

การทบทวนงานวิจัย : การเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโซลคีตอล A Review: Conversion of Glycerol to Solketal

ณัฐนันท์ เรือนคำจันทร์¹ พชรภา กิติมา¹ สุจินดา แสงสารวัต¹ และ ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร^{1*}

Natthanant Ruenkhamchan¹ Patcharapa Kitima¹ Sujinda Sangsarawatt¹ and Pesak Rungrojchaipon¹

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

¹Department of Chemistry, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

วันที่ส่งบทความ : 22 สิงหาคม 2564 วันที่แก้ไขบทความ : 29 ธันวาคม 2564 วันที่ตอบรับบทความ : 19 ตุลาคม 2565

Received: 22 August 2021, Revised: 29 December 2021, Accepted: 19 October 2022

บทคัดย่อ

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพสำคัญที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ โดยให้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ เนื่องจากการผลิตไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กลีเซอรอลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าและมีราคาสูงขึ้น ซึ่งการสังเคราะห์โซลคีตอลจากกลีเซอรอลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของกลีเซอรอล โดยบทความนี้ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์โซลคีตอลจากกลีเซอรอลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ เช่น เรซิน ซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง แร่ดินเหนียว ซีโอไลต์แบบลำดับชั้น ถ่านกัมมันต์ และสภาวะในการทดลองที่แตกต่างกันจากงานวิจัยต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนกลีเซอรอลและการเลือกเกิดเป็นโซลคีตอลอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : กลีเซอรอล แอซีโตน โซลคีตอล ไบโอดีเซล ถ่านกัมมันต์

Abstract

Biodiesel is becoming an important biofuel that gain worldwide attention. It is normally produced through the transesterification of triglyceride with alcohol, yielding glycerol as the by-product. As a drawback, increase in biodiesel production has lead to an increase in availability of glycerol. Therefore, there are many research topics focused on the study of converting glycerol into a more valuable and higher price product. The synthesis of solketal from glycerol is another option to increase the value of glycerol. This article has gathered information related to the synthesis of solketal from glycerol using catalysts such as resin, mesoporous silica, clay minerals, hierarchical zeolite, activated carbon and different

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: pesak.ru@kmitl.ac.th

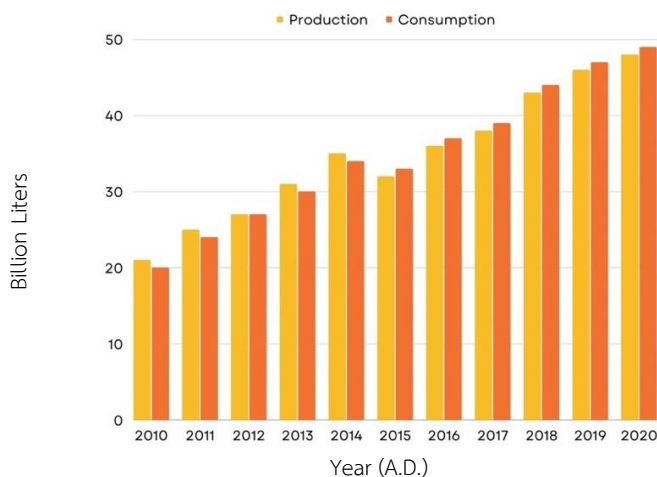
experimental conditions from various research, to achieve effective conversion of glycerol and selectivity of solketal.

Keywords: Glycerol, Acetone, Solketal, Biodiesel, Activated carbon

1. บทนำ

เนื่องจากความต้องการเชื้อเพลิงชีวภาพและอุตสาหกรรมไบโอดีเซลที่มีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง ทำให้คาดการณ์ว่าความต้องการของการใช้โซลคิตอล (Solketal) ในตลาดโลกมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น โดยจากการศึกษาพบว่าโซลคิตอลถูกใช้เป็นส่วนเติมแต่งเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มค่าออกเทน ใช้เป็นส่วนมัธยันตร์ (Intermediate) ในการสังเคราะห์เบนซิน และอีเทอร์ อีกทั้งยังใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ [1]

โซลคิตอลถูกใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในด้านการประยุกต์ใช้งาน กลุ่มที่เป็นตัวทำละลายในเชิงปริมาณมีส่วนแบ่งในการตลาดมากที่สุด 74.37% ในปี ค.ศ. 2018 ในขณะที่กลุ่มที่ใช้เป็นส่วนมัธยันตร์ทางเภสัชกรรมคิดเป็น 7.89% กล่าวคือ ในอีกไม่กี่ปีข้างหน้าอุตสาหกรรมโซลคิตอลจะยังคงเป็นที่ต้องการสูงในตลาดโลกอย่างมีนัยสำคัญ [2]



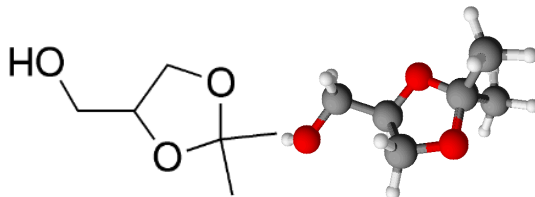
รูปที่ 1. กราฟแสดงความต้องการใช้และการผลิตไบโอดีเซลในตลาดโลก [3]

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงความต้องการใช้และการผลิตไบโอดีเซลในตลาดโลกเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ เนื่องจากไบโอดีเซลถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ส่งผลให้ปริมาณการใช้ทั่วโลกเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 11% ต่อปี ขณะที่ในช่วงเวลาเดียวกันปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 10% ต่อปี ซึ่งในการผลิตไบโอดีเซลแต่ละครั้งจะมี กลิเซอรอลดิบเกิดขึ้น 10% ของปริมาณไบโอดีเซลทั้งหมด และกลีเซอรอลดิบที่เกิดขึ้นจะกลายเป็นขยะทางอุตสาหกรรม [3]

ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงทำการทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ของกลีเซอรอลจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยการหาวิธีเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่ามากขึ้น และวิธีที่คณะผู้จัดทำสนใจคือการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโซลคีตอล เนื่องจากโซลคีตอลนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมได้อย่างหลากหลาย

1.1 โซลคีตอล (Solketal)

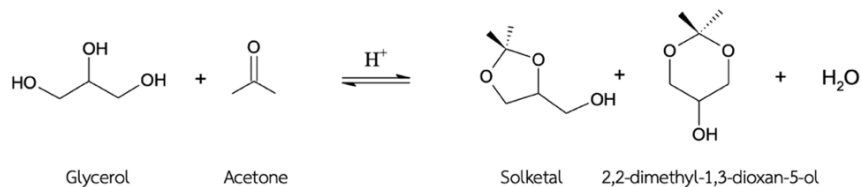
โซลคีตอลหรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Isopropylidene Glycerol จัดเป็นอนุพันธ์ของกลีเซอรอล มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นสารเติมแต่งเชื้อเพลิงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของไบโอดีเซล มีชื่อทางเคมีว่า 2,2-dimethyl-1,3-dioxolane-4-methanol สูตรโมเลกุลคือ $C_6H_{12}O_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 132.16 กรัมต่อโมล และมีโครงสร้างโมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 2 โซลคีตอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคีโตนที่ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ในสภาวะกรด มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสีไม่มีกลิ่น มีความหนืดต่ำที่อุณหภูมิห้อง [1] เป็นตัวทำละลายและสารตั้งต้นที่มีจุดเดือดค่อนข้างสูง สามารถละลายได้ดีทั้งในน้ำ แอลกอฮอล์ อีเทอร์ และไฮโดรคาร์บอน [4]



รูปที่ 2. โครงสร้างของโซลคีตอล [4]

1.2 การสังเคราะห์โซลคีตอลจากกลีเซอรอล

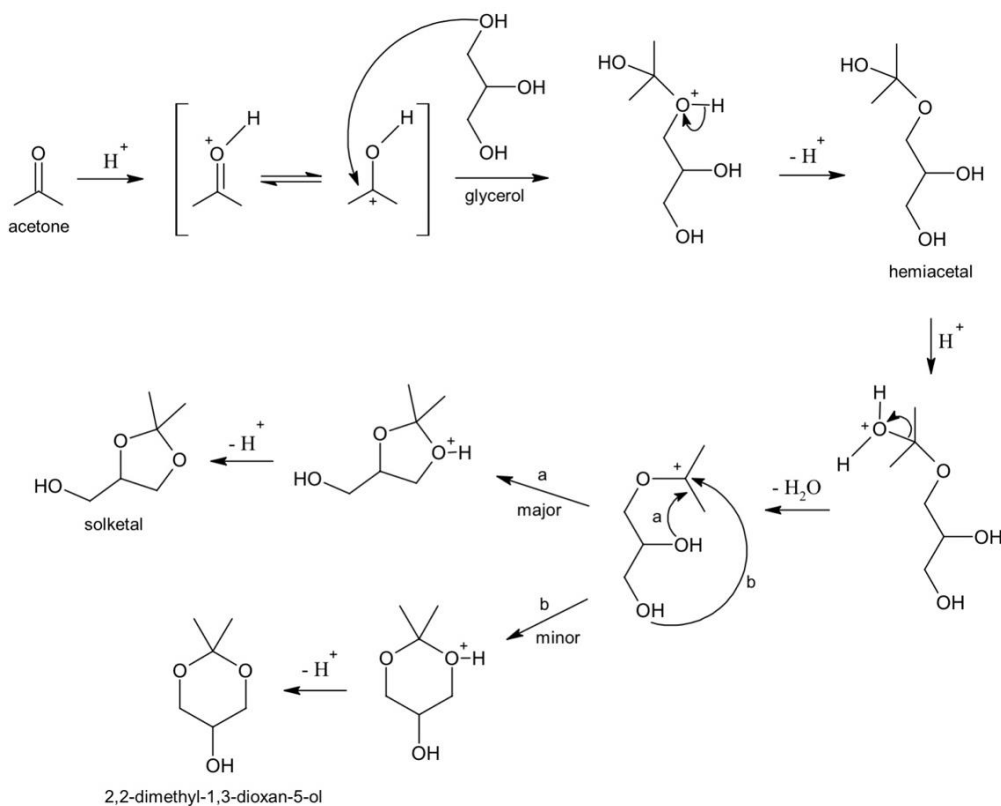
ในการผลิตโซลคีตอลสามารถผลิตได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับแอซีโตน จากงานวิจัยของ Cornejo, A. และคณะ [5] ได้กล่าวถึงปฏิกิริยาคีทไลเซชัน (Ketalization) ระหว่างกลีเซอรอลกับแอซีโตนโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ (Heterogeneous Catalysts) ดังแสดงในรูปที่ 3 ในปฏิกิริยานี้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นโซลคีตอล และผลิตภัณฑ์ร่วมคือ 2,2-dimethyl-1,3-dioxan-5-ol และน้ำ ข้อดีของปฏิกิริยานี้คือมีความจำเพาะในการเกิดโซลคีตอลสูง และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยต่ำ



รูปที่ 3. ปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับแอซีโตน [5]

1.3 กลไกการสังเคราะห์โซลคีตอลจากกลีเซอรอลและแอซีโตน

กลไกการสังเคราะห์โซลคีตอลจากกลีเซอรอลเริ่มจากการเติมโปรตอน (Protonation) ให้กับออกซิเจนอะตอมของหมู่คาร์บอนิลที่อยู่ในรูปแอซีโตนเกิดเป็นออกโซเนียม (Oxonium) จากนั้นเกิดการเรโซแนนซ์ของออกโซเนียมเกิดเป็นคาร์บีนียมไอออน (Carbenium Ion) และไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary Hydroxyl) ที่ทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophile) จะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บีนียมไอออน (Carbenium Ion) ที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรไฟล์ (Electrophile) และมีการขจัดโปรตอนออกเกิดเป็นเฮมิแอซีทัล (Hemiacetal) จากนั้นเกิดการเติมโปรตอนและขจัดน้ำออกจากโมเลกุลเกิดเป็นคาร์บีนียมไอออนทุติยภูมิอีกรูปแบบหนึ่ง ในระหว่างการทำปฏิกิริยามีนิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic) สองตำแหน่งภายในโมเลกุล โดยมาจากหมู่ไฮดรอกซิลปฐมภูมิและไฮดรอกซิลทุติยภูมิ จากนั้นทำการขจัดโปรตอนเพื่อทำให้เกิดเป็นโซลคีตอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลัก และมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคือ 2,2-dimethyl-1,3-dioxan-5-ol ดังแสดงในรูปที่ 4 [6]



รูปที่ 4. กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ไล่โซลคีตอลของกลีเซอรอลกับแอซีโตน [6]

2. การสังเคราะห์โซลคีตอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การสังเคราะห์โซลคีตอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่มีคุณสมบัติเป็นกรด [7] มีข้อได้เปรียบในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย จากการศึกษาอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) พบว่าปฏิกิริยาการเกิดโซลคีตอลเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน และจากจลนศาสตร์เคมี (Chemical Kinetics) พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโทน [8]

ตารางที่ 1. สภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์โซลคีตอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรซิน

Reactant	Molar Ratio	Catalyst	Catalyst Loading	Temperature (°C)	Reaction Time	Conversion (%)	Selectivity (%)	Reference
Gly: Ace	1:20	DT-851 sulfonic Acid resin	5 wt. %	58	2 h	95	99	[9]
Gly: Ace	1:6	Amberlyst-46	1% w/w	60	30 min	84	97	[10]
Gly: Ace	-	Amberlyst-36	0.9 g	25	1 h	85-97	99	[11]
Gly: Ace	1:20	Amberlyst-15	7 g	50	96 min	92	96	[12]

หมายเหตุ : Conversion (%) หมายถึง ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล

Selectivity (%) หมายถึง ค่าร้อยละการเลือกเกิดของโซลคีตอล

ในปี ค.ศ. 2013 Yang, J. และคณะ [9] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ โซลคีตอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลโฟนิกแบบเรซิน DT-851 (DT-851 Sulfonic Acid Resin) เริ่มจากแช่เรซิน DT-851 ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10% ซ้ำมคิน จากนั้นทำให้แห้งในระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ นำตัวเร่งปฏิกิริยาเรซิน DT-851 ในปริมาณที่แตกต่างกันตั้งแต่ 1-5% โดยน้ำหนัก เติมลงในขวดก้นกลมสามคอขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโทนตั้งแต่ 1:10-1:30 และต่อเข้ากับคอนเดนเซอร์ จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 52-64 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 1-3 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจะได้ผลิตภัณฑ์ใสไม่มีสี หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปกรองตัวเร่งปฏิกิริยาออก และกำจัดแอซีโทนโดยใช้เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน โดยที่สภาวะที่ดีที่สุดมีการเปลี่ยนกลีเซอรอลสูงถึง 95% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคีตอล 99%

ในปี ค.ศ. 2016 Ilgen, O. และคณะ [10] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ โซลคีตอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Amberlyst-46 ปริมาณที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0.5-5.0% โดยน้ำหนัก เติมลงในขวดก้นกลมสามคอขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโทนตั้งแต่ 1:1-1:9 และต่อเข้ากับคอนเดนเซอร์ จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 1-300 นาที และปั่นกวที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที โดยที่สภาวะที่ดีที่สุดมีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 84% ซึ่งอาจเกิดจากเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเร็วเกินไปจึงทำให้มีการเปลี่ยนกลีเซอรอลต่ำกว่า 90% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคีตอล 97%

ในปี ค.ศ. 2016 Guidi, S. และคณะ [11] ศึกษาและเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรซิน Amberlyst-36 (A36) และ $\text{AlF}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (AF) ในการสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์จากกลีเซอรอล พบว่าที่ความดัน 10 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา AF ต้องใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงถึง 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเทียบเท่ากับตัวเร่งปฏิกิริยา A36 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากความแรงของกรดแก่ที่เป็น Bronsted acid ที่รุนแรงของเรซิน A36 เมื่อเทียบกับความแรงของกรดอ่อนที่เป็น Lewis acid ของ AF จึงทำให้ A36 มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงที่อุณหภูมิต่ำ

ในปี ค.ศ. 2016 Oliveira, P.A. และคณะ [12] ศึกษาการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโพลีเอสเตอร์ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรซิน Amberlyst-15 โดยการกระตุ้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการไหลแบบต่อเนื่องที่ความดันบรรยากาศ โดยหากทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศจะต้องจำกัดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้ต่ำกว่าจุดเดือดของเอซีโตนเล็กน้อย เพื่อป้องกันเอซีโตนที่เป็นสารตั้งต้นระเหยกลายเป็นไออย่างรวดเร็วในระหว่างการทำปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนกลีเซอรอล 92% และมีการเลือกเกิดเป็นโพลีเอสเตอร์ 96% โดยใช้ Amberlyst-15 ปริมาณ 7 กรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อเอซีโตนเท่ากับ 1:20 และใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์เป็นตัวทำละลาย

จากตารางที่ 1 เป็นการรวบรวมสภาวะต่าง ๆ ในการสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์จากบทความวิจัย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรซิน จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรซินมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่า 80% โดยคุณสมบัติที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาคือความเป็นกรดแบบ Bronsted acid ที่อยู่บนพื้นผิวและโครงสร้างของเรซิน แม้ว่า Amberlyst-46 และ Amberlyst-36 จะเป็นวัสดุที่คล้ายคลึงกัน แต่เรซินทั้งสองประเภทมีปริมาณของกรดและโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน หากตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณของกรดซัลโฟนิกสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ไม่เพียงแต่จะสามารถปรับปรุงการเลือกเป็นโพลีเอสเตอร์ได้เท่านั้น แต่ยังสามารถเปลี่ยนกลีเซอรอลให้สูงกว่า 90% อีกทั้งยังพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อเอซีโตน เวลา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์โพลีเอสเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ถ้าหากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไปหรือใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง

ตารางที่ 2. สภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง

Reactant	Molar Ratio	Catalyst	Catalyst Loading	Temperature (°C)	Reaction Time	Conversion (%)	Selectivity (%)	Reference
Gly: Ace	1:6	Arenesulfonic acid functionalized meso structured silica	5 wt. %	70	30 min	84	81	[13]
Gly: Ace	1:2	Zr-TUD-1 and Hf-TUD-1	25 mg	80	6 h	64-65	-	[14]
Gly: Ace	1:5	A sulfonic acid functionalized mesoporous polymer (MP-SO ₃ H-24)	0.5 wt. %	30	30 min	94	98.5	[15]
Gly: Ace	1:6	Cs 2.5/KIT-6	5 wt. %	25	15 min	95	98	[16]

ในปี ค.ศ. 2010 Vicente, G. และคณะ [13] ศึกษาการใช้ซิลิกาที่มีโครงสร้างเป็นกรดซัลโฟนิคในการเร่งปฏิกิริยาอีสเทอริฟิเคชันของกลีเซอรอลกับแอซีโตน (Ketalization of Glycerol with Acetone) เพื่อให้ได้ผลผลิตที่เป็นโพลีเอสเตอร์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา Arenesulfonic Acid-Functionalized Mesoporous Silica (Ar-SBA-15) ถูกเตรียมโดยใช้ Tetraethyl Orthosilicate (TEOS), 2-(4-Chlorosulfonylphenyl)-Ethyltrimethoxy Silane (CSPTMS, ABCR) และน้ำ ภายใต้สภาวะที่มีกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor) แบบ 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกจะทำการเติมกลีเซอรอล 5 กรัม แอซีโตน 18.9 กรัม (อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:6) และเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.25 กรัม (5% โดยน้ำหนัก) ลงในขวดก้นกลมขนาด 100 มิลลิลิตร ที่ต่อเข้ากับคอนเดนเซอร์ จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำการปั่นกวนด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ในส่วนของขั้นตอนที่สองเป็นการกำจัดน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาและแอซีโตนที่มากเกินไป โดยการสกัดแบบสุญญากาศ

ในปี ค.ศ. 2012 Li, L. และคณะ [14] ศึกษาและรายงานประสิทธิภาพของ Zirconium Propoxide และ Hafnium Chloride จากการปรับแต่งด้วย TUD-1 โดยใช้วิธีโซลเจล เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโพลีเอสเตอร์ โดย Zr-TUD-1 และ Hf-TUD-1 ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง ถูกนำมาปรับเปลี่ยนซิลิกาให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของโลหะ Hf และ Zr อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองสามารถเปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นโพลีเอสเตอร์ 64-65% โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโตนเท่ากับ 1:2 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ในปี ค.ศ. 2017 Churipard, S.R. และคณะ [15] ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลโฟนิก ($\text{MP-SO}_3\text{H-24}$) ที่มีรูพรุนขนาดกลาง ถูกเตรียมโดยการสังเคราะห์ Polydivinylbenzene โดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ FT-IR พบว่าตำแหน่ง 1045 cm^{-1} พบพันธะ C-S ซึ่งเป็นการยืนยันการยึดเกาะของกรดซัลโฟนิกบนพื้นผิวของซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาคีทิลเลชันในวัฏภาคของเหลวภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลโฟนิก ($\text{MP-SO}_3\text{H-24}$) ทำงานได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่เป็นของแข็งทั่วไป เนื่องจากมีความสามารถในการเข้าถึงบริเวณพื้นผิวที่เป็นกรดมากขึ้น และเกิดการแพร่ของผลิตภัณฑ์ได้ง่ายเนื่องจากมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ ส่งผลให้มีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 94% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคีตอล 98.5% นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรดและความหนาแน่นของพื้นผิวเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2018 Chen, L. และคณะ [16] ศึกษาการทำปฏิกิริยาคีทิลเลชันของกลีเซอรอลกับแอซีโทนเพื่อผลิตโซลคีตอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Cs}_{2.5}\text{H}_{0.5}\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ ($\text{Cs}_{2.5}$) บนตัวรองรับซิลิกา KIT-6 ที่มีรูพรุนขนาดกลาง ที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบผิว (Impregnation Method) จากนั้นนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์โซลคีตอลภายใต้สภาวะไม่รุนแรงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และปราศจากตัวทำละลายทำให้มีความหนืดสูง ซึ่งส่งผลต่อการสัมผัสกันของสารตั้งต้นและพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากตารางที่ 2 เป็นการรวบรวมสภาวะต่าง ๆ ในการสังเคราะห์โซลคีตอลจากบทความวิจัย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลางเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเสถียร มีตำแหน่งกระตุ้น พื้นผิว และขนาดรูพรุนที่เหมาะสมในการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโซลคีตอล อีกทั้งยังมีความไม่ชอบน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการป้องกันการเกิดไฮโดรไลซิสของโซลคีตอล เมื่อนำซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลางไปกระตุ้นด้วยกรดจะส่งผลให้พื้นที่ผิวของซิลิกามีความเป็นกรดสูงถึง 1.88 mmol/g ซึ่งความเป็นกรดบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดโซลคีตอลให้สูงขึ้น

ตารางที่ 3. สภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์โซลคีตอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบแร่ดินเหนียว

Reactant	Molar Ratio	Catalyst	Catalyst Loading	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Reaction Time	Conversion (%)	Selectivity (%)	Reference
Gly: Ace	1:6	K10 Montmorillonite	-	40	4 h	69	68	[17]
Gly: Ace	1:6	$(\text{C}_3\text{H}_7)_4\text{N}^+/\text{PWA}$	3 wt.%	30	2 h	94	98	[18]
Gly: Ace	1:4	Montmorillonite modified by HNO_3	0.010 g	25	10 min	94	95.4	[19]
Gly: Ace	1:2	Aluminum pillared clay	1 wt.%	30	30 min	85	60	[20]

จากตารางที่ 3 เป็นการรวบรวมสภาวะต่าง ๆ ในการสังเคราะห์โซลคีตอลจากบทความวิจัย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบแร่ดินเหนียว เริ่มจากในปี ค.ศ. 2014 Nanda, M.R. และคณะ [17] ศึกษาการ

เปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโซลคิตอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา K-10 Montmorillonite เริ่มจากการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และใช้อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโทนต่อเอทานอล 1:1:2 และ 1:1:6 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแอซีโทนส่งผลให้ผลิตภัณฑ์โซลคิตอลเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าเกิดจากปริมาณแอซีโทนที่มากขึ้นจะสามารถขับเคลื่อนปฏิกิริยาให้ไปข้างหน้าได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยการกำจัดน้ำบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากการดูดซับน้ำไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นการปิดกั้นตำแหน่งกระตุ้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และการเพิ่ม Weight Hourly Space Velocity (WHSV) จาก 4 h^{-1} เป็น 8 h^{-1} ส่งผลให้การเปลี่ยนกลีเซอรอลและการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอลลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซที่เข้ามายังเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามาก ทำให้สารตั้งต้นมีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์น้อยลง โอกาสที่สารตั้งต้นจะสัมผัสกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาจึงลดลง

ในปี ค.ศ. 2015 Sandesh, S. และคณะ [18] ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของผสมระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เตรียมโดยการหยด $(\text{C}_3\text{H}_7)_4\text{N}^+\text{Br}$ และ HPA Hydrates (PWA, SWA และ PMoA) ปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปกรอง และล้างด้วยน้ำ จากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำไปกระตุ้นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้เร่งปฏิกิริยาการควบแน่นของกลีเซอรอลกับแอซีโทนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโทนเท่ากับ 1:6 โดยมีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 94% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอล 98% จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของน้ำที่มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเติมน้ำ 1 โมล พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $(\text{C}_3\text{H}_7)_4\text{N}^+/\text{PWA}$ ทำงานได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่เป็นของแข็งทั่วไป เนื่องจากมีความสามารถในการต้านทานการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับน้ำได้ ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนกลีเซอรอลลดลงเพียงเล็กน้อย

ในปี ค.ศ. 2017 Timofeeva, M.N. และคณะ [19] ศึกษาผลของการใช้กรดไนตริกในการปรับปรุงคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาของ Montmorillonite clay (MM) เพื่อสังเคราะห์โซลคิตอลจากกลีเซอรอลกับแอซีโทน โดยเตรียม MM ปริมาณ 5 กรัม กระตุ้นด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นเวลา 7 วัน ทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งออก ล้างด้วยน้ำ และทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาภายใต้การรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยา MM 0.010 กรัม ผสมกับกลีเซอรอล 0.20 กรัม และแอซีโทน 0.59 กรัม ในตัวกลางที่เป็นแอซีโตนไนโตรส 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่งผลให้มีการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอล 95.4% และมีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 94% โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรดของ Bronsted acid เมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกเพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อีกทั้งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2020 Zahid, I. และคณะ [20] ศึกษาการทำคีตไลเซชันของกลีเซอรอลกับแอซีโทน โดยเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยากับตัวเร่ง Montmorillonite, Aluminum Pillared Clay และ Bentonite ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ จากนั้นวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา โดยก่อนการทำปฏิกิริยานำตัวเร่งปฏิกิริยา Aluminum Pillared Clay ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก เติมนลงในขวดก้นกลมสามคอที่มีกลีเซอรอล 10 กรัม และแอซีโทน 12.54 กรัม (อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:2) ทำปฏิกิริยาที่

อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที มีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 85% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอลสูงสุด 60% แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 40 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การเปลี่ยนกลีเซอรอลและการเลือกเกิดโซลคิตอลลดลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา Aluminum Pillared Clay มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง และการเพิ่มอุณหภูมิในทางอุณหพลศาสตร์ทำให้สมดุลลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน

ตารางที่ 4. สภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์โซลคิตอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แบบลำดับขั้น

Reactant	Molar Ratio	Catalyst	Catalyst Loading	Temperature (°C)	Reaction Time	Conversion (%)	Selectivity (%)	Reference
Gly : Ace	1:2	H-Beta-1 zeolites	5 wt.%	28	1 h	86	98.5	[21]
Gly : Ace	1:3	H-ZSM-5 zeolites pore size 4.10 nm	0.05 g	70	60 min	75	92	[22]
Gly : Ace	1:1	Dealumination of BEA Zeolite	0.5 g	30	30 min	80	100	[23]
Gly : Ace	1:4	H-BEA Zeolite	5 wt.%	60	1 h	70	97.9	[24]
Gly : Ace	1:4	H-BEA Acid zeolite	5 wt.%	60	1 h	85	98	[25]

ในปี ค.ศ. 2015 Manjunathan, P. และคณะ [21] ศึกษาการสังเคราะห์โซลคิตอลที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส จากปฏิกิริยาคีทาลไอเซนของกลีเซอรอลกับแอซีโตน ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตำแหน่งกรดแบบ Bronsted Acid ประเภทต่าง ๆ ในวัฏภาคที่เป็นของเหลว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซีโอไลต์ชนิด H-Beta-1 แสดงประสิทธิภาพที่ดีที่สุด คือมีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 86% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอล 98.5% อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโตนเท่ากับ 1:2 แม้ว่าความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา H-Beta-1 จะต่ำกว่า H-Beta-2 แต่มีขนาดผลึกที่เล็กกว่าถึง 3.3 เท่า ส่งผลให้มีผลการเปลี่ยนกลีเซอรอลและการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอลดีกว่า สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าขนาดของผลึกมีอิทธิพลมากกว่าความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา และตำแหน่งที่เป็นกรดก็มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโซลคิตอลมากกว่าตำแหน่งที่เป็นกรดอ่อน

ในปี ค.ศ. 2015 Kowalska-Kus, J. และคณะ [22] ศึกษาการสังเคราะห์โซลคิตอลจากปฏิกิริยาคีทาลไอเซนของกลีเซอรอลกับแอซีโตนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ZSM-5 สองประเภทที่ถูกดัดแปลงโดยการบดแบบแห้ง (Dry Grinding) และการทำอัลตราซาวด์ (Ultrasound) เป็นเวลา 60 นาที จะได้ H-SM และ H-SCH ที่มีอัตราส่วน Si/Al ใกล้เคียงกัน และมีความโดดเด่นในด้านของขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน โดยปฏิกิริยาถูกดำเนินไปในวัฏภาคที่เป็นของเหลวภายใต้สภาวะปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโตนเท่ากับ 1:3 พบว่าซีโอไลต์ H-SM มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า H-SCH ส่งผลให้มีการเปลี่ยนกลีเซอรอลและมีการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอล

สูงกว่า ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

ในปี ค.ศ. 2016 Venkatesha, N.J. และคณะ [23] ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา BEA Zeolite ที่มีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 25 ได้รับการปรับปรุงด้วย Phenoldisulfonic Acid (PDSA) ความเข้มข้นแตกต่างกันตั้งแต่ 0.1-1.0 โมลาร์ จากนั้นทำการรีฟลักซ์ภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟโดยการให้พลังงาน 800 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ได้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และรักษาอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 29 นาที โดยให้พลังงาน 200-450 วัตต์ นำไปหมุนเหวี่ยงและทำการล้างหลาย ๆ ครั้ง จากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส บดให้ละเอียด และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากงานวิจัยพบว่าซีโอไลต์ที่มีการจัดอะลูมิเนียมออกส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน อีกทั้งค่าความเป็นกรดจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Phenoldisulfonic Acid เพิ่มขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยา BEA Zeolite ที่ได้รับการปรับปรุงด้วย Phenoldisulfonic Acid ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของระหว่างกลีเซอรอลต่อแอซีโตนเท่ากับ 1:1 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 80% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอล 100%

ในปี ค.ศ. 2017 Rossa, V. และคณะ [24] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคีทาลไฮเซชันของกลีเซอรอลกับแอซีโตนเพื่อสังเคราะห์โซลคิตอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-BEA Zeolite ที่มีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 19 โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเก็บซีโอไลต์ที่ได้ในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันความชื้นในระหว่างที่รอทำปฏิกิริยา จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยใช้ BET พบว่ามีพื้นที่ผิว $536 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรวม $0.57 \text{ cm}^3/\text{g}$ เส้นผ่านศูนย์กลาง 13.7 nm และนำไปศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโตนเท่ากับ 1.1-1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-5% โดยน้ำหนัก พบว่ามีการเปลี่ยนกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดในตัวเร่งปฏิกิริยา และที่อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มการเปลี่ยนกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น และลดลงหลังจากอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นผลมาจากการสูญเสียกิจกรรมการเร่งปฏิกิริยาและปริมาณความกรดแบบ Bronsted Acid

ในปี ค.ศ. 2019 Rossa, V. และคณะ [25] ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่เป็นกรด ได้แก่ H-BEA (BEA), H-MOR (Mordenite), H-MFI (H-ZSM-5) และ H-FER (Ferrierite) ผ่านปฏิกิริยาคีทาลไฮเซชันของกลีเซอรอลกับแอซีโตน จากอัตราการเร่งปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา H-BEA > H-MOR = H-MFI > H-FER โดยตัวเร่งปฏิกิริยา H-BEA มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ได้จาก SEM และมีความแรงของกรดสูงถึง 2.34 mmol/g ซึ่งความเป็นกรดบริเวณพื้นผิวและขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดกิจกรรมการเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยา H-BEA มีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 85% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอล 98% นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดสามารถนำมาใช้ซ้ำได้ 4 ครั้ง โดยไม่ต้องล้างหรือปรับสภาพระหว่างการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

จากตารางที่ 4 เป็นการรวบรวมสภาวะต่าง ๆ ในการสังเคราะห์โซลคิตอลจากบทความวิจัย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แบบลำดับขั้น จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซีโอไลต์มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยน

กลีเซอรอลให้เป็นโซลคิตอล เป็นผลมาจากโครงสร้างผลึก ขนาดผลึก และตำแหน่งที่เป็นกรดแก่ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการกำหนดประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา โดยขนาดผลึกที่เล็กจะทำให้การแพร่ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ผ่านช่องว่างของซีโอไลต์ทำได้ง่าย และจำนวนตำแหน่งที่เป็นกรดแก่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมลดลงทำให้ตำแหน่งที่เป็นกรดอ่อนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีการเปลี่ยนกลีเซอรอลลดลง

ตารางที่ 5. สภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์โซลคิตอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบคาร์บอนหรือถ่านกัมมันต์

Reactant	Molar Ratio	Catalyst	Catalyst Loading	Temperature (°C)	Reaction Time	Conversion (%)	Selectivity (%)	Reference
Gly: Ace	1:8	5%Ni-1%Zr/AC	0.20 g	45	3 h	100	74	[26]
Gly: Ace	1:4	Acid functionalized activated carbon	2.7 wt.%	25	6 h	97	96	[27]
Gly: Ace	1:4	Acidic carbon-based catalysts	3 wt.%	25	1 h	80	95	[28]
Gly: Ace	1:4	Acid functionalized activated carbon	2 wt.%	30	4 h	89	98	[29]
Gly: Ace	1:8	Acid functionalized activated carbon from corncob	3 wt.%	100	2 h	80.3	-	[30]

ในปี ค.ศ. 2013 Khayoon, M.S. และ Hameed, B.H. [26] ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสมของ 5%Ni-1%Zr บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ โดยเริ่มจากการนำถ่านไปปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ จากนั้นนำไปแช่ใน $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปแช่ในสารละลาย ZrCl_3 ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก โดยผลจากการแช่ในสารละลายทั้งสองส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด และปริมาตรของรูพรุนลดลง เนื่องจากเกิดการแทรกตัวของโลหะและเกิดจากการเพิ่มขึ้นของรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาดีขึ้น จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ในการเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิของปฏิกิริยา 25-65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อแอซีโตน 1:4-1:8 น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา 0.10-0.30 กรัม และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.20 กรัม อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโตนเท่ากับ 1:8 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ดีที่สุดเนื่องจากมีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 100% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอล 74%

ในปี ค.ศ. 2014 Rodrigues, R. และคณะ [27] ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากมะกอกที่เป็นสารชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร มาทำความสะอาดโดยการแช่ในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น

6 โมลาร์ และกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 73% โดยปริมาตร ที่อัตราส่วนถ่านต่อกรด 1:1 อุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง การกระตุ้นถูกดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แก้วแนวตั้ง (Vertical Glass Reactor) ภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจน 100 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างโดยใช้ไอน้ำร้อน และอบให้แห้งก่อนนำไปกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดถูกเตรียมโดยการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 18 โมลาร์ มีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 97% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอล 96% โดยการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกส่งผลให้ปริมาณกรดบนพื้นผิวสูงขึ้น ในขณะที่การกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลงเพียงเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามการกระตุ้นด้วยกรดไนตริกส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเกิดการสะสมของหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนจำนวนมากบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

ในปี ค.ศ. 2016 Goncalves, M. และคณะ [28] ศึกษาการทำปฏิกิริยาซีทาลไลเซชันของกลีเซอรอลกับแอซีโตน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบคาร์บอนที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกถูกเตรียมโดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดซัลฟิวริก 3:1, 2:1, 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่อุณหภูมิ 184 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบคาร์บอนที่เตรียมโดยใช้กรดซัลฟิวริกในปริมาณสูงกว่าจะมีความชอบน้ำมากกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของออกซิเจนและซัลเฟอร์จึงส่งผลให้ความมีขั้วเพิ่มขึ้น และกรดซัลฟิวริกที่มากเกินไปที่ใช้ในระหว่างกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและพอลิเมอไรเซชันพร้อมกัน มีผลต่อพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ เนื่องจากเกิดการแทรกตัวของซัลเฟอร์บนพื้นผิวคาร์บอน ส่งผลให้ความเป็นกรดบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2020 Nutwara Poolpol และคณะ [29] ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากธรรมชาติอย่างถ่านที่ได้จากการเผาถ่านซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในเครื่องกรองน้ำ โดยนำถ่านทั้งสองชนิดมากระตุ้นด้วยกรด จากนั้นทำการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโตน 1:1-1:4 ที่อุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 2-6 ชั่วโมง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2-5% โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดถูกเตรียมโดยการปรับปรุงถ่านจากถ่านด้วยกรดซัลฟิวริก 18 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโตน 1:4 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2% โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนกลีเซอรอล 89% และมีการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอล 98% โดยปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โดยใช้ Boehm Titration จะเห็นว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวมอยู่ที่ 2.53 มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในเครื่องกรองน้ำ และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเครื่องกรองน้ำเมื่อนำไปกระตุ้นด้วยกรดจะมีค่าลดลง เนื่องจากการเกิดสะสมของหมู่ฟังก์ชันกรดบนพื้นผิวของถ่าน แต่ในทางตรงกันข้ามพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากถ่านเมื่อนำไปกระตุ้นด้วยกรดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดทำให้ถ่านกลายเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพส่งผลทำให้มีรูพรุนเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2021 Jaspreet, K. และคณะ [30] ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์จากขี้ข้าวโพดที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก (AAC-CC) จากนั้นใช้วิธีพื้นผิวดตอบสนอง (Response Surface Methodology)

ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโซลคิตอล ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อแอซีโทนต่อเมทานอล 1:2:2-1:8:8 ที่อุณหภูมิ 50-150 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-5% โดยน้ำหนัก โดยจากการทำ 3D Surface Plots จะเห็นว่าอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นมีผลต่อการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโซลคิตอลมากที่สุด ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) ที่แสดงค่า Sum of Squares และค่า F-Value ของอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์อื่น ๆ และการนำถ่านกัมมันต์ไปกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก (AAC-CC) ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น ทำให้มีการเปลี่ยนกลีเซอรอลที่สูงขึ้นตามไปด้วย และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำมาใช้ซ้ำได้อย่างต่อเนื่องถึง 3 ครั้ง โดยที่ประสิทธิภาพและโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากตารางที่ 5 เป็นการรวบรวมสภาวะต่าง ๆ ในการสังเคราะห์โซลคิตอลจากบทความวิจัยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบคาร์บอนหรือถ่านกัมมันต์ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสูง โอกาสที่สารตั้งต้นจะเข้ามาทำปฏิกิริยากับตำแหน่งกระตุ้นที่อยู่บนพื้นผิวก็จะมากเหมือนเป็นการใช้หมู่ฟังก์ชันในถ่านกัมมันต์ช่วยในการดูดซับสารเข้ามาในรูพรุน เนื่องจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ก่อนกระตุ้นด้วยสารเคมี การดูดซับเข้ามาในรูพรุนจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวแบบอ่อน ๆ จึงมีโอกาสที่สารจะหลุดออกได้ง่าย แต่เมื่อกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดส่งผลให้เกิดหมู่ฟังก์ชันเพิ่มขึ้นบนพื้นผิวทำให้เกิดการดูดซับที่แข็งแรงกว่า ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีและเกิดได้เร็ว

โดยทางคณะผู้จัดทำจึงได้มีการเปรียบเทียบถึงข้อดีและข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์โซลคิตอล ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6. เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์โซลคิตอล

ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา	ข้อดี	ข้อเสีย
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรซิน	- การเกิดปฏิกิริยาไม่รุนแรง - ก่อให้เกิดมลพิษน้อย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม - ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย และให้ผลผลิตสูง - ใช้ความดันต่ำ - นำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้	- ใช้อัตราส่วนของแอซีโทนในปริมาณที่สูง
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง	- พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูง - มีปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดสูง - มีพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ชอบน้ำ - นำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ - ใช้อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อแอซีโทนในปริมาณที่ไม่สูงมาก	- น้ำที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาจะไปปิดกั้นตำแหน่งกระตุ้นที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะส่งผลต่อบริเวณที่เป็นกรดและรูพรุนที่ลดลง

ตารางที่ 6. (ต่อ) เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์โซลคิตอล

ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา	ข้อดี	ข้อเสีย
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบแร่ดินเหนียว	- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาค่ำ - นำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ - ราคาไม่แพง - เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	- ชนิดของแร่ดินเหนียวและชนิดของโลหะมีบทบาทสำคัญในการเร่งปฏิกิริยา
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แบบลำดับขั้น	- เพิ่มความจำเพาะของการเร่งปฏิกิริยา - ลดการเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม - มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง - ต้นทุนการผลิตต่ำ - มีความเป็นกรดที่แรง - นำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้	- น้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาหรือสิ่งเจือปนในสารตั้งต้นจะทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์ไม่เสถียร ซึ่งส่งผลกระทบต่อบริเวณที่เป็นกรดและรูพรุนที่ลดลง
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบคาร์บอนหรือถ่านกัมมันต์	- พื้นที่ผิวจำเพาะสูง - มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก - ความสามารถในการดูดซับสูง - นำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้	- เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานาน

3. สรุป

ในการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโซลคิตอลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของกลีเซอรอล โดยบทความนี้ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์โซลคิตอลจากกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ เช่น เรซิน ซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง แร่ดินเหนียว ซีโอไลต์แบบลำดับขั้น และถ่านกัมมันต์ ในตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีจุดประสงค์เดียวกันคือเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโซลคิตอล โดยสามารถพิจารณาได้จากปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราส่วนระหว่างกลีเซอรอลต่อแอซีโตน ปริมาณตัวเร่ง อุณหภูมิ เวลา ปริมาณการเปลี่ยนกลีเซอรอล และปริมาณการเลือกเกิดเป็นโซลคิตอล ซึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดที่กล่าวมาข้างต้นมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Future Market Insights. 2021. Global Solketal Market: Introduction and Dynamics. แหล่งข้อมูล : <https://www.futuremarketinsights.com/reports/solketal-market>. ค้นเมื่อวันที่ 24 พฤษภาคม 2564.
- [2] Absolute Report. 2021. Solketal (CAS 100-79-8) Market Size 2021 Research Report Segmented by Manufacturers, Geography Regions, Trends, Opportunities and Forecasts to 2024. แหล่งข้อมูล : <https://www.ktvn.com/story/43667667/solketal-cas-100-79-8-market-size-2021-research-report-segmented-by-manufacturers-geography->

- regions-trends-opportunities-and-forecasts-to-2024-says. ค้นเมื่อวันที่ 24 พฤษภาคม 2564.
- [3] Narin Tunpaiboon. 2564. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564-2566: อุตสาหกรรมไบโอดีเซล. แหล่งข้อมูล : <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Energy-Utilities/Biodiesel/IO/io-biodiesel-21>. ค้นเมื่อวันที่ 24 พฤษภาคม 2564.
- [4] American Chemical Society. 2021. Molecule of the Week Archive Isopropylidene glycerol. แหล่งข้อมูล : <https://www.acs.org/content/acs/en/molecule-of-the-week/archive/i/isopropylideneglycerol.html>. ค้นเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2564.
- [5] Cornejo, A., Campoy, M., Barrio, I., Navarrete, B. and Lazaro, J. 2019. Solketal production in a solvent-free continuous flow process: scaling from laboratory to bench size. *React. Chem. Eng.*
- [6] Khodadadi, M.R., Thiel, J., Varma, R.S. and Len, C. 2021. Innovative continuous synthesis of solketal. *Journal of Flow Chemistry*.
- [7] Fatimah, I., Sahroni, I., Fadillah, G., Musawwa, M.M., Mahlia, T.M.I. and Muraza, O. 2019. Glycerol to Solketal for Fuel Additive: Recent Process in Heterogeneous Catalysts. *Energies*, 12(15), 2872.
- [8] Nanda, M.R., Yuan, Z., Qin, W., Ghaziaskar, H.S., Poirier, M.-A. and Xu, C.C. 2014. Thermodynamic and Kinetic studies of a catalytic process to convert glycerol into solketal as an oxygenated fuel additive. *Fuel*, 117, 470-477.
- [9] Yang, J., Li, N., Ma, W.J., Zhou, J.H. and Sun, H.Z. 2013. Synthesis of Solketal with Catalyst Sulfonic Acid Resin. *Adv. Mater. Res.*, 830, 176-179.
- [10] Ilgen, O., Yerlikaya, S. and Akyurek, F.O. 2016. Synthesis of Solketal from Glycerol and Acetone over Amberlyst-46 to Produce an Oxygenated Fuel Additive. *Period. Polytech. Chem. Eng.*, 61(2), 144-148.
- [11] Guidi, S., Noè, M., Riello, P., Perosa, A. and Selva, M. 2016. Towards a Rational Design of a Continuous-Flow Method for the Acetalization of Crude Glycerol: Scope and Limitations of Commercial Amberlyst 36 and $AlF_3 \cdot 3H_2O$ as Model Catalysts. *Molecules*, 21(5), 657.
- [12] Oliveira, P.A., Souza, R.O.M.A. and Mota, C.J.A. 2016. Atmospheric Pressure Continuous Production of Solketal from the Acid-Catalyzed Reaction of Glycerol with Acetone. *J. Braz. Chem. Soc.*, 27, 10, 1832-1837.
- [13] Vicente, G., Melero, J.A., Morales, G., Paniagua, M. and Martin, E. 2010. Acetalisation of bio-glycerol with acetone to produce solketal over sulfonic mesostructured silicas. *Green Chemistry*, 12(5), 899.

- [14] Li, L., Koranyi, T.I., Sels, B.F. and Pescarmona, P.P. 2012. Highly-efficient conversion of glycerol to solketal over heterogeneous Lewis acid catalysts. *Green Chemistry*, 14(6), 1611-1619.
- [15] Churipard, S.R., Manjunathan, P., Chandra, P., Shanbhag, G.V., Ravishankar, R., Rao, P.V.C., Sri Ganesh, G., Halgeri, A.B. and Maradur, S.P. 2017. Remarkable catalytic activity of a sulfonated mesoporous polymer (MP-SO₃H) for the synthesis of solketal at room temperature. *New J. Chem.*, 41(13), 5745-5751.
- [16] Chen, L., Nohair, B., Zhao, D. and Kaliaguine, S. 2018. Highly Efficient Glycerol Acetalization over Supported Heteropoly Acid Catalysts. *ChemCatChem*, 10(8), 1918-1925.
- [17] Nanda, M.R., Yuan, Z., Qin, W., Ghaziaskar, H.S., Poirier, M.-A. and Xu, C. 2014. A new continuous-flow process for catalytic conversion of glycerol to oxygenated fuel additive: Catalyst screening. *Appl. Energy*, 123, 75-81.
- [18] Sandesh, S., Halgeri, A.B. and Shanbhag, G.V. 2015. Utilization of renewable resources: Condensation of glycerol with acetone at room temperature catalyzed by organic-inorganic hybrid catalyst. *J. Mol. Catal. A Chem.*, 401, 73-80.
- [19] Timofeeva, M.N., Panchenko, V.N., Krupskaya, V.V., Gil, A. and Vicente, M.A. 2017. Effect of nitric acid modification of montmorillonite clay on synthesis of solketal from glycerol and acetone. *Catalysis Communication*, 90, 65-69.
- [20] Zahid, I., Ayoub, M., Abdullah, B.B., Nazir, M.H. and Zulqarnain. 2020. Glycerol Derivatives as Fuel Additive: Synthesis of Solketal From Glycerol and Acetone With Various Acid Clay Catalysts. *Advances in Engineering Research*, 200, 292-296.
- [21] Manjunathan, P., Maradur, S.P., Halgeri, A.B. and Shanbhag, G.V. 2015. Room temperature synthesis of solketal from acetalization of glycerol with acetone: Effect of crystallite size and the role of acidity of beta zeolite. *J. Mol. Catal. A Chem.*, 396, 47-54.
- [22] Kowalska-Kus, J., Held, A. and Nowinska, K. 2015. Enhancement of the catalytic activity of H-ZSM-5 zeolites for glycerol acetalization by mechanical grinding. *React. Kinet. Mech. Catal.*, 117(1), 341-352.
- [23] Venkatesha, N.J., Bhat, Y.S. and Prakash, B.S.J. 2016. Dealuminated BEA zeolite for selective synthesis of five-membered cyclic acetal from glycerol under ambient conditions. *RSC Adv.*, 6(23), 18824-18833.
- [24] Rossa, V., Pessanha, Y.D.S.P., Diaz, G.C., Camara, L.D.T., Pergher, S.B.C. and Aranda, D.A.G. 2017. Reaction Kinetic Study of Solketal Production from Glycerol Ketalization with Acetone. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 56(2), 479-488.

- [25] Rossa, V., Chenard Díaz, G., Juvenal Muchave, G., Alexandre Gomes Aranda, D. and Berenice Castellã Pergher, S. 2019. Production of Solketal Using Acid Zeolites as Catalysts. *Glycerine Production and Transformation - An Innovative Platform for Sustainable Biorefinery and Energy*.
- [26] Khayoon, M.S. and Hameed, B.H. 2013. Solventless acetalization of glycerol with acetone to fuel oxygenates over Ni-Zr supported on mesoporous activated carbon catalyst. *Appl. Catal. A Gen.*, 464-465, 191-199.
- [27] Rodrigues, R., Goncalves, M., Mandelli, D., Pescarmona, P.P. and Carvalho, W.A. 2014. Solvent-free conversion of glycerol to solketal catalysed by activated carbons functionalised with acid groups. *Catal. Sci. Technol.*, 4(8), 2293-2301.
- [28] Goncalves, M., Rodrigues, R., Galhardo, T.S. and Carvalho, W.A. 2016. Highly selective acetalization of glycerol with acetone to solketal over acidic carbon-based catalysts from biodiesel waste. *Fuel*, 181, 46-54.
- [29] ณัฐวรา พูลผล, นภสร สุนทร และอังคณา เจริญจิตร. 2563. การสังเคราะห์โซลคีตอลจากกลีเซอรอล. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. [Nutwara Poolpol, Napasorn Soonthorn and Aungkana Charenchit. 2020. Synthesis of solketal from glycerol. B.Sc. Special Project, Industrial Chemistry Program, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)]
- [30] Jaspreet, K., Anil, K.S., Poonam, G. and Mithilesh, K.J. 2021. Process optimization with acid functionalized activated carbon derived from corncob for production of 4-hydroxymethyl-2,2-dimethyl-1,3-dioxolane and 5-hydroxy-2,2-dimethyl-1,3-dioxane. *Scientific Reports*, 11, 8567.