

การเพิ่มมูลค่าลิกซ์เซอรอลผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกและ ลิกซ์เซอรอลภายใต้การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟโดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

พทุธิพร เทียมสินสังวร¹ ละอองทิพย์ ยุววรรณศรี¹ ชญานุตม์ โฆษิตานนท์² และ วีรินทร์ดา เมณส์^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ.

ที่อยู่อีเมล: weerinda.a@en.rmutt.ac.th

Received: April 22, 2026 Revised: June 4, 2026 Accepted: June 9, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกกับลิกซ์เซอรอลเพื่อผลิตลิกซ์เซอไรด์มูลค่าเพิ่มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยมีมุ่งประเมินผลของรูปแบบการให้ความร้อน อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น และอุณหภูมิ ต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกและร้อยละผลได้ของโมโนลิกซ์เซอไรด์ (MG yield) ผลการทดลองพบว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของ MG ได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไป โดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโมโนลิกซ์เซอไรด์คือ อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อลิกซ์เซอรอล เท่ากับ 1:4 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO เท่ากับ 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก 63.1% ค่าการเลือกเกิดของ MG 75.4% และค่า MG yield 47.6% ภายใต้สภาวะเดียวกัน ซึ่งระบบกวนเชิงกลทั่วไปให้ค่า MG yield เพียง 28.1% นอกจากนี้ อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อลิกซ์เซอรอล 1:4 ให้ค่า MG yield สูงกว่าอัตราส่วนอื่นที่ศึกษา สะท้อนว่าการใช้ลิกซ์เซอรอลส่วนเกินในระดับที่เหมาะสมช่วยส่งเสริมการเกิดผลิตภัณฑ์เป้าหมาย ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิเป็น 180 และ 200 °C แม้ช่วยเพิ่มค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก แต่ทำให้ค่า MG yield ลดลงเหลือ 40.5 และ 38.9% ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากการเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องของ MG ไปเป็น DG และ TG ดังนั้น การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อัตราส่วนโมล 1:4 อุณหภูมิ 160 °C และเวลา 30 นาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโมโนลิกซ์เซอไรด์จากลิกซ์เซอรอลภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา

คำสำคัญ: ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน กรดโอเลอิก ลิกซ์เซอรอล ซิงค์ออกไซด์ โมโนลิกซ์เซอไรด์

Valorization of glycerol via esterification of oleic acid and glycerol under microwave heating using zinc oxide as a catalyst

Puttiporn Thiamsinsangwon¹, La-onghip Yuwansri¹, Chayanoot Kositanont² and Weerinda Mens^{1*}

¹ Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² National Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA)

* Corresponding author.

Email address: weerinda.a@en.rmutt.ac.th

Received: April 22, 2026 Revised: June 4, 2026 Accepted: June 9, 2026

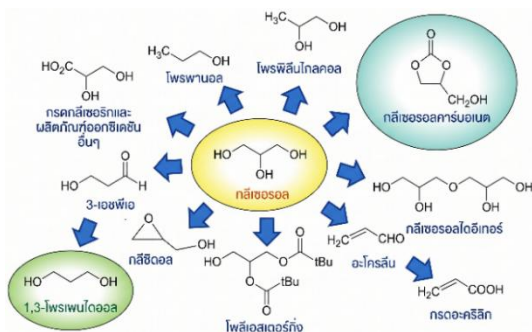
Abstract

This study investigated the esterification of oleic acid with glycerol for value-added glycerides production of using zinc oxide as the catalyst, with emphasis on evaluating the effects of heating mode, reactant molar ratio, and reaction temperature on oleic acid conversion and monoglyceride yield (MG yield) were evaluated. The results showed that microwave heating clearly enhanced MG yield compared with a conventional mechanically stirred reactor. The suitable condition for monoglyceride production was an oleic acid-to-glycerol molar ratio of 1:4, a ZnO catalyst loading of 0.5 wt.% based on oleic acid, a reaction temperature of 160 °C, and a reaction time of 30 min. Under this condition, oleic acid conversion, MG selectivity and MG yield were 63.1%, 75.4%, and 47.6%, respectively. In contrast, the conventional mechanically stirred reactor provided an MG yield of only 28.1% under the same condition. In addition, the oleic acid-to-glycerol molar ratio of 1:4 gave a higher MG yield than the other investigated molar ratios, indicating that an appropriate excess of glycerol promoted the formation of the target product. Although increasing the reaction temperature to 180 and 200 °C enhanced oleic acid conversion, the MG yield decreased to 40.5% and 38.9%, respectively, possibly due to the acceleration of consecutive reactions from MG to diglyceride (DG) and triglyceride (TG). Therefore, microwave-assisted esterification at a molar ratio of 1:4, 160 °C, and 30 min was identified as a suitable condition for monoglyceride production from glycerol under the investigated conditions.

Keywords: Esterification, Oleic acid, Glycerol, Zinc oxide, Monoglyceride

1. บทนำ

กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้สำคัญจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพ ทำให้การนำกลีเซอรอลไปใช้ประโยชน์ในรูปของผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มกลายเป็นประเด็นวิจัยที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์ กระบวนการและการพัฒนาแนวทางผลิตภัณฑ์ชีวภาพชนิดใหม่ [1] เส้นทางการเพิ่มมูลค่ากลีเซอรอลมีความหลากหลาย ครอบคลุมทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดีไฮเดรชัน คาร์บอนเนชัน และเอสเทอริฟิเคชัน ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยกลีเซอรอลสามารถเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มหลายชนิด เช่น 1,3-propanediol, glycerol carbonate, glycidol, acrolein และสารกลุ่มกลีเซอไรด์ ทั้งนี้เส้นทางการแต่ละแบบให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติและการใช้งานแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา สภาพการดำเนินปฏิกิริยา และวิธีการให้ความร้อนที่ใช้ ดังนั้น การเลือกเส้นทางปฏิกิริยาที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มมูลค่ากลีเซอรอลในเชิงอุตสาหกรรม หนึ่งในแนวทางที่มีศักยภาพคือการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride, MG) ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมัน เนื่องจากโมโนกลีเซอไรด์เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง เกษษณภัณฑ์ และระบบอิมัลชันต่าง ๆ โดยเฉพาะในฐานะอิมัลซิไฟเออร์ [2, 3]



รูปที่ 1 เส้นทางหลักของการเปลี่ยนกลีเซอรอลไปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มผ่านปฏิกิริยาประเภทต่าง ๆ

อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์จากกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลยังมีข้อจำกัดหลายประการ ทั้งจากลักษณะของระบบที่มีความหนืดสูง ปัญหาเรื่องการถ่ายโอนมวล การถ่ายเทความร้อนที่ไม่

รวดเร็ว และการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็นไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ซึ่งทำให้การควบคุมค่าการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (selectivity) ไปยังผลิตภัณฑ์เป้าหมายทำได้ยาก งานก่อนหน้ารายงานว่า การเกิดโมโนกลีเซอไรด์ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ความเป็นกรด-เบสของพื้นผิว สัดส่วนสารตั้งต้น และเวลาการทำปฏิกิริยา [4, 5]

ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ชนิดเนื้อผสมและตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของสังกะสีได้รับความสนใจในปฏิกิริยานี้ เนื่องจากมีความเสถียรเชิงความร้อน แยกออกจากระบบได้ง่าย และสามารถให้ตำแหน่งออกฤทธิ์ที่ช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของกรดไขมันกับหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มีรายงานว่าตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO รองรับบนตัวพาสามารถให้ค่าการเปลี่ยนแปลง (conversion) ของกรดโอเลอิกในระดับสูงและให้ค่า selectivity ต่อโมโนกลีเซอไรด์ที่น่าสนใจ จึงสะท้อนว่า ZnO เป็นตัวเร่งที่มีศักยภาพสำหรับระบบกรดโอเลอิก-กลีเซอรอล [6, 7] นอกจากชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว วิธีการให้ความร้อนยังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพของกระบวนการให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟได้รับความสนใจมากขึ้นในงานแปรรูปกลีเซอรอลและปฏิกิริยาอินทรีย์หลายประเภท เนื่องจากสามารถถ่ายเทพลังงานสู่สารตั้งต้นได้อย่างรวดเร็ว ให้ความร้อนเชิงปริมาตร ลดเวลาที่ระบบต้องใช้เพื่อเข้าสู่สภาวะปฏิกิริยา และในหลายกรณีช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาตลอดจนปรับปรุงผลได้ผลิตภัณฑ์ (yield) และ selectivity ของผลิตภัณฑ์ ในปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระสูง [8] Gole และ Gogate รายงานว่าการใช้ไมโครเวฟช่วยเร่งปฏิกิริยาและลดเวลาการดำเนินกระบวนการได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบทั่วไป [9] อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวมุ่งเน้นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นหลัก ขณะที่ข้อมูลเกี่ยวกับการควบคุมการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์กลีเซอไรด์แต่ละชนิด โดยเฉพาะ MG และ DG ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง ยังมีรายงานงานวิจัยค่อนข้างจำกัด นอกจากนี้ยังไม่พบการศึกษาที่เปรียบเทียบผลของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟและการให้ความร้อนแบบกวนเชิงกลทั่วไปภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO สำหรับระบบกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลอย่างเป็นระบบ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO

ต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์กลีเซอรอล เพื่อประเมินศักยภาพในการควบคุมการเกิด MG และ DG ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เป้าหมายที่มีมูลค่าสูง

จากข้อมูลดังกล่าว การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับกลีเซอรอล โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่ม conversion และส่งเสริมการเกิดผลิตภัณฑ์โมโนกลีเซอรอล ขณะเดียวกันก็ชะลอการเกิดผลิตภัณฑ์ขั้นสูงอย่างไตรกลีเซอรอล งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาปฏิกิริยาระหว่างกรดโอเลอิกกับกลีเซอรอลภายใต้คลื่นไมโครเวฟโดยใช้ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พร้อมเปรียบเทียบกับระบบให้ความร้อนแบบทั่วไป และประเมินผลของสภาวะปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่า conversion ค่า selectivity และ ค่า yield ของผลิตภัณฑ์ MG ที่ได้

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและสารเคมี

กรดโอเลอิก (Oleic acid, $C_{18}H_{34}O_2$, Daejung) กลีเซอรอล (Glycerol, $C_3H_8O_3$, Daejung) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO 99%, Sigma-Aldrich) นอกจากนี้สารที่ใช้ในการไทเทรตเพื่อหาความเป็นกรดประกอบด้วยเอทานอล (Ethanol, Labscan) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH, KemAus) และฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein, $C_{20}H_{14}O_4$) และตัวทำละลายสำหรับการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ด้วยโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High-performance liquid chromatography, HPLC) ได้แก่ อะซีโตน เมทานอล อะซีโตนไทรล์ และน้ำ ซึ่งทั้งหมดเป็นเกรด HPLC จาก Honeywell Systems (Thailand) Ltd. นอกจากนี้ สารมาตรฐานเชิงปริมาณสำหรับ HPLC ได้แก่ 1-glycerol monononadecanoate ($\geq 99.0\%$), 1,3-glycerol dinonadecanoate ($\geq 99.0\%$) และ glycerol trinonadecanoate ($\geq 97.0\%$) จาก Sigma-Aldrich

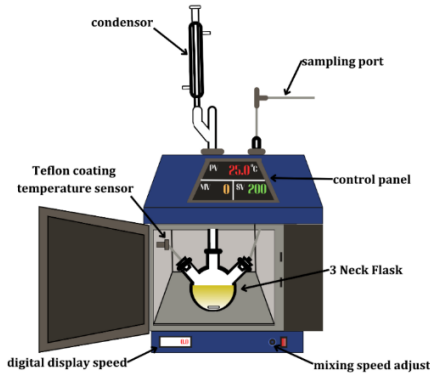
2.2 การทดสอบปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลภายใต้คลื่นไมโครเวฟ

การศึกษานี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์คลื่นไมโครเวฟรุ่น MCR-3SX ผลิตโดยบริษัท ZOIBKD ประเทศจีน ดังแสดงในรูปที่ 2 เครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วยขวดก้นกลมสามคอ ชุดควบคุมอุณหภูมิ หัววัดอุณหภูมิชนิดใยแก้วนำแสง เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และเซนเซอร์วัดกำลังไฟฟ้าในช่วง 0–900 W ในการทดลอง

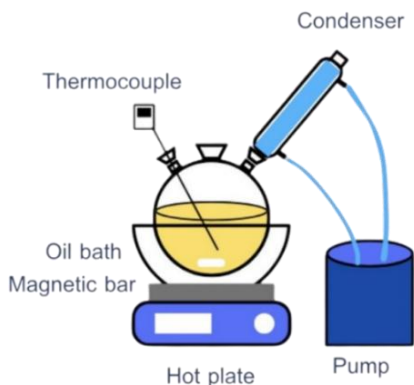
ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ใช้ขวดก้นกลมสามคอขนาด 250 mL บรรจุกลีเซอรอล (GLY) และกรดโอเลอิก (OA) ตามอัตราส่วนที่กำหนด ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO โดยไม่เติมตัวทำละลายเพื่อช่วยปฏิกิริยา และกำหนดความเร็วรอบในการกวนไว้ที่ 700 รอบต่อนาที (rpm) ระบบถูกเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิเริ่มต้นไปยังอุณหภูมิเป้าหมายภายในเวลา 4 นาที การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟดำเนินการภายใต้โหมดควบคุมอุณหภูมิ (temperature-controlled mode) โดยใช้หัววัดอุณหภูมิชนิดใยแก้วนำแสงในการติดตามอุณหภูมิของปฏิกิริยาแบบเวลาจริง และใช้ระบบควบคุมแบบ PID ในการปรับกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟโดยอัตโนมัติให้สอดคล้องกับอุณหภูมิที่กำหนด เครื่องปฏิกรณ์สามารถให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 900 W ซึ่งกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟไม่ได้ถูกจ่ายที่ค่าสูงสุดตลอดการทดลอง แต่จะถูกปรับเพิ่มหรือลดตามอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้เพื่อรักษาอุณหภูมิของปฏิกิริยาให้คงที่ตลอดช่วงเวลากการทดลองและมีการกวนอย่างต่อเนื่องที่ 700 rpm ช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในระบบและลดโอกาสการเกิดจุดร้อนเฉพาะที่ ในการทดลองเปรียบเทียบรูปแบบการให้ความร้อนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟและเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไป ใช้อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก และอุณหภูมิ 160 °C โดยไม่เติมตัวทำละลาย จากนั้นการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟโดยแปรผันอัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1:1 ถึง 1:6 และอุณหภูมิระหว่าง 160–180 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก การทดลองดำเนินการเป็นเวลา 0–120 นาที โดยเก็บตัวอย่างปริมาตรประมาณ 1.5 mL เป็นช่วง ๆ ตามเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงแยกชั้นและแยกชั้นอินทรีย์ส่วนบนเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับการให้ความร้อนแบบทั่วไป (การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไป, Conventional mechanically stirred reactor; CSR) โดยการทดลองในระบบ CSR ใช้ขวดปฏิกิริยาแก้วสามคอติดตั้งรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลสำหรับติดตามอุณหภูมิอย่างแม่นยำ และช่องเก็บตัวอย่างสำหรับการถอนตัวอย่างเป็นช่วง ๆ คอนเดนเซอร์ถูกทำให้เย็นด้วยน้ำเย็นหมุนเวียนเพื่อป้องกันการสูญเสียจากการระเหยระหว่างปฏิกิริยา

การกวนถูกควบคุมให้คงที่ที่ 700 rpm และควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาโดยการหมุนเวียนน้ำมันซิลิโคนที่ให้ความร้อนผ่านอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิภายนอกดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทดสอบปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลภายใต้คลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทดสอบปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไป

2.3 วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณของผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์เชิงปริมาณของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาดำเนินการด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High-performance liquid chromatography; HPLC) โดยใช้เครื่อง HPLC รุ่น Surveyor Plus ผลิตโดยบริษัท Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งติดตั้งตัวตรวจวัดชนิดโฟโตไดโอดอาร์เรย์ (Photodiode array; PDA) การแยกสารใช้คอลัมน์ InertSustain C18 (4.6 mm x 250 mm, 5 µm) โดยควบคุมอุณหภูมิคอลัมน์ไว้ที่ 40 °C

สำหรับการหาปริมาณกรดโอเลอิก (OA) และ MG ใช้วิธีแยกแบบไอโซครีติก โดยใช้วัฏภาคเคลื่อนที่ประกอบด้วยอะซิโตน/ไตรคลอโรเอทรีน ในอัตราส่วน 87:13 โดยปริมาตร และเติมกรดไตรฟลูออโรอะซิติก (Trifluoroacetic acid; TFA) 0.1% โดยปริมาตร อัตราการไหลกำหนดไว้ที่ 0.7 mL/min และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 210 nm สำหรับการแยก DG และ TG ใช้ วัฏภาคเคลื่อนที่แบบไอโซครีติกอีกระบบหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยอะซิโตน/อะซิโตน/ไตรคลอโรเอทรีน ในอัตราส่วน 40:60 โดยปริมาตร อัตราการไหลคงไว้ที่ 0.8 mL/min ใช้เวลาวิเคราะห์รวม 40 นาที และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 210 nm

2.4 การคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก ค่าการเลือกเกิด และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ (Selectivity) หมายถึง สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์กลุ่มกลีเซอไรด์ทั้งหมด โดยพิจารณาจำนวนหมู่กรดไขมันที่อยู่ในโมเลกุลของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ได้แก่ MG DG และ TG

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (Yield) หมายถึง ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจริงจากกรดโอเลอิกที่เข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งคำนวณจากผลคูณระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกและค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก (X_{OA}) ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์โมโนกลีเซอไรด์ (S_{MG}) ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ไดกลีเซอไรด์ (S_{DG}) ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ไตรกลีเซอไรด์ (S_{TG}) ร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ (Y_{MG}) ร้อยละผลได้ของไดกลีเซอไรด์ (Y_{DG}) ร้อยละผลได้ของไตรกลีเซอไรด์ (Y_{TG}) แสดงในสมการที่ (1) - (5)

$$X_{OA} (\%) = \left(1 - \frac{C_{OA}}{C_{OA,0}}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$S_{MG} = \frac{C_{MG}}{C_{MG} + 2C_{DG} + 3C_{TG}} \quad (2)$$

$$S_{DG} = \frac{2C_{DG}}{C_{MG} + 2C_{DG} + 3C_{TG}} \quad (3)$$

$$S_{TG} = \frac{3C_{TG}}{C_{MG} + 2C_{DG} + 3C_{TG}} \quad (4)$$

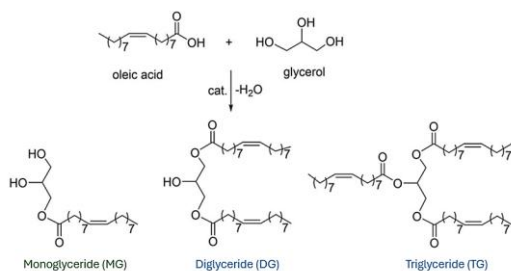
$$Y_{MG} (\%) = X_{OA} (\%) \times S_{MG} \quad (5)$$

เมื่อ $C_{OA,0}$ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดโอเลอิก, C_{OA} คือ ความเข้มข้นของกรดโอเลอิก ณ เวลาใด ๆ, C_{MG} , C_{DG} และ C_{TG} คือ ความเข้มข้นของ MG DG และ TG ตามลำดับ S_{MG} , S_{DG} และ S_{TG} แสดงในรูปเศษส่วน

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ผลของรูปแบบการให้ความร้อนต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกกับกลีเซอรอลเป็นปฏิกิริยาแบบลำดับขั้น โดยกลีเซอรอลสามารถทำปฏิกิริยากับกรดไขมันเพื่อให้ได้ MG ก่อน จากนั้น MG สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเป็น DG และ TG ตามลำดับ ดังสมการในรูปที่ 4 ดังนั้น แม้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกจะสะท้อนความก้าวหน้าของปฏิกิริยาโดยรวม แต่การประเมินสมรรถนะของระบบจำเป็นต้องพิจารณาพร้อมกับค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เนื่องจากผลิตภัณฑ์เป้าหมายในงานนี้คือ MG และ DG ในขณะที่ TG เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการซึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาต่อเนื่องในลำดับถัดไป



รูปที่ 4 เส้นทางการปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับกลีเซอรอล (ดัดแปลงจาก [10])

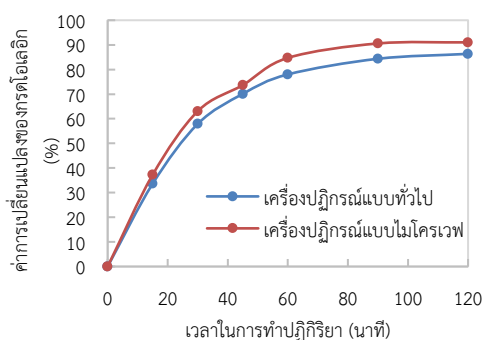
รูปที่ 5 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกและกลีเซอรอล โดยเปรียบเทียบระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไปและเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟภายใต้สภาวะอัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO เท่ากับ 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C ผลการทดลองพบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของปฏิกิริยาในทั้งสองระบบ โดยเฉพาะในช่วง 0-30 นาทีแรก ซึ่งสะท้อนว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้รวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นยังสูงและตำแหน่งออกฤทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถเข้าถึงได้ดี

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการให้ความร้อน พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไปตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา โดยที่เวลา 30 นาที ระบบไมโครเวฟให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกเท่ากับ 63.1% ขณะที่ระบบกวนเชิงกลทั่วไปให้ค่า 57.9% และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาที่ 120 นาที ระบบไมโครเวฟให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก 91.0% สูงกว่าระบบกวนเชิงกลทั่วไปซึ่งให้ค่า 86.4% ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนกรดโอเลอิกภายใต้สภาวะที่ศึกษา ซึ่งอาจจะมาเกิดจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟซึ่งเป็นการถ่ายเทพลังงานอย่างรวดเร็วและเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร อาจช่วยลดข้อจำกัดด้านการถ่ายเทความร้อน เพิ่มความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และส่งเสริมการสัมผัสระหว่างสารตั้งต้นกับตำแหน่งออกฤทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO ได้ดีกว่าการให้ความร้อนแบบกวนเชิงกลทั่วไปที่อาศัยการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ระบบ อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกในทั้งสองระบบมีแนวโน้มเข้าใกล้สภาวะสมดุล โดยระบบไมโครเวฟยังคงให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงกว่าระบบกวนเชิงกลทั่วไปตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม การเพิ่มเวลาปฏิกิริยาให้นานขึ้นควรพิจารณาพร้อมกับค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ MG, DG และ TG เนื่องจาก MG สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็น DG และ TG ได้

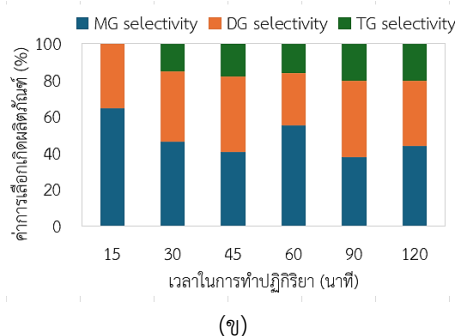
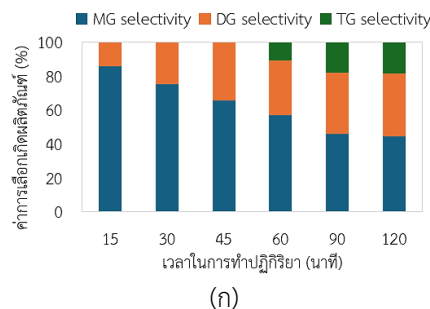
เมื่อพิจารณาค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก-ข) พบว่ารูปแบบการให้ความร้อนมีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์กลีเซอไรด์อย่างชัดเจน โดยระบบไมโครเวฟให้ค่าการเลือกเกิดของ MG สูงกว่าระบบกวนเชิงกลทั่วไปที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที โดยมีค่าเท่ากับ 85.7, 75.4 และ 65.7% ตามลำดับ ขณะที่ระบบกวนเชิงกลทั่วไปให้ค่าเท่ากับ 64.6, 46.2 และ 40.5% ที่เวลาเดียวกัน นอกจากนี้ ระบบไมโครเวฟยังไม่พบการเกิด TG ที่เวลา 15-45 นาที ในขณะที่ระบบกวนเชิงกลทั่วไปเริ่มพบ TG ตั้งแต่วเวลา 30 นาที และมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 15-20% ตั้งแต่วเวลา 30 ถึง 120 นาที แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดปฏิกิริยาแบบลำดับขั้น (series reaction) โดย MG เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งกลาง (intermediate product) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับกรดโอเลอิกเพื่อเปลี่ยนเป็น DG และ TG ได้ ดังนั้น การที่ระบบไมโครเวฟให้ค่า

การเลือกเกิดของ MG สูง และยังไม่พบ TG ที่เวลา 15–45 นาที แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟภายใต้สภาวะที่ศึกษามีแนวโน้มช่วยส่งเสริมการคงอยู่ของ MG และชะลอการเกิดผลิตภัณฑ์ขั้นสูงอย่าง TG เมื่อเปรียบเทียบกับ การให้ความร้อนแบบกวนเชิงกลทั่วไป

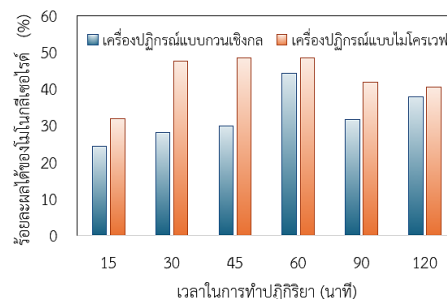
เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ (MG yield) ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าระบบไมโครเวฟให้ค่า MG yield สูงกว่าระบบกวนเชิงกลทั่วไปในทุกช่วงเวลาการศึกษา โดยที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที ระบบไมโครเวฟให้ค่า MG yield เท่ากับ 32.0, 47.6 และ 48.4% ตามลำดับ ขณะที่ระบบกวนเชิงกลทั่วไปให้ค่า 24.4, 28.1 และ 30.0% ตามลำดับ แม้ค่า MG yield ของระบบไมโครเวฟที่เวลา 45 นาทีจะสูงที่สุด แต่มีค่าใกล้เคียงกับที่เวลา 30 นาที โดยแตกต่างกันเพียงประมาณ 0.85% เท่านั้น ดังนั้น เมื่อพิจารณาร่วมกันระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก ค่าการเลือกเกิดของ MG ค่า MG yield และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เวลา 30 นาที ภายใต้ระบบไมโครเวฟจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิต MG ภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา เนื่องจากให้ค่า MG yield สูงใกล้เคียงกับค่าสูงสุด ใช้เวลาปฏิกิริยาสั้นกว่าเวลา 45 นาที และยังไม่พบการเกิด TG แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดขึ้นแบบลำดับขั้น โดย MG เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งกลาง (intermediate product) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับกรดโอเลอิกเพื่อเกิดเป็น DG และ TG ตามลำดับ



รูปที่ 5 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟและแบบกวนเชิงกล ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C



รูปที่ 6 ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันใน (ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟและ (ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกล (ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C)



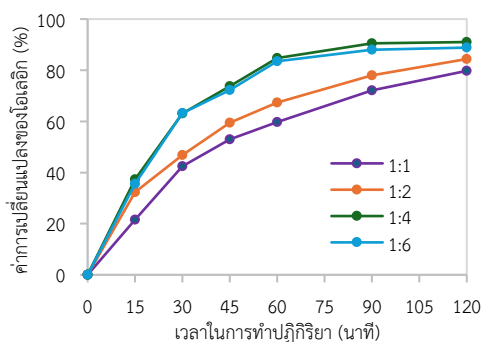
รูปที่ 7 ร้อยละผลได้โมโนกลีเซอไรด์ (MG yield, %) ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C

3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ผลการทดลองดังรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลมีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันอย่างชัดเจน โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรอลจาก 1:1 เป็น 1:4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกช่วงเวลาของปฏิกิริยา และอัตราส่วน 1:4 ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงที่สุดภายใต้สภาวะที่ศึกษา สะท้อนว่า

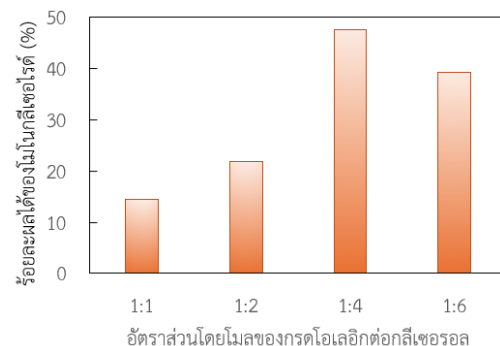
การมีกลีเซอรอลส่วนเกินช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาไปข้างหน้าและเพิ่มโอกาสในการเกิดผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในระบบนี้ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้นเป็นลำดับขั้น โดยกรดโอเลอิกทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลเพื่อให้นโมโนกลีเซอรอล จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นไดกลีเซอรอลและไตรกลีเซอรอลตามลำดับ ดังนั้น การเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลในระบบจึงมีส่วนช่วยขับเคลื่อนปฏิกิริยาขั้นต้นและเพิ่มการเกิดผลิตภัณฑ์กึ่งกลาง โดยเฉพาะโมโนกลีเซอรอลและไดกลีเซอรอล นอกจากนี้ เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นระบบสองเฟส การเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรอลให้เหมาะสมย่อมช่วยเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลที่สามารถละลายหรือกระจายตัวในเฟสกรดโอเลอิกได้มากขึ้น จึงช่วยให้การสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นและตำแหน่งออกฤทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น [5] อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรอลเป็นอัตราส่วน 1:6 พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1:4 แสดงให้เห็นว่าการใช้กลีเซอรอลเกินระดับที่เหมาะสมไม่ได้ช่วยเพิ่มสมรรถนะของปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง พฤติกรรมดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดด้านสมดุลเฟสและการถ่ายโอนมวลของระบบ เนื่องจากกลีเซอรอลมีความสามารถในการละลายหรือกระจายตัวในเฟสกรดโอเลอิกอย่างจำกัด การเพิ่มกลีเซอรอลมากเกินไปจึงอาจไม่เพิ่มปริมาณกลีเซอรอลที่พร้อมเข้าทำปฏิกิริยาในเฟสอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังอาจทำให้ความหนืดของระบบสูงขึ้น ส่งผลต่อการกวนผสมและการถ่ายโอนมวลระหว่างเฟส



รูปที่ 8 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลต่างๆ (ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C)

อย่างไรก็ตาม ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสะท้อนเพียงความก้าวหน้าของปฏิกิริยาโดยรวม แต่ยังไม่สามารถบ่งชี้ปริมาณของผลิตภัณฑ์เป้าหมายได้โดยตรง เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับกลีเซอรอลเกิดแบบลำดับขั้น โดย MG เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งกลางที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับกรดโอเลอิกเพื่อเกิดเป็น DG และ TG ตามลำดับ ดังนั้น เพื่อประเมินว่าอัตราส่วนโดยโมลที่ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงและสามารถส่งเสริมการเกิดผลิตภัณฑ์ MG งานวิจัยนี้จึงพิจารณาค่า MG yield ที่เวลา 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ให้ค่า MG yield สูงภายใต้ระบบไมโครเวฟ โดยจากผลการศึกษาในหัวข้อก่อนหน้า เมื่อพิจารณาค่า MG yield ที่เวลา 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าอัตราส่วนกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลที่ 1:4 ให้ค่า MG yield สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 47.6% ขณะที่อัตราส่วนอื่นให้ค่า MG yield ต่ำกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราส่วนกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลที่ 1:4 ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันต่อไป



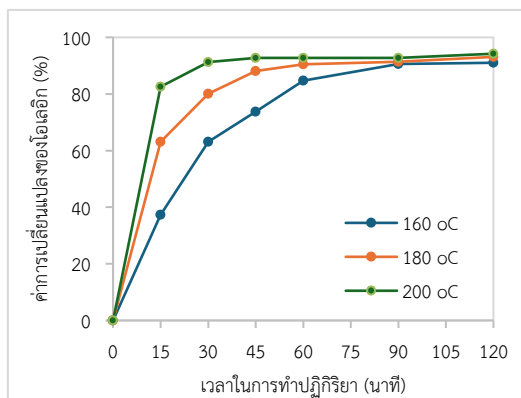
รูปที่ 9 ร้อยละผลได้โมโนกลีเซอรอล (MG yield, %)

ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลต่างๆ (ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที)

3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิ 160, 180 และ 200 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO ปริมาณ 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อ

ค่าการเปลี่ยนของกรดโอเลอิกอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการเปลี่ยนของกรดโอเลอิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเกิดขึ้นได้รวดเร็วมากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงต้นของปฏิกิริยา (0–30 นาที) ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้โมเลกุลในระบบมีพลังงานจลน์สูงขึ้น ทำให้ความถี่และประสิทธิภาพของการชนกันระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น จึงช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามหลักของอาร์เรเนียสและทฤษฎีการชน [6, 11, 12]

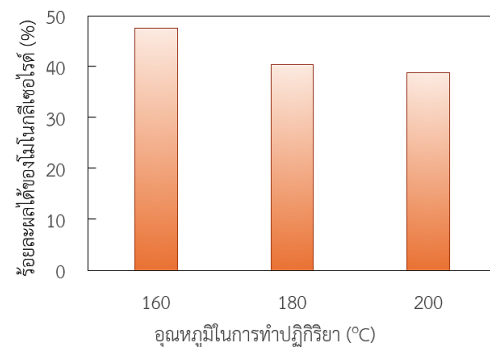


รูปที่ 10 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.%)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 200 °C ระบบให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงที่สุดในทุกช่วงเวลาการศึกษา สะท้อนว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสะท้อนเพียงความก้าวหน้าของปฏิกิริยาโดยรวม แต่ยังไม่สามารถบ่งชี้การเกิดผลิตภัณฑ์เป้าหมายได้โดยตรง เนื่องจาก MG เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งกลางที่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็น DG และ TG ได้ ดังนั้น จึงพิจารณาร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ (MG yield) ที่เวลา 30 นาที ร่วมด้วย ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าอุณหภูมิ 160 °C ให้ค่า MG yield สูงที่สุดที่ 47.6% ขณะที่อุณหภูมิ 180 และ 200 °C ให้ค่า MG yield ลดลงเหลือ 40.5 และ 38.9% ตามลำดับ แม้อุณหภูมิ 180 และ 200 °C จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงกว่า 160 °C แต่ค่า MG yield ที่ลดลงแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่อง

ของ MG ไปเป็น DG และ TG ดังนั้น การพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงไม่ควรพิจารณาจากค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกเพียงอย่างเดียว แต่ควรพิจารณาพร้อมกับค่า MG yield ซึ่งสะท้อนปริมาณ MG ที่เกิดขึ้นจริง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ร่วมด้วยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่ 200 °C มีสีเข้มกว่าสภาวะอื่นอย่างชัดเจนจากการสังเกตด้วยตาเปล่า ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์บางส่วนภายใต้อุณหภูมิสูง [13, 14] ดังนั้น แม้อุณหภูมิ 200 °C จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงสุด แต่พบการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน ดังนั้นการทำการปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 160 °C จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิต MG ภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา



รูปที่ 11 ร้อยละผลได้โมโนกลีเซอไรด์ (MG yield, %) ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที)

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาพบว่า การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟช่วยเพิ่มสมรรถนะของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไป ภายใต้สภาวะอัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก ที่อุณหภูมิ 160 °C ระบบไมโครเวฟให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก 63.1% ที่เวลา 30 นาที สูงกว่าระบบกวนเชิงกลทั่วไปซึ่งให้ค่า 57.9% ภายใต้สภาวะเดียวกัน นอกจากนี้ ระบบไมโครเวฟยังให้ค่าการเลือกเกิดของ MG สูงกว่า และไม่พบการเกิด TG ในช่วงเวลา 15–45 นาที แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมี

แนวโน้มช่วยส่งเสริมการเกิด MG และชะลอการเกิดผลิตภัณฑ์ชั้นสูงอย่าง TG

เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ (MG yield) พบว่าระบบไมโครเวฟให้ค่า MG yield 47.6% ที่เวลา 30 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสูงสุด 48.4% ที่เวลา 45 นาที แต่ใช้เวลาปฏิกิริยาน้อยกว่า จึงเลือกเวลา 30 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการผลิต MG ภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา สำหรับอัตราส่วนโดยโมล พบว่าอัตราส่วนกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 ให้ค่า MG yield สูงกว่าอัตราส่วนอื่น ขณะที่ผลของอุณหภูมิพบว่าแม้อุณหภูมิ 180 และ 200 °C จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงขึ้น แต่ค่า MG yield ลดลงเหลือ 40.5 และ 38.9% ตามลำดับ และที่ 200 °C พบการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโมโนกลีเซอไรด์จากกลีเซอรอลภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา คือ การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1:4 ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 160 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการพัฒนาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 (รหัสโครงการวิจัย FRB68E0719) (รหัสคำรับรอง FRB680045/0168)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yenchan J, Putivisutisak S, Weeranoppanant N, Ngaosuwan K, Chanthon N, Zullaikah S, Phan AN, Assabumrungrat S, Mens W. Intensified glycerolysis of palm oil in a spinning disc reactor for continuous monoglyceride production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2025;13(29):11301-14.
- [2] Size FCM. Share & trends analysis report by application (plastics & fibers, industrial), by product (organic acids, alcohols), by region (Asia Pacific, North America), and segment forecasts, 2023–2030. San Francisco (CA) USA: Grand View Research; 2023.
- [3] Menalla E, Serna JG, Cantero D, Cocero MJ. Hydrothermal hydrolysis of triglycerides: tunable and intensified production of diglycerides, monoglycerides, and fatty acids. *Chemical Engineering Journal*. 2024;493: 152391.
- [4] Díaz I, Márquez-Alvarez C, Mohino F, Pérez-Pariente Jn, Sastre E. Combined alkyl and sulfonic acid functionalization of MCM-41-type silica: part 2. esterification of glycerol with fatty acids. *Journal of Catalysis*. 2000; 193(2):295-302.
- [5] Chanthon N, Ngaosuwan K, Kiatkittipong W, Wongsawaeng D, Mens W, Weeranoppanant N, Soottitantawa A, Charoensuppanimit P, Rokhum SL, Assabumrungrat S. Intensified modified fruit blender reactor for emulsifier synthesis via glycerol esterification of free fatty acids at mild conditions. *Bioresource Technology*. 2025;429:132510.
- [6] Singh D, Patidar P, Ganesh A, Mahajani S. Esterification of oleic acid with glycerol in the presence of supported zinc oxide as catalyst. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013;52(42):14776-86.
- [7] Bombos D, Bombos M, Bolocan I, Vasilievici G, Zaharia E. Esterification of glycerol with technical olein in heterogeneous catalysis. *Rev Chim*. 2010;61:784-7.
- [8] Tarigan JB, Barus AF, Simamora NT, Tarigan RS, Perangin-angin S, Ginting J, Sitepu EK, Taufiq-Yap Y. Microwave-intensified esterification of high-free fatty acid feedstock into biodiesel using waste chicken eggshells as a heterogeneous catalyst. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025;11:101107.
- [9] Gole VL, Gogate PR. Intensification of glycerolysis reaction of higher free fatty acid containing sustainable feedstock using microwave irradiation. *Fuel processing technology*. 2014;118:110-6.

- [10] Esposito R, Melchiorre M, Annunziata A, Cucciolito ME, Ruffo F. Emerging catalysis in biomass valorisation: simple Zn (II) catalysts for fatty acids esterification and transesterification. *ChemCatChem*. 2020;12(23): 5858-79.
- [11] Yusuff AS. Kinetic and thermodynamic study on the esterification of oleic acid over SO₃H-functionalized eucalyptus tree bark biochar catalyst. *Scientific Reports*. 2022;12 (1):8653.
- [12] Fei H, Zheng C, Wu Z, Liang X, Nie Y. Glycerol esterification of free fatty acids catalyzed by zinc glycerolate for biodiesel production from acidified palm oil: Optimization, kinetic study, and process evaluation. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2025;102(3):641-55.
- [13] Maquirriain MA, Querini CA, Pisarello ML. Glycerine esterification with free fatty acids: Homogeneous catalysis. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021;171:86-99.
- [14] Chao H-W, Hsu C-Y, Hsu H-C, Tsai S-D, Liu Y-X, Chang T-H. Enhancing the esterification reaction rate in biodiesel production using microwave with iron powder catalysis. *Applied Catalysis O: Open*. 2025:207066.