

ปฏิกิริยาควบแน่นแบบอัลดอลของอะซีโตนกับบิวทิลรัลดีไฮด์ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลบนไฮโดรทัลไซต์

Aldol Condensation of Acetone with Butyraldehyde Over Alkali Supported Hydrotalcite Catalysts

ปานชีวา สิงห์สง¹ และ อาทิตย์ อัสวสุชี^{1*}

Pancheewa Singthaisong¹ and Artit Ausavasukhi^{1*}

¹สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹Department of Applied Chemistry, Faculty of Sciences and Liberal Arts,
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima Province, 30000

*Corresponding author E-mail: artit.au@rmuti.ac.th

Received 30 May 2023, Accepted 20 September 2023, Published 24 September 2023

บทคัดย่อ

ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทัลไซต์ที่ได้รับการปรับสภาพด้วยความร้อนซึ่งถูกเตรียมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (HT400, HT600 และ HT 800) และโลหะอัลคาไล (ลิเทียม โพแทสเซียม และซีเซียม) ที่เติมแต่งใน HT400 ถูกศึกษาความแตกต่างของสมบัติเชิงพื้นผิว และประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา/ความสามารถในการเลือกสรรผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลในสถานะแก๊สในระบบต่อเนื่องระหว่างอะซีโตนและบิวทิลรัลดีไฮด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้นถูกวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งต่อกับสเปกโทรสโกปีรังสีเอกซ์แบบการกระจายพลังงาน และการโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อศึกษาการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรทัลไซต์ที่ได้รับการปรับสภาพด้วยความร้อนเพิ่มขึ้นตามลำดับต่อไปนี้: HT400 < HT600 < HT800 โดยปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลแบบข้าม และด้วยตัวเองทำให้เกิดส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ควบแน่นหลายชนิด ในปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลระหว่างอะซีโตนและบิวทิลรัลดีไฮด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HT600 การเกิดปฏิกิริยาอัลดอลด้วยตัวเองของบิวทิลรัลดีไฮด์ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอน 8 อะตอมเกิดขึ้นได้เร็วกว่าปฏิกิริยาอัลดอลแบบข้ามซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอน 7 อะตอม ภายหลังจากการเติมแต่งลิเทียม (1 โมล%) กับ HT400 โดยวิธีการฝังตัว ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาได้ อย่างไรก็ตาม ลิเทียมสปีชีส์อาจเกิดการรวมตัวกันเกิดเป็นคลัสเตอร์ขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเติมแต่งโลหะเพิ่มขึ้น (5 และ 10 โมล%) ซึ่งนำไปสู่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ลดลง เมื่อพิจารณาถึงผลของโลหะพบว่าประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของโลหะอัลคาไลที่เติมแต่งใน HT400 (10 โมล%) จะลดลงตามลำดับต่อไปนี้: 10Li/HT400 > 10Cs/HT400 > 10K/HT400 สันนิษฐานว่าการเกิดขึ้นของสปีชีส์โลหะที่แตกต่างกันและขนาดของคลัสเตอร์สามารถมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา ความเสถียร และการเลือกสรรผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอล

คำสำคัญ: ออกไซด์ที่ได้จากไฮโดรทัลไซต์, การปรับสภาพทางความร้อน, โลหะอัลคาไลที่ได้รับการเติมแต่ง, การควบแน่นแบบอัลดอล

ABSTRACT

Thermally treated hydrotalcite prepared at different temperatures (HT400, HT600 and HT 800) and alkali metal (Li, K and Cs) incorporated on HT400 catalysts have been studied for their surface properties and catalytic activity/selectivity in the continuous gas phase aldol condensation reaction between acetone and butyraldehyde. The synthesized catalysts were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy (SEM/EDS) and temperature-programmed desorption of carbon dioxide (CO_2 -TPD). The catalytic activity of the thermally treated hydrotalcite increases in the following order: HT400 < HT600 < HT800. The cross- and self-aldol condensation reactions give a mixture of multiple condensation products. In the aldol condensation reaction between acetone and butyraldehyde using HT600 catalyst, the self-aldol reaction of butyraldehyde to form C8 products proceeded much faster than the cross-aldol reaction to form C7 products. After incorporation of lithium (1 mol%) with HT400 by impregnation, such catalyst can increase the catalytic activity. However, the lithium species may agglomerate to form relatively larger clusters upon increasing metal loading (5 and 10 mol%) leading to the lower conversion. Regarding the effect of metal, the catalytic activity of the alkali incorporated HT400 (10 mol%) decreases in the following order: 10Li/HT400 > 10Cs/HT400 > 10K/HT400. It suggests that the formation of the different metal species and cluster size can influence the catalytic activity, stability and selectivity of catalyst in aldol condensation reaction.

Keywords: Hydrotalcite-Derived Oxides, Thermal Treatment, Alkali Metal Incorporation, Aldol Condensation

บทนำ

เศรษฐกิจชีวภาพ (Bioeconomy) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) และเศรษฐกิจสีเขียว (Green economy) เป็นโมเดลของการพัฒนาเศรษฐกิจแบบองค์รวมที่ไม่ได้มุ่งเน้นเพียงการพัฒนาเศรษฐกิจเท่านั้น แต่เป็นการพัฒนาที่ควบคู่ไปกับการพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อมได้อย่างสมดุล โดยเปลี่ยนข้อได้เปรียบที่ประเทศไทยมีความหลากหลายทางชีวภาพให้เป็นความสามารถในการแข่งขันด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อให้เกิดความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืนไปพร้อมกัน โดยอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพและเคมีชีวภาพเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมตามยุทธศาสตร์ที่ใช้เพื่อขับเคลื่อนเศรษฐกิจปิสิจิของประเทศไทย (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), 2563) โดยการเปลี่ยนสารชีวมวล (Biomass) เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) และเคมีชีวภาพ (Biochemical) ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนสารชีวมวลทำได้โดยใช้กระบวนการทางความร้อน (Thermochemical process) กระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical process) และกระบวนการทางเคมี (Chemical process) (อาทิตย, 2559) กระบวนการเปลี่ยนสารชีวมวลที่เป็นเซลลูโลส หรือพอลิแซคคาไรด์เป็นมอนอแซคคาไรด์หรือน้ำตาลที่สามารถนำไปหมักด้วยแบคทีเรียตระกูล *Clostridium* จะให้อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล (Acetone-Butanol-Ethanol; ABE) เป็นผลิตภัณฑ์ (Wiehn et al., 2013) ซึ่งกระบวนการหมักนี้กำลังได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถใช้สารตั้งต้นหลายประเภทในกระบวนการผลิต เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ชังข้าวโพด ชี้อ้อย ชานอ้อย รวมทั้งน้ำเสียที่มีองค์ประกอบ

ของแป้ง และน้ำตาล (Castro et al., 2015) ทำให้ประเทศไทยมีศักยภาพในการดำเนินการผลิตและมีโอกาสต่อยอดการผลิตอะซีโตน-บิวทานอล-เอทานอลเพื่อเปลี่ยนให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

ปัจจุบันมีการศึกษาการเปลี่ยนอะซีโตนและบิวทิลดีไฮด์ซึ่งสามารถผลิตได้จากการเร่งปฏิกิริยาอะตาโลติกดีไฮโดรจิเนชัน (Catalytic dehydrogenation) ของบิวทานอลให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอล (Aldol condensation) โดยผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบซึ่ง สามารถนำไปใช้เป็นสารให้กลิ่นหอมหรือน้ำหอมในเครื่องสำอาง ยาฆ่าแมลง สารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารเคมี (FOODB, 2020)

จากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการศึกษาการทำปฏิกิริยาควบแน่นแบบอัลดอลระหว่างอะซีโตนกับซิทรัล (Citral) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลคาไล ได้แก่ ลิเทียม โซเดียม และโพแทสเซียมที่เติมแต่งบนวัสดุรองรับไฮโดรทัลไซต์ (Hydrotalcite) ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method) (Abello et al., 2004) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลคาไล ได้แก่ ลิเทียม โซเดียม โพแทสเซียม และซีเซียมที่เติมแต่งบนวัสดุรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวสูง (Diez et al., 2006) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาปฏิกิริยาควบแน่นแบบอัลดอลของบิวทิลดีไฮด์กับไอโซบิวทิลดีไฮด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมที่เติมแต่งบนวัสดุรองรับซิลิกา (Hamilton et al., 2004) มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลด้วยตัวเอง (Self-Aldol condensation) ของอะเซทัลดีไฮด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลคาไล หรือทั้งสเตนออกไซด์ หรือโมลิบดีนัมออกไซด์ที่เติมแต่งบนวัสดุรองรับซิลิกา (Ji et al., 1997) รวมถึงการศึกษาปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลด้วยตัวเองของบิวทิลดีไฮด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลคาไล หรือโลหะออกไซด์ที่เติมแต่งบนวัสดุรองรับซีโอไลต์ (Rode et al., 1991) จากการศึกษางานวิจัยในช่วงต้นพบว่ามีการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยาควบแน่นแบบอัลดอลระหว่างอะซีโตนกับบิวทิลดีไฮด์อย่างจำกัด และยังไม่มีการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีการฝังตัวของโลหะอัลคาไลบนวัสดุรองรับไฮโดรทัลไซต์ที่ได้รับการปรับปรุงสภาพทางความร้อน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการเปลี่ยนอะซีโตน และบิวทิลดีไฮด์เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบด้วยปฏิกิริยาควบแน่นแบบอัลดอลโดยใช้กระบวนการต่อเนื่อง (Continuous process) ดำเนินการทดสอบปฏิกิริยาภายใต้ความดันบรรยากาศโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลคาไล ได้แก่ ลิเทียม โพแทสเซียม และซีเซียมบนวัสดุรองรับไฮโดรทัลไซต์ที่ได้รับการปรับปรุงสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน งานวิจัยนี้จะช่วยสนับสนุนอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพและเคมีชีวภาพ ซึ่งสนับสนุนโมเดลเศรษฐกิจบีบีซีจีของประเทศไทย

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1.1. การเตรียมวัสดุรองรับไฮโดรทัลไซต์

เผาไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที วัสดุรองรับที่เตรียมได้จะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย HT400, HT600 และ HT800 ตามลำดับ

1.2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลคาไลบนวัสดุรองรับด้วยวิธีการฝังตัว

เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลคาไลบนวัสดุรองรับ HT400 ด้วยวิธีการฝังตัวโดยเติมแต่งลิเทียมจำนวน 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวลโดยใช้สารละลายลิเทียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยหยดสารละลายลงบนวัสดุรองรับพร้อมคนตลอดเวลา และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย 1Li/HT400, 5Li/HT400 และ 10Li/HT400

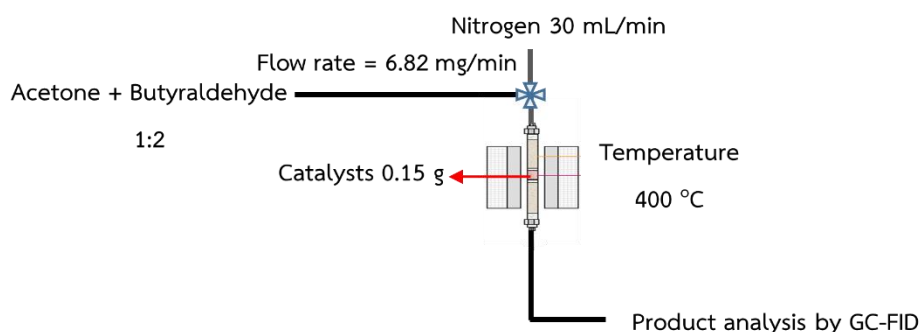
ส่วนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมหรือซีเซียมบนวัสดุรองรับ HT400 จำนวน 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีเดียวกัน โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือซีเซียมไนเตรตความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย 10K/HT400 และ 10Cs/HT400 ตามลำดับ

2. การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวอย่างที่เตรียมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray powder diffractometer; XRD) วิเคราะห์สภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคการวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบการกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectroscopy; EDS) และวิเคราะห์ตำแหน่งเบสด้วยเครื่องโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อศึกษาการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂-temperature-programmed desorption; CO₂-TPD)

3. การทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา

ทดสอบการเร่งปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลระหว่างอะซีโตนกับบิวทิรัลดีไฮด์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) โดยป้อนอะซีโตนกับบิวทิรัลดีไฮด์ที่อัตราส่วน 1:2 โดยโมล เข้าสู่ระบบโดยใช้ปั๊มควบคุมหลอดฉีดสาร (Syringe pump) ด้วยอัตราการไหลของสารป้อน 6.82 มิลลิกรัมต่อนาที ซึ่งต่อเข้ากับถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำหนัก 0.15 กรัม ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพา ด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบออนไลน์ โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างทุกๆ 60 นาที



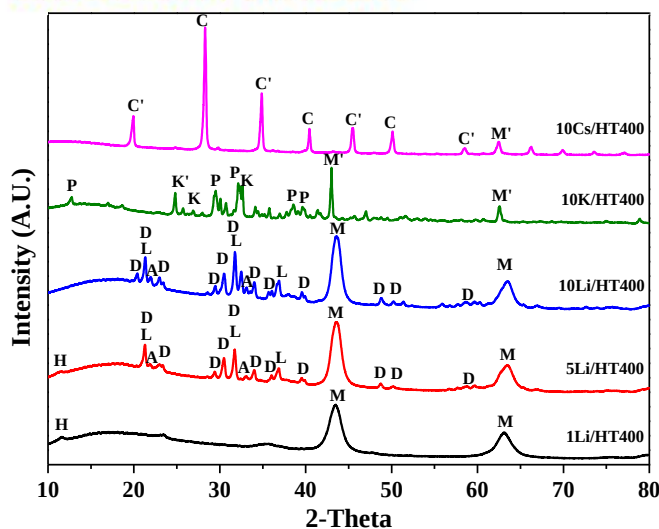
ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงถึงปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor)

ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.1 การศึกษาคุณลักษณะด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 1Li/HT400, 5Li/HT400, 10Li/HT400, 10K/HT400 และ 10Cs/HT400 มาศึกษาโดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุมสแกน 10-80 องศา ให้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 2



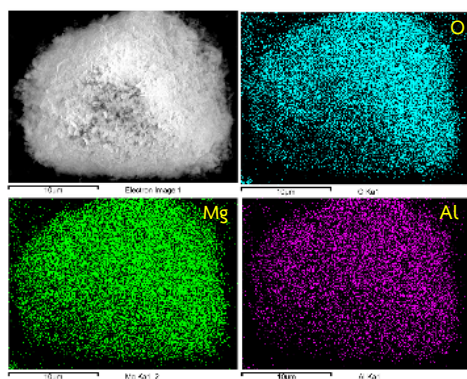
ภาพที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

หมายเหตุ A = LiAlO_2 , C = Cs_2O , C' = Cs_2CO_3 , H = Hydrotalcite, K = KOH, K' = α -KOH, L = LiOH, D = Li_2CO_3 , P = K_2CO_3 , M = MgO, M' = Periclase MgO phase

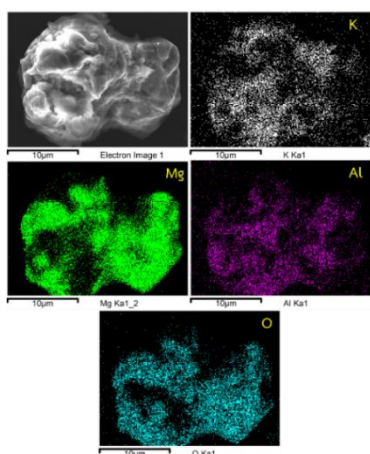
จากภาพที่ 2 ตัวเร่งปฏิกิริยา 1Li/HT400 แสดงฟีกของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (M) ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่มุม $2\theta = 43.0$ และ 63.0 องศา และพบสัญญาณความเข้มต่ำของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (H) ซึ่งแสดงโครงสร้างของไฮโดรทัลไซต์ที่มุม $2\theta = 11.0$ องศา จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไฮโดรทัลไซต์ซึ่งเป็นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxides; LDSs) ซึ่งมีสูตรเคมีเป็น $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{OH})_6\text{CO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ เกิดการสลายตัวทางความร้อนให้โลหะออกไซด์ผสมของอลูมินา (Al_2O_3) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ausavasukhi (Ausavasukhi et al., 2023) เมื่อไฮโดรทัลไซต์ที่ถูกปรับสภาพด้วยความร้อนได้รับการเติมแต่งลิเทียมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (5Li/HT400 และ 10Li/HT400) นอกจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะแสดงฟีกของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแมกนีเซียมออกไซด์ ยังพบฟีกของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (L) ที่มุม $2\theta = 21.0$, 32.0 และ 37.0 องศา ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะของลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang et al. (2017) ฟีกของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (A) ที่มุม $2\theta = 21.0$ และ 33.0 องศา ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะของลิเทียมอลูมินา (LiAlO_2) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xie (Xie et al., 2018) และฟีกของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (D) ที่มุม $2\theta = 20.0$, 21.0 , 23.0 , 29.0 , 30.0 , 32.0 , 34.0 , 36.0 , 37.0 , 39.5 , 49.0 , 50.0 และ 58.0 องศา ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะของลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lestariningsih (Lestariningsih et al., 2021) คาดว่าลิเทียมอลูมินาเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ของลิเทียมสปีชีส์และอลูมิเนียมสปีชีส์ที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ลิเทียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นในระหว่างการเก็บตัวอย่าง และตัวอย่างสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ เมื่อไฮโดรทัลไซต์ที่ถูกปรับสภาพด้วยความร้อนได้รับการเติมแต่งโพแทสเซียม (10K/HT400) จะพบฟีกของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (K) ที่มุม $2\theta = 27.0$ และ 32.6 องศา ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ฟีกของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (K') ที่มุม $2\theta = 24.8$ องศา ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะของแอลฟา-โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (α -KOH) ฟีกของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (P) ที่มุม $2\theta = 29.5$, 32.2 , 38.5 และ 39.5 องศา ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะของโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) (Zhang et al., 2016) และฟีกของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (M') ที่มุม $2\theta = 62.5$ องศา ซึ่งแสดง

คุณลักษณะเฉพาะของเพอริคลาสแมกนีเซียมออกไซด์ (Periclase MgO) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Benedictto (Benedictto et al., 2018) โดยคาดว่าโพแทสเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นจากการที่ตัวอย่างสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ เมื่อไฮโดรทัลไซต์ที่ถูกปรับสภาพด้วยความร้อนได้รับการเติมแต่งซีเซียม (10Cs/HT400) จะพบฟีกของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (C) ที่มุม $2\theta = 28.3, 40.3$ และ 50.1 องศา ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะของซีเซียมออกไซด์ (CsO_2) และฟีกของการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ (C') ที่มุม $2\theta = 20.0, 35.0, 35.5$ และ 58.5 องศา ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะของซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang (Zhang et al., 2016) โดยคาดว่าซีเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นจากการที่ตัวอย่างสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

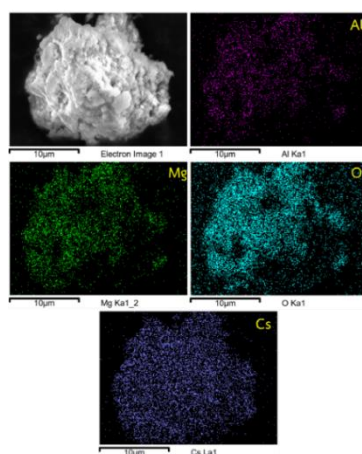
1.2 การศึกษาคุณลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



(ก)



(ข)



(ค)

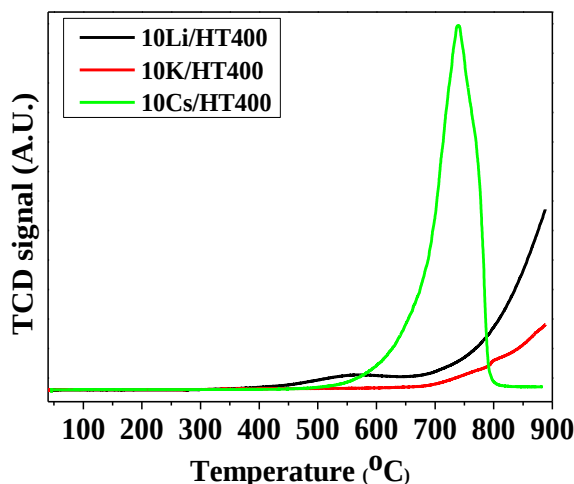
ภาพที่ 3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) 10Li/HT400 (ข) 10K/HT400 และ (ค) 10Cs/HT400

จากภาพที่ 3 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 10Li/HT400, 10K/HT400 และ 10Cs/HT400 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเปรียบเทียบกับภาพวิเคราะห์แผนที่ธาตุด้วยเทคนิคการวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบการกระจายพลังงาน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดมีสภาพพื้นผิวไม่เป็นเกล็ด (Not flake-like) คาดว่าเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของ

ความร้อนของเลเซอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบธาตุพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีการกระจายตัวของธาตุแมกนีเซียม อลูมิเนียม และออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอ รวมถึงโลหะอัลคาไลที่ได้รับการเติมแต่ง ได้แก่ โพแทสเซียม และซีเซียม ยกเว้นในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 10Li/HT400 ซึ่งไม่สามารถตรวจพบองค์ประกอบที่เป็นลิเทียมได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบการกระจายพลังงาน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำไฮโดรทาลไซต์ที่ถูกปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดโลหะออกไซด์ผสมที่สามารถช่วยกระจายตัวโลหะอัลคาไลได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pischetola (Pischetola et al., 2021)

1.3 การศึกษาคุณลักษณะด้วยเทคนิคการโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อศึกษาการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 10Li/HT400, 10K/HT400 และ 10Cs/HT400 มาศึกษาปริมาณของเบส และความแรงของเบสโดยเทคนิคการโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อศึกษาการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 50-900 องศาเซลเซียส ให้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โพรไฟล์การคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากภาพที่ 4 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 10Cs/HT400 จะเกิดการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส ในปริมาณมาก แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 10Cs/HT400 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณเบส และความแรงของเบสสูง ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 10Li/HT400 จะเกิดการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิ 450-650 องศาเซลเซียส ในปริมาณน้อย และจะเกิดการคายซับเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 650 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ส่วนในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา 10K/HT400 จะเกิดการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 650 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป อย่างไรก็ตามการศึกษาคายซับของคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการที่อุณหภูมิ 50-900 องศาเซลเซียส ทำให้ยังไม่สามารถวิเคราะห์การคายซับของคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา 10Li/HT400 และ 10K/HT400 ได้อย่างสมบูรณ์ แต่จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเติมแต่งโลหะอัลคาไลลงบนวัสดุรองรับจะมีความแรงของเบสดังนี้ $Li > K > Cs$ (Choudhary et al., 1997) ซึ่งสอดคล้องกับการพบพิทของการคายซับที่อุณหภูมิสูงกว่าในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา 10Li/HT400 และ 10K/HT400 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา 10Cs/HT400 จากผลการทดลองสามารถสรุปในเบื้องต้นว่าการเติมแต่งโลหะอัลคาไลบน

ไฮโดรทาลไซต์ที่ถูกปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความแรงของเบสที่แตกต่างกัน และความแรงของเบสที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพ และการเลือกสรรการเกิดผลิตภัณฑ์

2. การศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอล

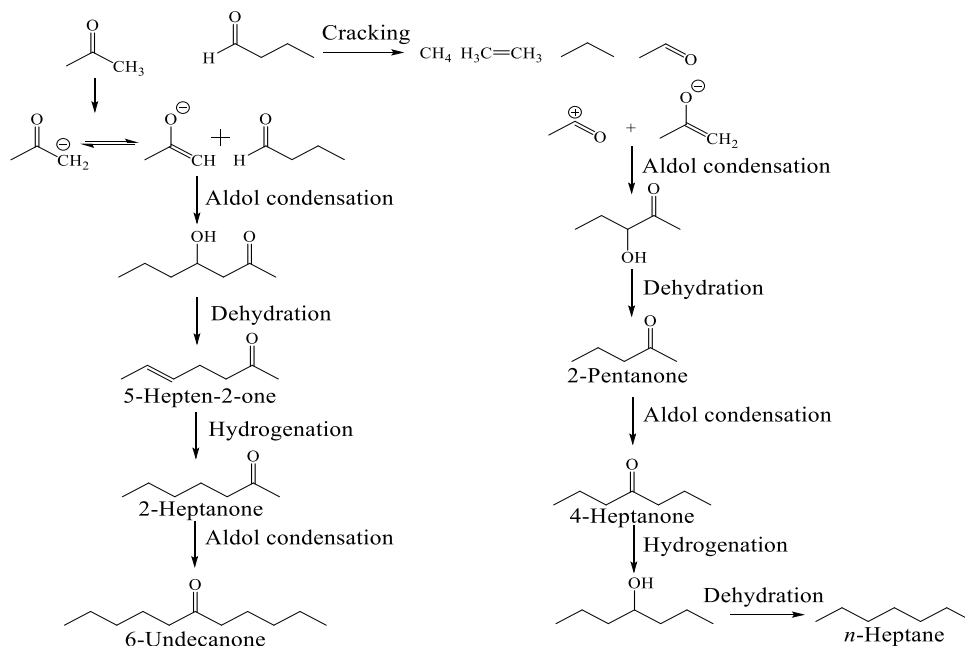
จากการศึกษาการเร่งปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างอะซีโตนกับบิวทิลดีไฮด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทาลไซต์ที่ถูกปรับสภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และไฮโดรทาลไซต์ที่ถูกปรับสภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสซึ่งได้รับการเติมแต่งโลหะอัลคาไล ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอล

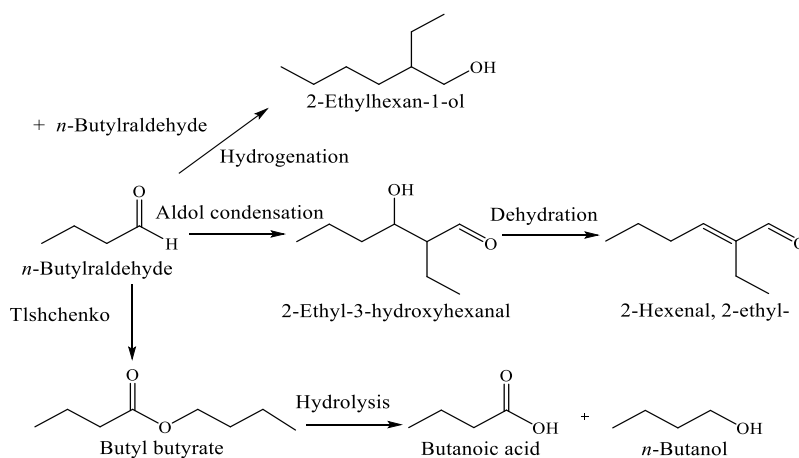
	HT400	HT600	HT800	Li1/HT400	Li5/HT400	Li10/HT400	K10/HT400	Cs10/HT400
Conversion								
Acetone	15.39	30.11	41.95	59.82	34.7	36.53	9.02	17.56
Butyraldehyde	6.66	16.96	25.39	45.08	17.7	19.48	2.94	6.43
Selectivity								
C1-C3	7.54	4.07	2.52	3.33	1.07	0.9	25.6	24.28
Acetaldehyde	1.84	1.65	2.25	0.76	0.2	0	0	18.71
Butanoic acid	5.38	1.08	0.73	6.35	0.79	2.14	0	0.68
2-Pentanone	5.13	1.17	0.38	3.55	1.89	2.13	7.08	10.88
n-Heptane	1.04	0.88	1.08	0.6	0	0	8.66	2.11
2-Heptanone	24.83	9.19	11.18	31.17	39.36	35.16	20.9	15.2
4-Heptanone	0	0.43	0.81	0.71	0.61	0	0	5.36
5-Hepten-2-one	1.02	15.55	41.06	7.24	0	0	0	1.82
2-Ethylhexan-1-ol	3.33	8.59	7.03	8.59	6.22	7.2	37.76	18.93
2-Hexenal, 2-ethyl-	7.82	30.05	3.23	20.92	6.58	4.12	0	2.01
6-Undecanone	19.99	19.84	6.66	6.77	0.44	3.63	0	0
Other	22.07	7.48	23.07	10.01	42.86	44.72	0	0
Condition : feed : acetone:butyraldehyde 1:2 molar ratio, reactant flow rate : 6.82 mg/min, temperature : 400 °C, catalyst : 0.15 g, W/F : 21.99 min, carrier gas : N ₂ , gas flow rate : 30 mL/min, reaction time : 5 h								

จากตารางที่ 1 ในการทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ณ ชั่วโมงที่ 5 ของการทำปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาให้ผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นหลายชนิด ได้แก่ สารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนในช่วง 1-3 อะตอม (C1-C3) อะซีตัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) กรดบิวทาโนอิก (Butanoic acid) 2-เพนทาโนน (2-Pentanone) นอร์มัล-เฮปเทน (n-Heptane) 2-เฮปทาโนน (2-Heptanone) 4-เฮปทาโนน (4-Heptanone) 5-เฮปทีน-2-โอน (5-Hepten-2-one) 2-เอทิลเฮกเซน-1-อล (2-Ethylhexan-1-ol) 2-เฮกซีนาล, 2-เอทิล- (2-Hexenal, 2-ethyl-) 6-อุนเดคคาโนน (6-Undecanone) และผลิตภัณฑ์อื่นๆ คาดว่าน่าจะเป็น 5-อุนเดคซีน-4-โอน (5-Undecen-4-one), 4-อุนเดคซีน-6-โอน

(4-Undecen-6-one), เบนซีน-เอทิลเพนทเมทิล (Benzene, ethylpentamethyl-), เฮกซานอิก, 2-เอทิล- (Hexanoic acid, 2-ethyl-) เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 5-6



ภาพที่ 5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลของอะซีโตนและบิวทาลดีไฮด์



ภาพที่ 6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลด้วยตัวเองของบิวทาลดีไฮด์

เมื่อเปรียบเทียบการเลือกสรรผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ พบว่า HT400 ให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น 2-เฮปทานอน (C7) และ 6-อุนเดคานอน (C11) ส่วนในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา HT600 ให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น 5-เฮปทีน-2-โอน (C7) 2-เฮกซนาล, 2-เอทิล- (C8) และ 6-อุนเดคานอน (C11) ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา HT800 ให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น 5-เฮปทีน-2-โอน (C7) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HT600 จะเกิดการควบแน่นด้วยตัวเองของบิวทาลดีไฮด์มากกว่า

ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา HT400 และ HT800 แสดงให้เห็นว่าสภาพพื้นผิวของไฮโดรทัลไซต์ที่ถูกปรับสภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสมีการเลือกสรรการดูดซับบิวทิลรีดไฮด์มากกว่าในกรณีของอะซีโตน เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอะซีโตน และบิวทิลรีดไฮด์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HT800 มีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าในกรณีของ HT600 และ HT400 ตามลำดับ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าการปรับสภาพไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิสูงเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนให้โลหะออกไซด์ผสมของอลูมินา และแมกนีเซียมออกไซด์ได้มาก ทำให้มีตำแหน่งที่ว่างไวในการเร่งปฏิกิริยาจำนวนมากส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นสูง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเติมแต่งโลหะอัลคาไลต่อการเลือกสรรผลิตภัณฑ์จึงเลือกใช้ไฮโดรทัลไซต์ที่ถูกปรับสภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นวัสดุรองรับ จากผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1Li/HT400 ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอะซีโตน และบิวทิลรีดไฮด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเติมแต่งตำแหน่งที่ว่างไวซึ่งเป็นเบสที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลได้ เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเลือกสรรผลิตภัณฑ์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1Li/HT400 ให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น 2-เฮปทาโนน (C7) และ 2-เฮกซีนาล, 2-เอทิล- (C8) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเติมแต่งลิเทียมให้สูงขึ้นในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา 5Li/HT400 และ 10Li/HT400 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอะซีโตน และบิวทิลรีดไฮด์มีค่าลดต่ำลง เนื่องจากการดูดตันของลิเทียมบนวัสดุรองรับไฮโดรทัลไซต์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Díez et al. (2006) ซึ่งศึกษาการเร่งปฏิกิริยาควบแน่นแบบอัลดอลระหว่างอะซีโตนกับซิทรัล (Citral) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลคาไล ได้แก่ ลิเทียม โซเดียม โพแทสเซียม และซีเซียมที่เติมแต่งบนวัสดุรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวสูง โดยเมื่อเติมแต่งโลหะในปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นลดต่ำลง เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเลือกสรรผลิตภัณฑ์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 5Li/HT400 และ 10Li/HT400 ให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น 2-เฮปทาโนน (C7) และผลิตภัณฑ์อื่นๆ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมแต่งลิเทียมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนอกจากจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาแล้ว ยังส่งผลต่อการเลือกสรรผลิตภัณฑ์ด้วย

ส่วนในกรณีของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10K/HT400 พบว่าการเติมแต่งโพแทสเซียมในปริมาณมากส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอะซีโตน และบิวทิลรีดไฮด์ลดต่ำลงมาก ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10Cs/HT400 พบว่าการเติมแต่งซีเซียมในปริมาณมากไม่ส่งผลบวกต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอะซีโตน และบิวทิลรีดไฮด์โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นมีค่าใกล้เคียงกับในกรณีของการใช้ HT400 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การเลือกสรรผลิตภัณฑ์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 10K/HT400 และ 10Cs/HT400 ให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น 2-เฮปทาโนน (C7) และ 2-เอทิลเฮกเซน-1-ออล (C8) มากไปกว่านั้นยังพบผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรคาร์บอนแก๊สจำนวนมาก ซึ่งคาดว่าจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสลายตัวของบิวทิลรีดไฮด์ (ดังภาพที่ 5) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากสปีชีส์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โพแทสเซียมออกไซด์ (เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แอลฟา-โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ (α -KOH) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3)) เพอริคลาสแมกนีเซียมออกไซด์ (Periclase MgO) และซีเซียมออกไซด์ (Cs_2O) (เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3)) ช่วยสนับสนุนปฏิกิริยาการสลายตัวของบิวทิลรีดไฮด์

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลระหว่างอะซีโตนกับบิวทิลรีดไฮด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทัลไซต์ที่ได้รับการปรับสภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (HT400, HT600 และ HT 800) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเติมแต่งโลหะอัลคาไลใน HT400 (1Li/HT400, 5Li/HT400, 10Li/HT400, 10K/HT400 และ 10Cs/HT400) จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา และประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาพบว่าสภาพทางความร้อนของไฮโดรทัลไซต์ และการ

เติมแต่งโลหะอัลคาไลบนไฮโดรทัลไซต์ที่ถูกปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความแรงของเบสที่แตกต่างกัน และความแรงของเบสที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพ และการเลือกสรรการเกิดผลิตภัณฑ์ โดยปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอลสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแบบข้าม และแบบด้วยตัวเองทำให้เกิดส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ควบแน่นหลายชนิดโดยมีองค์ประกอบหลักเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอน 7, 8 และ 11 อะตอม อย่างไรก็ตามการเติมแต่งโพแทสเซียมและซีเซียมจะให้การเลือกสรรผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรคาร์บอนแก๊สมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยทุนพัฒนานักวิจัยรุ่นกลาง (รหัสทุน NRCT5-RSA63008)

เอกสารอ้างอิง

- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). (2563). โมเดลเศรษฐกิจใหม่ BCG. ค้นจาก https://www.nstda.or.th/home/knowledge_post/bcg-by-nstda/
- อาทิตย์ อัสวสุชี. (2559). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเร่งปฏิกิริยาเคมี. ใน อาทิตย์ อัสวสุชี, การเร่งปฏิกิริยาเคมี (น.101-121). กรุงเทพฯ: ทริบเพิล กรุ๊ป.
- Abelló, S., Medina, F., Tichit, D., Pérez-Ramírez, J., Rodríguez, X., Sueiras, J. E., and Cesteros, Y. (2005). Study of alkaline-doping agents on the performance of reconstructed Mg–Al hydrotalcites in aldol condensations. **Applied Catalysis A: General**, 281(1-2), 191–198. doi:10.1016/j.apcata.2004.11.037
- Ausavasukhi, A., Krukrathok, N., and Singthaisong, P. (2023). Thermal transformation of copper incorporated hydrotalcite-derived oxides and their catalytic activity for ethanol dehydrogenation. **Industrial and Engineering Chemistry**, 117, 371–385. Doi:10.1016/j.jiec.2022.10.025
- Benedicto, G. P., Sotelo, R. M., Dalla Costa, B. O., Fetter, G., and Basaldella, E. I. (2018). Potassium-containing hydroxylated hydrotalcite as efficient catalyst for the transesterification of sunflower oil. **Materials Science**, 53, 12828–12836. doi:10.1007/s10853-018-2581-0
- Castro, Y. A., Ellis, J. T., Miller, C. D., and Sims, R. C. (2015). Optimization of wastewater microalgae saccharification using dilute acid hydrolysis for acetone, butanol, and ethanol fermentation. **Applied Energy**, 140, 14–19. doi:10.1016/j.apenergy.2014.11.045
- Choudhary, V. R., Rane, V. H., and Pandit, M. Y. (1997). Comparison of alkali metal promoted MgO catalysts for their surface acidity/basicity and catalytic activity/selectivity in the oxidative coupling of methane. **Chemical Technology & Biotechnology**, 68(2), 177–186. doi:10.1002/(sici)1097-4660(199702)68:2<177::aid-jctb645>3.0.co;2-u
- Díez, V. K., Apesteguía, C. R., and Di Cosimo, J. I. (2006). Aldol condensation of citral with acetone on MgO and alkali-promoted MgO catalysts. **Catalysis**, 240(2), 235–244. doi:10.1016/j.jcat.2006.04.003

FOODB. (2020). Showing Compound 2-Heptanone (FDB008055) Retrieved from

<https://foodb.ca/compounds/FDB008055>

Hamilton, C. A., Jackson, S. D., and Kelly, G. J. (2004). Solid base catalysts and combined solid base hydrogenation catalysts for the aldol condensation of branched and linear aldehydes. **Applied Catalysis A: General**, 263(1), 63–70. doi:10.1016/j.apcata.2003.12.009

Ji, W., Chen, Y., and Kung, H. H. (1997). Vapor phase aldol condensation of acetaldehyde on metal oxide catalysts. **Applied Catalysis A: General**, 161(1-2), 93–104. doi:10.1016/s0926-860x(96)00390-0

Lestariningsih, T., Sabrina, Q., Ratri, C. R., and Lalasari, L. H. (2021). Brine water as lithium source in the synthesis of LiBOB electrolyte for Lithium-Ion battery application. Paper presented at the 4th Conference of International Seminar on Metallurgy and Materials.

Pischetola, C., Hesse, F., Bos, J. -W. G., and Cárdenas-Lizana, F. (2021). Effect of Lewis basicity on the continuous gas phase condensation of benzaldehyde with acetophenone over MgO. **Applied Catalysis A: General**, 623, 118277

Rode, E. J., Gee, P. E., Marquez, L. N., Uemura, T., and Bazargani, M. (1991). Aldol condensation of butanal over alkali metal zeolites. **Catalysis Letters**, 9(1-2), 103–113. doi:10.1007/bf00769088

Wiehn, M., Staggs, K., Wang, Y., and Nielsen, D. R. (2013). In situ butanol recovery from *Clostridium acetobutylicum* fermentations by expanded bed adsorption. **Biotechnology Progress**, 30(1), 68–78. doi:10.1002/btpr.1841

Xie, X., Su, H., Chen, J., Zuo, H., Tang, X., and Li, Y. (2018). Microwave dielectric properties of low-temperature-fired LiAlO₂-Li₂TiO₃ composite ceramics with near-zero temperature coefficient. **Materials Science: Materials in Electronics**, 29, 17771–17776. doi:10.1007/s10854-018-9884-4

Yang, X., Li, S., Huang, H., Li, J., Kobayashi, N., and Kubota, M. (2017). Effect of carbon nanoadditives on lithium hydroxide monohydrate-based composite materials for low temperature chemical heat storage. **Energies**, 10(5), 644. doi:10.3390/en10050644

Zhang, G., Zhang, H., Yang, D., Li, C., Peng, Z., and Zhang, S. (2016). Catalysts, kinetics and process optimization for the synthesis of methyl acrylate over Cs-P/V-Al₂O₃. **Catalysis Science & Technology**, 6(16), 6417–6430. doi:10.1039/c6cy00620e

Zhang, S., Tao, L., Zhang, Y., Wang, Z., Gou, G., Jiang, M., and Zhou, Z. (2016). The role and mechanism of K₂CO₃ and Fe₃O₄ in the preparation of magnetic peanut shell based activated carbon. **Powder Technology**, 295, 152–160. doi:10.1016/j.powtec.2016.03.034