที่ดูดซับบนพื้นผิว หรือสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และในช่วงอุณหภูมิ 450-780 องศาเซลเซียส โดยมีการสูญเสียน้ำหนัก 2.68 % ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่คงค้างภายในรูพรุนของซีโอไลต์ และเป็นผล

ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ ดังนั้นการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) มาทำการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา และทำการทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาซ้ำ ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) ที่นำกลับมาใช้ใหม่

สภาวะการทดลอง: อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน 21.12 นาที อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 6 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) ภายหลังจากการฟื้นฟูสภาพ (Regenerated catalyst) มีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ผ่านการทดสอบการเร่งปฏิกิริยา (Fresh catalyst) โดยให้ % การเลือกสรรผลิตภัณฑ์ $C_2^=$ และ A_9^+ ใกล้เคียงกัน จากการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อทำการฟื้นฟูสภาพจะได้ตำแหน่งกรดที่ว่างไว้ในกรังการเร่งปฏิกิริยาที่กลับคืนมาที่สามารถให้สารตั้งต้นเข้าทำปฏิกิริยาได้ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเอทานอลเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในช่วงน้ำมันไบโอเจ็ท และสามารถฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของน้ำมันที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11)

Product distribution	Percentage
Gas composition	
Ethylene	7.17
Propylene	22.63
LPG	16.60
Liquid composition	
Gasoline (<200 °C)	8.55
Jet fuel (200-250 °C)	43.77
Gas oil (250-370 °C)	1.27

สภาวะการทดลอง: อัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน 21.12 นาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4 พบว่าการเร่งปฏิกิริยาโดย HZSM-5(11) ให้ปริมาณของน้ำมันไบโอเจ็ทจำนวน 43.77 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังให้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารป้อนในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีสำหรับผลิตยา เครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ได้

สรุปผลการวิจัย

การเปลี่ยนเอทานอลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีสมบัติเป็นกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 มีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าซีโอไลต์ชนิด HBeta, HMordenite และ HY เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นผลทำให้เอทิลีนเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้ง่าย และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 11 มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูง และให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันไบโอเจ็ทจำนวน 43.77 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีปริมาณกรดมากจึงสามารถเร่ง

วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเร่งปฏิกิริยา

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ในส่วนหนึ่งของของเหลว (Liquid composition) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของเอทานอล 99.5 % โดยปริมาตร และอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อน 21.12 นาที ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatography) (รุ่น GC7890A บริษัท Agilent) เพื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ตามช่วงของไฮโดรคาร์บอนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ให้ผลดังตารางที่ 4

ปฏิกิริยาโอลิโกเมโรเซชัน และปฏิกิริยาต่อเนื่องอื่นๆ ได้เพิ่มขึ้นให้ % การเลือกสรรสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิ และเวลาในการสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา โดยเมื่อใช้สารป้อนที่มีความเข้มข้นของเอทานอลต่ำลงที่ 95.0 % โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) จะให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาลดต่ำลง เมื่อพิจารณาถึงทิศทางการเกิดปฏิกิริยาพบว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส สารแอมโรมาติกส์ที่ได้มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นผ่านปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่ง ในขณะที่การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส สารแอมโรมาติกส์ที่ได้มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นผ่านปฏิกิริยาแอมโรมาไทเซชัน มากไปกว่านั้นตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5(11) มีประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานที่ให้
ความอนุเคราะห์ทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Bhatia, S. (1990). Zeolite Catalysis: Principles and Applications. Boca Raton: CRC Press. pp. 222-226.
- Borghet, K. V., Galvita, V. V. and Marin, G. B. (2015). Ethanol to higher hydrocarbons over Ni, Ga, Fe-modified ZSM-5: Effect of metal content. *Applied Catalysis A: General* 504: 621-630.
- Ding, X., Geng, S., Li, C., Yang, C. and Wang, G. (2009). Effect of acid density of HZSM-5 on the oligomerization of ethylene in FCC dry gas. *Journal of Natural Gas Chemistry* 18: 156-160.
- Gao, Y., Zheng, B., Wu, G., Ma, F. and Liu, C. (2016). Effect of the Si/Al ratio on the performance of hierarchical ZSM-5 zeolites for methanol aromatization. *RSC Advances* 6(87): 83581-83588.
- Inaba, M., Murata, K., Saito, M. and Takahara, I. (2006). Ethanol conversion to aromatic hydrocarbons over several zeolite catalysts. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters* 88: 135-142.
- Kumabe, K., Sato, T., Matsumoto, K., Ishida, Y. and Hasegawa, T. (2010). Production of hydrocarbons in Fischer-Tropsch synthesis with Fe-based catalyst: Investigations of primary kerosene yield and carbon mass balance. *Fuel* 89: 2088-2095.
- Liu, C., Tranca, I., Santen, R. A., Hensen, E. J. M. and Pidko, E. A. (2017). Scaling relations for acidity and reactivity of zeolites. *The Journal of Physical Chemistry C* 121: 23520- 23530.
- Liu, D., Liu, Y., Goh, E. Y. L., Chu, C.J.Y., Gwie, C. G. and Chang, J. (2016). Catalytic conversion of ethanol over ZSM-11 based catalysts. *Applied Catalysis A: General* 523: 118-129.
- Liu, Q., Zuo, H., Zhang, Q., Wang, T. and Ma, L. (2014). Hydrodeoxygenation of palm oil to hydrocarbon fuels over Ni/SAPO-11 catalysts. *Chinese Journal of Catalysis* 35: 748-756.
- Moon, S., Chae, H.-J. and Park, M. B. (2019). Dehydration of bioethanol to ethylene over H-ZSM-5 catalysts: A scale-up study. *Catalysts* 186(9): 1-12.
- Sousa, Z. S. B., Veloso, C. O., Henriques, C. A. and Teixeira da Silva, V. (2016). Ethanol conversion into olefins and aromatics over HZSM-5 zeolite: Influence of reaction conditions and surface reaction studies. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 422: 266-274.
- Sujeerakulkai, S. and Jitkarnka, S. (2016). Bio-based hydrocarbons and oxygenates from catalytic bio-ethanol dehydration: comparison between gallium and germanium oxides as promoters on HBeta zeolites with various silica to alumina ratios. *Journal of Cleaner Production* 111: 51-61.
- Talukdar, A. K., Bhattacharya, K. G. and Sivasanker, S. (1997). H-ZSM-5 catalyzed conversion of aqueous ethanol to hydrocarbons. *Applied Catalysis A: General* 148(2): 357-371.
- Xu, B., Bordiga, S., Prins, R. and Bokhoven, J. A. (2007). Effect of framework Si/Al ratio and extra-framework aluminum on the catalytic activity of Y zeolite. *Applied Catalysis A: General* 333(2): 245-253.
- Yang, L., Liu, Z., Liu, Z., Peng, W., Liu, Y. and Liu, C. (2017). Correlation between H-ZSM-5 crystal size and catalytic performance in the methanol-to-aromatics reaction. *Chinese Journal of Catalysis* 38: 683-690.
- Zarchin, R., Rabaev, M., Vidruk-Nehemya, R., Landau, M. V. and Herskowitz, M. (2015). Hydroprocessing of soybean oil on nickel-phosphide supported catalysts. *Fuel* 139: 684-691.

