



การศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง

Study of Palm Oil Catalytic Cracking on ZSM-5 Zeolite for Production of Organic Liquid Product Using Response Surface Methodology

โชคชัย เหมือนมาศ*

Chokchai Mueanmas*

หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

Energy Engineering Program, Faculty of Engineering, Thaksin University

Received : 15 July 2021

Revised : 26 November 2021

Accepted : 23 December 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วย H^+ -Zeolite Socony Mobil-5 (HZSM-5) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) วางแผนการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) สำหรับตัวแปรอุณหภูมิ ในช่วง $400 - 600^{\circ}C$ และความเร็วปฏิกรณ์ในช่วง $23.20 - 68.70 \text{ hr}^{-1}$ การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะใช้เพื่อทดสอบทางสถิติ และพัฒนาแบบจำลองการถดถอยพหุนามกำลังสอง ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากกว่าความเร็วปฏิกรณ์ ภาวะที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ $480^{\circ}C$ และความเร็วปฏิกรณ์ 27.6 hr^{-1} และที่ภาวะการทดลองนี้ จะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ 51.5% ซึ่งคิดเป็น 91.5% ของปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่คาดการณ์ไว้ ผลทางสถิติแสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมการที่ได้ และสมการมีความเหมาะสมสำหรับใช้ทำนายผลของตัวแปรต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากสมการมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ประกอบด้วยโอเลฟินและพาราฟินในสัดส่วน 19.4% และ 15.2% ตามลำดับ

คำสำคัญ : น้ำมันปาล์ม ; กระบวนการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ; ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ; วิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง



Abstract

This research aims to study the catalytic cracking process of refined palm oil with H^+ -Zeolite Socony Mobil-5 (HZSM-5) in fixed bed reactor. The influence of parameters which affect to the optimum condition that obtain the maximum percentage of organic liquid product (OLP) was investigated. The process parameters including temperature ($400 - 600^{\circ}C$) and weight hourly space velocity (WHSV) ($23.20 - 68.70 \text{ hr}^{-1}$) were optimized by response surface methodology (RSM) with a central composite design (CCD). The analysis of variance (ANOVA) was used to test the statistic and developed to obtain the quadratic polynomial regression model. The results confirmed that the temperature was affecting the %OLP more than WHSV. The optimal conditions were temperature $480^{\circ}C$ and WHSV 27.6 hr^{-1} and the experimental %OLP under condition was 51.5%, which was 91.5% of the predicted %OLP. The statistic results showed that %OLP significantly affected by the both studied factors and was well fitted by obtained equation. The results suggest that the predicted model data was in good with the experiment data. The OLP composition consists of olefin and paraffin fraction of 19.4% and 15.2%, respectively.

Keywords : refined palm oil ; catalytic cracking process ; organic liquid product ; response surface methodology



บทนำ

ปัจจุบันปริมาณความต้องการการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของประเทศไทยมีอัตราเพิ่มสูงขึ้นมากในทุก ๆ ปี ซึ่งจากสถิติพบว่าเมื่อปี 2562 มีการนำเข้าน้ำมันดิบมากถึง 49,612 ล้านลิตร หรือมีมูลค่าสูงถึง 6.60 แสนล้านบาทต่อปี (National Statistical Office, 2020) จากการนำเข้าน้ำมันดังกล่าวจึงส่งผลให้ประเทศไทยเกิดการขาดดุลทางการค้า อีกทั้งยังก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศที่จะส่งผลกระทบต่อทั้งสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย ดังนั้น ทางหน่วยงานภาครัฐจึงได้สนับสนุนให้มีการทำวิจัยและพัฒนาทางด้านพลังงานทดแทน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้วัตถุดิบภายในประเทศ ซึ่งจะสามารถลดการนำเข้าน้ำมัน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังเป็นการเสริมความมั่นคงในด้านพลังงานของประเทศได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งความสามารถของประเทศไทยในขณะนี้มีการผลิตพลังงานใช้เองภายในประเทศได้เพียงบางส่วน ซึ่งไม่พอกับความต้องการใช้ที่ขยายตัวอย่างต่อเนื่องควบคู่ไปกับการเติบโตทางเศรษฐกิจ ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาพลังงานหมุนเวียนจึงมีความจำเป็นและต้องเร่งดำเนินการ จึงได้มีการกำหนดเอาไว้เป็นยุทธศาสตร์หนึ่งในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 เรื่องการสร้างสมดุลและมั่นคงของอาหารและพลังงาน อีกทั้งยังได้กำหนดเอาไว้ในยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศ ในเรื่องของการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ เพื่อหลุดพ้นจากประเทศรายได้ปานกลาง ซึ่งมีประเด็นหลักในเรื่องของพลังงาน การวิจัยและพัฒนา นอกจากนี้ในส่วนของนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ ฉบับที่ 8 ก็ยังได้กำหนดเอาไว้ในยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 2 เรื่องการสร้างศักยภาพและความสามารถในการพัฒนาทางเศรษฐกิจ ซึ่งกลยุทธ์ที่ 5 ได้เน้นในเรื่องของการพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตพลังงานชีวภาพและพลังงานทางเลือกอื่น และแม้กระทั่งในทิศทางของแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560 – 2564) ก็ได้มีการบรรจุยุทธศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย และพัฒนาของพลังงานทดแทนเอาไว้เพื่อสร้างความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืนให้กับประเทศ เพื่อจะได้มีการนำพลังงานในรูปแบบอื่นมาทดแทนพลังงานฟอสซิลซึ่งนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้น ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาการใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลาย

โดยวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตพลังงานทดแทนส่วนใหญ่มาจากไขมันสัตว์ หรือน้ำมันพืช เช่น น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม หรือแม้กระทั่งน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว เหล่านี้ล้วนแล้วแต่สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพได้แทบทั้งสิ้น โดยในปี 2563 ประเทศไทยสามารถผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้มากถึง 2,314,180.42 เมตริกตัน (Bank of Thailand, 2020) ดังนั้นน้ำมันปาล์มจึงมีศักยภาพเพียงพอทั้งในแง่ของคุณสมบัติและปริมาณ เพื่อนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลังงานทดแทน ได้แก่ ไบโอดีเซล ไบโอแก๊สโซลีน เป็นต้น ซึ่งการนำผลผลิตทางการเกษตรมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลังงาน นอกจากจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตเหล่านั้น ได้อีกด้วย

ไบโอแก๊สโซลีน เป็นพลังงานทดแทนที่เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถผลิตได้จากชีวมวลชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และยังก่อให้เกิดปริมาณแก๊สพิษน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ (Saidur *et al.*, 2011) ซึ่งวัตถุดิบที่น่าสนใจและมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน ได้แก่ สาหร่ายขนาดเล็ก (Nuhma *et al.*, 2021) น้ำมันจากเมล็ดยางพารา (Hassan *et al.*, 2015) น้ำมันปาล์ม (Chew & Bhatia 2008)



โซลันต์ และน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (No, 2014) โดยการผลิตไบโอแก๊สโซลันต์จากน้ำมันพืชนิยมใช้กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายพันธะของโมเลกุลเพื่อเปลี่ยนแปลงขนาดโมเลกุลของน้ำมันพืชที่มีขนาดใหญ่ให้กลายเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิด aliphatic aromatic และ oxygenated (Nishu *et al.*, 2020) ซึ่งนักวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย ดังแสดงในตารางที่ 1

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาวิธีการ และหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตไบโอแก๊สโซลันต์จากน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง ช่วยให้สารเกิดการแตกตัวแล้วทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิง โดยปัจจัยที่จะทำการศึกษาร่วมด้วย อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และความเร็วปฏิกิริยา โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพินผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลางซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อศึกษาเงื่อนไขของกระบวนการที่เหมาะสม และผลจากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางมีประสิทธิภาพมากที่สุด และมีความเหมาะสมสำหรับการศึกษาสมการพอลิโนเมียลดีกรี 2 (Second-order mode)

**ตารางที่ 1** การศึกษากระบวนการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ZSM-5 สำหรับการผลิตไบโอแก๊สโซลีน

ชนิดของน้ำมัน	ภาวะที่เหมาะสม				ผลการศึกษา	อ้างอิง
	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็ว ปฏิกิริยา (hr ⁻¹)	เวลา (hr)	อัตราการไหล N ₂ (ml/min)		
น้ำมันพืช	500	2.5	2	-	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ เท่ากับ 100% และ %การเลือกเกิด ของไบโอเนฟทา (bio-naphtha) เท่ากับ 48%	(Makertihartha <i>et al.</i> , 2020)
น้ำมันปาล์ม	450	-	-	100	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือน้ำมันแก๊สโซลีน 28.87% เคโรซีน 16.70% และน้ำมันดีเซล 1.20%	(Sirajudin <i>et al.</i> , 2013)
น้ำมันปาล์มโอเลอิน	400	-	2	-	ผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับ 84.82% ที่ประกอบด้วยสารที่มีโมเลกุลอยู่ในช่วง C ₆ -C ₁₂ เท่ากับ 19.47% C ₁₄ -C ₁₆ เท่ากับ 16.56% และ C ₁₈ -C ₂₈ เท่ากับ 48.80%	(Tambun <i>et al.</i> , 2017)
น้ำมันไพโรไลซิสจากไม้ยางพารา	511	-	-	3	ผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับ 13.6%	(Saad <i>et al.</i> , 2015)
	595	-	-	3	ผลิตภัณฑ์น้ำมันแก๊สโซลีน เท่ากับ 27%	
ไขมันวัว	443	-	1	-	ผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับ 73% ประกอบด้วย เคโรซีน 36%	(Khammasan & Tippayawong 2018)
วัสดุเศษเหลือจากการสกัดน้ำมันมะพร้าว	400	-	3	-	ผลิตภัณฑ์น้ำมันแก๊สโซลีน เท่ากับ 6.79% และ เคโรซีน เท่ากับ 31.38%	(Yotsomnuk & Skolpap 2018)
	400	-	1	-	ผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซล เท่ากับ 58.62%	
ลูกสน/พลาสติกความหนาแน่นสูง	500	-	-	-	พลาสติกความหนาแน่นสูง และลูกสน จะมีปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับ 31% และ 26.3% และมีค่าการเลือกเกิดของน้ำมันแก๊สโซลีน เท่ากับ 90% และ 69.3% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อใช้ลูกสน/พลาสติกความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 25/75 จะมีปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับ 22.5%	(Rahman <i>et al.</i> , 2021)

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์

ตัวเร่งปฏิกิริยา H^+ -Zeolite Socony Mobil-5 (HZSM-5) ของบริษัท ACS Material (MSZ5C131) โดยมีอัตราส่วนเชิงโมลของ SiO_2/Al_2O_3 เท่ากับ 38 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 2-10 มิลลิเมตร ปริมาตรรูพรุน ≥ 0.25 mL/g พื้นที่ผิวจำเพาะ ≥ 250 m²/g ขนาดของรูพรุน ~5Å ใช้ Pseudo-Boehmite สัดส่วน 30% เป็นตัวประสาน ตัวทำละลายเฮกเซนเกรด Analytical จากบริษัท RCI Labscan แก๊สไนโตรเจนมีความบริสุทธิ์ 99.999% จากบริษัท ลินด์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงของบริษัท ซวโซติ จำกัด สามารถทำความร้อนได้สูงสุด 1200°C มีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน 20°C

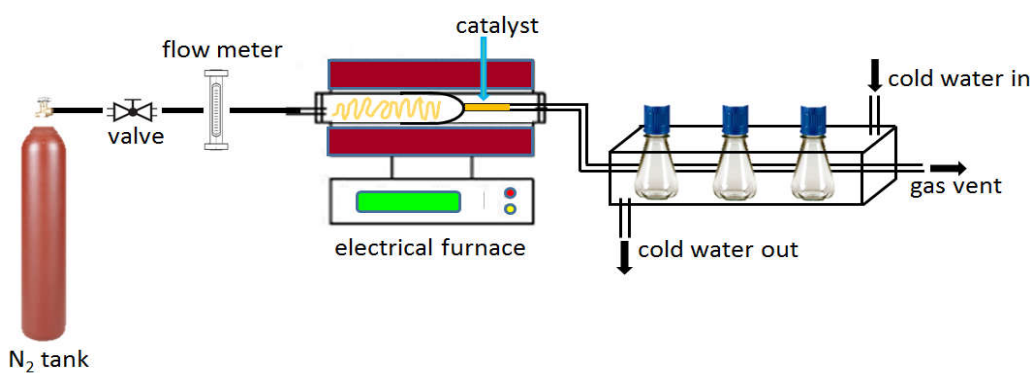
การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ทำการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 6 hr เพื่อทำการ reactivated ตัวเร่งปฏิกิริยาจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น บรรจุใส่ถุงเพื่อป้องกันความชื้น และเก็บในโถดูดความชื้นจนกว่าจะนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยา

กระบวนการแตกตัวของน้ำมันปาล์มด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเตรียมแล้ว 5 กรัม บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร และยาว 50 เซนติเมตร (ดังแสดงในภาพที่ 1) โดยให้ความร้อนด้วยเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง และป้อนแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิถึงจุดที่กำหนด จากนั้นจึงป้อนไนโตรเจนที่ภาวะดังกล่าวต่ออีกเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดแก๊สออกซิเจนที่อยู่ในระบบ แล้วจึงป้อนน้ำมันปาล์ม 150 กรัมด้วยความเร็วปริภูมิที่กำหนด ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากกระบวนการจะถูกควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิ 10°C ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ (Organic liquid product, OLP) ที่ได้จะนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์โดยใช้สมการที่ 1 จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง Gas Chromatography – Mass spectrometer (GC-MS)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์} = \frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ควบแน่น}}{\text{น้ำหนักของน้ำมันปาล์ม}} \times 100 \quad (1)$$



ภาพที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม



การออกแบบการทดลองสำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม จึงได้นำวิธีพินผิวตอบสนอง แบบ CCD มาประยุกต์ใช้ ซึ่งผลการศึกษาคouldสามารถแสดงความมีนัยสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ต่อกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม ตลอดจนอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างตัวแปรซึ่งส่งผลกระทบต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ โดยแต่ละตัวแปรจะแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ตัวแปรที่จะทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริยา โดยช่วงที่จะทำการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเมื่อนำมาออกแบบการทดลองแบบ CCD จะให้แผนการทดลองจำนวน 11 แผนการทดลองดังตารางที่ 4 และเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ผลที่ได้จากการทดลองจะนำมาใช้ในการสร้างสมการ เพื่อใช้ในการทำนายผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ศึกษา ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

โดยที่ Y คือค่าของตัวแปรตอบสนอง; X_i และ X_j คือตัวแปรอิสระ; β_0 คือค่าคงที่; β_i , β_{ii} และ β_{ij} คือค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังหนึ่ง, สัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังสอง และสัมประสิทธิ์ของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร ตามลำดับ; n คือจำนวนตัวแปรอิสระ

ตารางที่ 2 ตัวแปรสำหรับออกแบบการทดลองด้วย CCD ของกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	สัญลักษณ์	ระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา				
		-1.414	-1	0	+1	+1.414
อุณหภูมิ (°C)	A	400	429	500	571	600
ความเร็วปฏิกิริยา (hr ⁻¹)	B	23.20	29.86	45.95	62.04	68.70

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วย Gas Chromatography – Mass spectrometer (GC-MS)

ผลิตภัณฑ์เหลวที่ควบแน่นออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ จะทำการเจือจางด้วยตัวทำละลายเฮกเซนในอัตราส่วน 10 ไมโครลิตรต่อ 1 มิลลิลิตร เพื่อศึกษาองค์ประกอบเบื้องต้นโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS โดยกำหนดอุณหภูมิของ injection MS source temperature และ MS quad temperature เท่ากับ 290 °C 230 °C และ 150 °C ตามลำดับ ชนิดของคาปิลลารีคือคอลัมน์ (capillary column) คือ HP-5MS (30 m * 0.25 mm ID, 0.25µm film thickness) เวลาในการวิเคราะห์ 65 นาที ภาวะของ oven temperature จะใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 50 °C และคงที่ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 5 °C ต่อ นาที จนถึงอุณหภูมิ 300 °C และคงที่ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 10 นาที ด้วยการใช้อัตราการแบ่งส่วน (split ratio) เท่ากับ 16.7:1 ซึ่งที่สภาวะนี้จะมี solvent cut time อยู่ที่ 2.5 นาที

การกลั่นแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม จะทำการกลั่นแยกเพื่อเพิ่มบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ด้วยชุดกลั่นลำดับส่วนในระดับห้องปฏิบัติการ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำการกลั่นแยกเป็น 2 ช่วง คือ



ผลิตภัณฑ์ที่ระเหยในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C และผลิตภัณฑ์ที่ระเหยในช่วง 100 - 200 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้สำหรับกลั่นแยกของน้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซล ตามลำดับ

ผลการวิจัย

การศึกษาเพื่อหาช่วงอุณหภูมิสำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

จากผลการศึกษาเบื้องต้นถึงการสลายตัวของน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 375 °C จะส่งผลให้น้ำมันไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำมัน และอุณหภูมิที่สูงกว่า 600 °C จะทำให้น้ำมันส่วนใหญ่สลายตัวเป็นควีน ซึ่งอุณหภูมิทั้งสองช่วงดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม แต่อุณหภูมิในช่วง 375 - 600 °C จะทำให้น้ำมันเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำมัน และเกิดการสลายตัวด้วยกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถควบแน่นเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ได้ ดังนั้นจากผลการทดลองเบื้องต้นจึงได้เลือกอุณหภูมิในช่วง 400 - 600 °C สำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อการศึกษาในลำดับถัดไป โดยผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thangadurai และ Tye (2021) ซึ่งทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 300 - 550 °C พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมและส่งผลให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 440 - 480 °C และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ลดลง เนื่องจากไอระเหยของน้ำมันจะเกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่อง (secondary cracking) จนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น

ตารางที่ 3 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
300	น้ำมันไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำมัน จึงไม่มีผลิตภัณฑ์ออกมาจากกระบวนการ
350	น้ำมันไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำมัน จึงไม่มีผลิตภัณฑ์ออกมาจากกระบวนการ
375	มีไอระเหยออกมาจากกระบวนการ และควบแน่นเป็นของเหลวเพียงเล็กน้อย
400	มีไอระเหยออกมาจากกระบวนการ และควบแน่นเป็นของเหลวจำนวนมาก
500	มีไอระเหยออกมาจากกระบวนการ และควบแน่นเป็นของเหลวจำนวนมาก
550	มีไอระเหยออกมาจากกระบวนการ และควบแน่นเป็นของเหลวจำนวนมาก
600	มีไอระเหยและควีนออกมาจากกระบวนการ และควบแน่นเป็นของเหลวจำนวนน้อย แต่มีควีนออกจากกระบวนการเป็นจำนวนมาก

ผลการศึกษาระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

จากการออกแบบการทดลองโดยใช้ RSM แบบ CCD ที่มีตัวแปร 2 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิในช่วง 400 - 600 °C และความเร็วปฏิกิริยาในช่วง 23.20 - 68.70 hr⁻¹ พบว่าจะต้องทำการทดลองทั้งหมด 11 การทดลอง ตามภาวะที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่า เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีค่าสูงสุดคือ 56.2% เมื่อใช้อุณหภูมิ 500 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 23.20 hr⁻¹ และมีค่าต่ำสุดคือ 8.3% เมื่อใช้อุณหภูมิ 600 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 45.95 hr⁻¹ ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาสร้างสมการด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least square



regression) จะได้ตั้งสมการที่ (3) ซึ่งเป็นสมการในเทอมของค่าจริง (equation in term of real value) ของตัวแปรที่ทำการศึกษาเพื่อใช้ในการทำนายเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ และเมื่อใช้สมการดังกล่าวทำนายผลของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิวัติต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ พบว่ามีค่าความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.5 – 5.8

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์} = & -801.851 + 3.569A - 0.386B + 1.786 \times 10^{-4}AB \\ & - 3.673 \times 10^{-3}A^2 - 6.740 \times 10^{-4}B^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ตารางที่ 4 ค่าตอบสนองสำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

การทดลองที่	ตัวแปรที่ทำการศึกษา		เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์		ความแตกต่าง
	A	B	ค่าจากการทดลอง	ค่าจากการทำนาย	
1	400	45.95	20.2	22.3	-2.1
2	429	62.04	31.0	31.8	-0.8
3	429	29.86	46.6	43.7	2.9
4	500	45.95	50.9	49.6	1.3
5	500	23.20	56.2	57.4	-1.2
6	500	45.95	47.6	49.6	-2.0
7	500	68.70	45.1	41.0	4.1
8	500	45.95	50.1	49.6	0.5
9	571	62.04	12.9	18.7	-5.8
10	571	29.86	27.8	29.9	-2.1
11	600	45.95	8.3	3.3	5.0

การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของสมการที่ 2 และตัวแปรของกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลที่ได้เป็นดังแสดงในตารางที่ 5

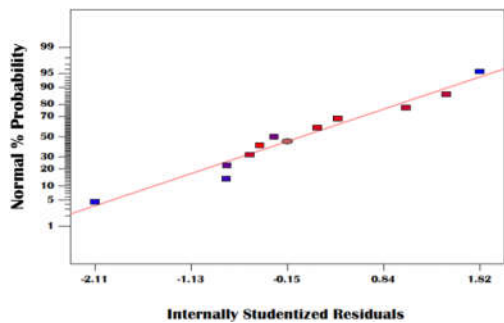
การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล

การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลสามารถแสดงได้โดยความสัมพันธ์ของกราฟการแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง กราฟแสดงความคงที่ของความแปรปรวนของส่วนตกค้าง กราฟแสดงความเป็นอิสระต่อกันของส่วนตกค้าง และกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนาย ดังแสดงในภาพที่ 2(ก) - 2(ง)

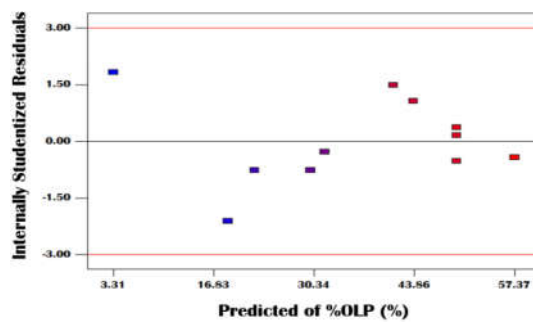


ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

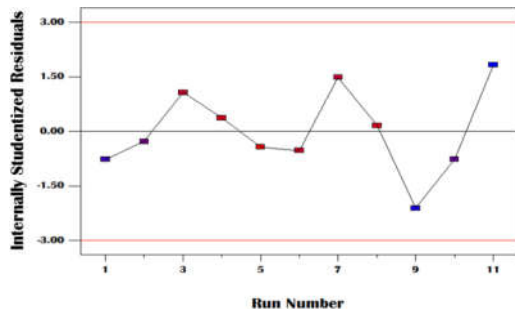
ปัจจัยที่ศึกษา	เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์	
	ค่า F-value	ค่า P-value
Model	27.15	0.0012
A	18.21	0.0080
B	13.39	0.0146
AB	8.29×10^{-3}	0.9310
A ²	95.65	0.0002
B ²	8.63×10^{-3}	0.9296
Lack of Fit	10.60	0.0875
Adeq Precision	16.405	
C.V. (%)	12.37	
Std. Dev.	4.46	
Good of Fit	$R^2 = 0.9645$, $Adj R^2 = 0.9289$, $Pred. R^2 = 0.7576$	



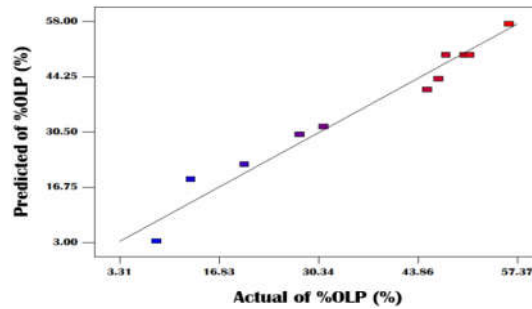
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

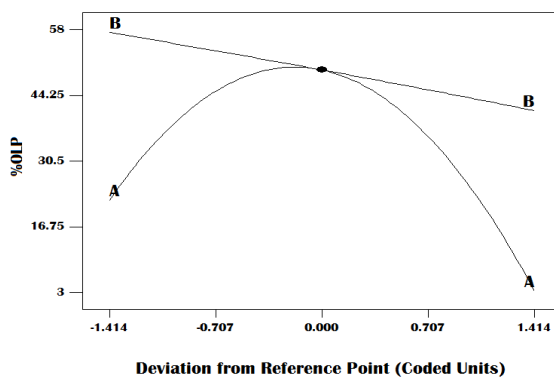
ภาพที่ 2 (ก) การแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (ข) ความคงที่ของความแปรปรวนของส่วนตกค้าง (ค) ความเป็นอิสระต่อกันของส่วนตกค้าง และ (ง) การเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนายของเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์



การวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของตัวแปรต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองด้วย ANOVA จะสามารถแสดงสมการในเทอมของรหัส (equation in term of code value) ดังแสดงในสมการที่ (4) ซึ่งใช้ในการทำนายลำดับความมีนัยสำคัญของปัจจัยที่ทำการศึกษาคือเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายได้ด้วยกราฟ perturbation ดังแสดงในภาพที่ 3

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์} = + 49.56 - 6.73A - 5.77B + 0.20AB - 18.36A^2 - 0.17B^2 \quad (4)$$



ภาพที่ 3 Perturbation plot ของเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

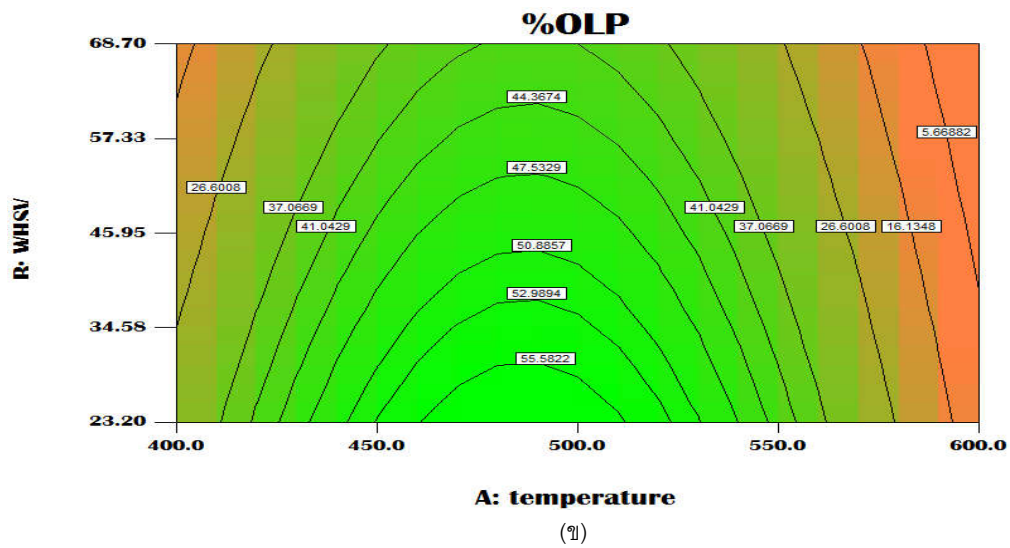
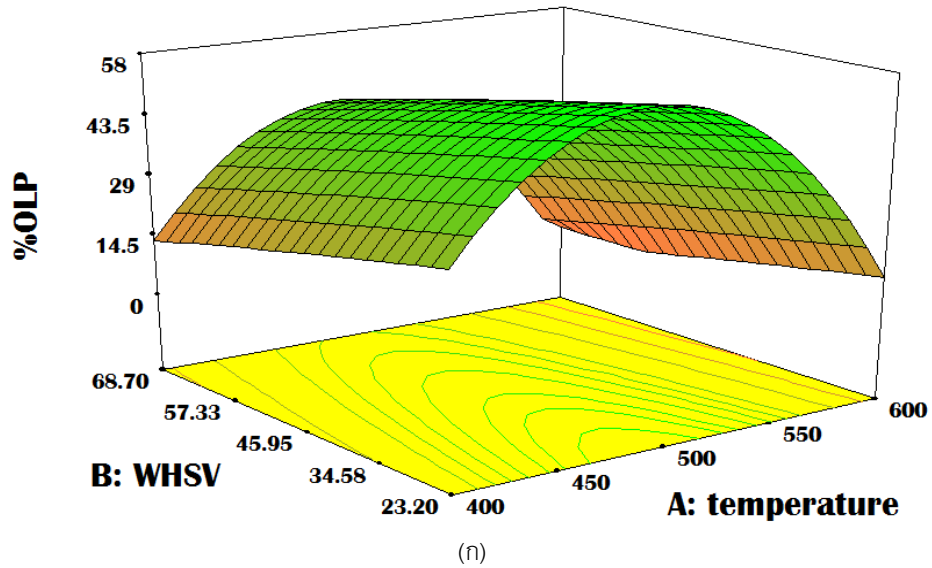
ผลของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิภมิตต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

อันตรกิริยาของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิภมิตที่ส่งผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์สามารถแสดงเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนอง และกราฟโครงร่างดังภาพที่ 4(ก) – 4(ข)

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

โปรแกรม Design Expert® จะมีฟังก์ชัน optimization เพื่อนำมาใช้ในการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม ซึ่งจะทำให้ได้ภาวะในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่มีปริมาณมากที่สุด โดยการกำหนดให้อุณหภูมิ และความเร็วปฏิภมิตอยู่ในช่วงขอบเขตที่ทำการศึกษา

จากการใช้สมการทำนายเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์สำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม พบว่าผลการทำนายด้วยสมการเป็นดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า กระบวนการที่อุณหภูมิ 479.8°C ที่ความเร็วปฏิภมิต 28.1 hr⁻¹ จะเป็นภาวะที่ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีค่าเท่ากับ 56.28 และเมื่อทำการทดลองตามภาวะที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ เพื่อยืนยันความแม่นยำของสมการ พบว่าเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีค่าเท่ากับ 51.5 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ โดยมีค่าความแตกต่างร้อยละ 8.49



ภาพที่ 4 พื้นผิวตอบสนอง (ก) และโครงร่าง (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเร็วปฏิวัติ ต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

ตารางที่ 6 ขอบเขตของตัวแปรอิสระ และภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

ตัวแปรที่ทำการศึกษ	เป้าหมาย	ขอบเขตต่ำสุด	ขอบเขตสูงสุด	ภาวะที่เหมาะสม		%ความแตกต่าง
				ค่าจากการทำนาย	ค่าจากการทดลอง	
อุณหภูมิ (°C)	ในช่วงที่ทำการศึกษ	400	600	479.8	480	-
ความเร็วปฏิภูมิ (hr ⁻¹)	ในช่วงที่ทำการศึกษ	23.2	68.7	28.1	27.6	-
ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์	ค่ามากที่สุด	-	-	56.28	51.5	8.49

ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำ มีความหนืดสูง ดังแสดงในภาพที่ 5(ก) ซึ่งเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่อง GC-MS ผลที่ได้เป็นดังภาพที่ 6 ซึ่งพบว่า เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีองค์ประกอบของ Olefin Paraffin Napthenes Aromatics Oxygenated และ Mixed Napthenes – Aromatics เท่ากับ 19.4% 15.2% 6.6% 34.7% 15.4% และ 8.7% ตามลำดับ และเมื่อผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีจุดเดือดต่ำกว่า 100°C และผลิตภัณฑ์ที่มีจุดเดือดในช่วง 100-200°C ผลเป็นดังแสดงในภาพที่ 5(ข) และ 5(ค) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นจะมีความหนืดต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้กลั่น และผลิตภัณฑ์ที่จุดเดือดสูงกว่า 100°C จะมีความใสมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่จุดเดือดต่ำกว่า 100°C



(ก)



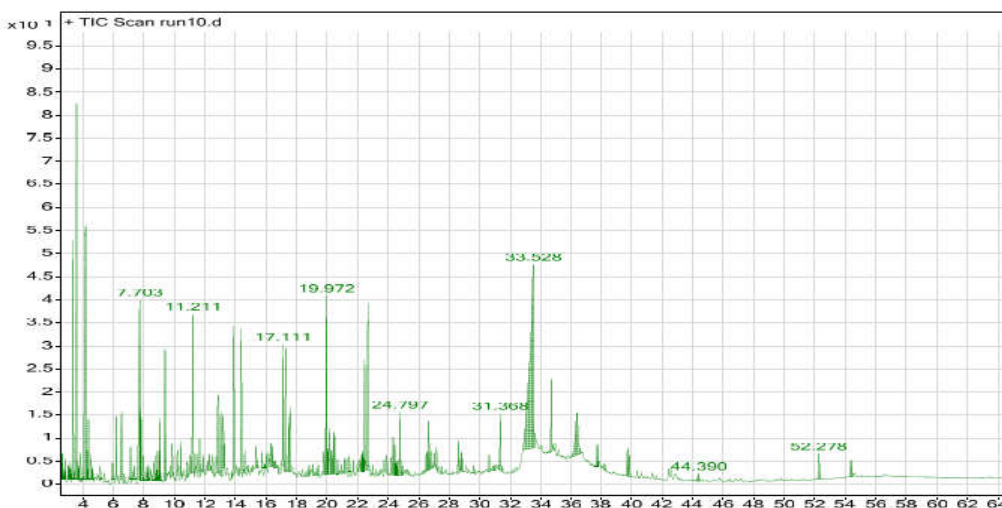
(ข)



(ค)

ภาพที่ 5 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

(ก) ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการ (ข) ผ่านกระบวนการกลั่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C (ค) ผ่านกระบวนการกลั่นในช่วงอุณหภูมิ 100-200°C



ภาพที่ 6 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS

วิจารณ์ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

ข้อมูลทางสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่าสมการของเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีค่า F-value เท่ากับ 27.15 และมีค่า p-value 0.0012 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าสมการที่ได้นี้มีความเหมาะสมในการใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์และปัจจัยที่ทำการศึกษา และเมื่อพิจารณาค่า p-value ของตัวแปรอิสระ ที่เป็นตัวแปรหลัก (main effect) และอันตรกิริยาของตัวแปรหลัก (Interaction) พบว่าพจน์ที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 มีทั้งหมด 3 พจน์ ได้แก่ A, B และ A^2 แสดงว่าตัวแปรอิสระและอันตรกิริยาของตัวแปรดังกล่าวมีความสำคัญและส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.9645 แสดงให้เห็นว่า 96.54% ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถเข้ากันได้กับข้อมูลที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Qu *et al.*, 2020) และยังคงบอกได้ว่า เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีอิทธิพลจากตัวแปร 96.54% ส่วนอีก 3.55% เป็นผลจากตัวแปรอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง จะมีความแม่นยำสูงในการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการทำนายผลลัพธ์ ทั้งนี้โดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่าที่เหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีควรจะมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากที่สุด ในทำนองเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ ($adj. R^2$) ที่ได้พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.9289 ซึ่งมากกว่า 0.64 (ค่ากำหนดต่ำสุดของ $adj. R^2$ ที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควรจะมี) จึงเป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมนั่นเอง อีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทำนาย ($pred. R^2$) มีค่าเท่ากับ 0.7576 ซึ่งมีผลต่างจากค่า $adj. R^2$ เพียง 0.1713 และโดยปกติแล้วผลต่างระหว่างค่า $adj. R^2$ และ $pred. R^2$ ไม่ควรเกิน 0.2 จึงแสดงให้เห็นว่าข้อมูลไม่มีปัญหาการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



สำหรับค่าความสมรูป (Lack of fit) ของสมการมีค่า p -value เท่ากับ 0.0875 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงถึงความเหมาะสมของสมการถดถอยที่ได้ อีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V.) มีค่าต่ำเพียง 12.37 และค่า Adequacy precision มีค่าเท่ากับ 16.405 ซึ่งมีค่ามากกว่า 4 แสดงให้เห็นว่าผลสรุปความสมรูปของแบบจำลองนั้นมีความน่าเชื่อถือ และเป็นตัวบ่งบอกความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายโดยสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าความแตกต่างกันน้อยมาก

การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล

โดยในการทวนสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อนำไปใช้ในการสร้างสมการสำหรับทำนายเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ จะทำได้โดยการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล ซึ่งกราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (normal plot of residue) จะใช้สำหรับตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนสำหรับสมการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการอธิบายผลของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิวัติต่อ เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ซึ่งค่าส่วนตกค้างจะเป็นผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งผลที่ได้เป็นดังแสดงในภาพที่ 2(ก) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติตามแนวเส้นตรง ข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นอิสระ และมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าส่วนตกค้างที่ได้จากสมการจึงมีความเสถียรของความแปรปรวน (Shrivastava & Singh 2021) กราฟแสดงความคงที่ของความแปรปรวนของส่วนตกค้าง เป็นดังแสดงในภาพที่ 2(ข) จะพบว่าค่าของส่วนตกค้างจะมีการกระจายตัวอย่างอิสระในขอบเขตที่กำหนด (± 3) ซึ่งจะแสดงถึงความแม่นยำของสมการที่จะใช้ในการทำนาย %OLP (Memon *et al.*, 2020) กราฟแสดงความเป็นอิสระต่อกันของส่วนตกค้าง เป็นดังแสดงในภาพที่ 2(ค) ซึ่งจะพบว่าในแต่ละการทดลองค่าของส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอย่างอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นจึงแสดงถึงความเข้ากันได้ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองและค่าที่ทำนายได้ (Sultana *et al.*, 2020) และกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนาย ดังแสดงในภาพที่ 2(ง) จะพบว่าข้อมูลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าสมการที่ได้สามารถใช้ในการทำนายผลของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิวัติได้อย่างถูกต้องและมีความแม่นยำสูง (Mishra *et al.*, 2021)

การวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของตัวแปรต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

ลำดับความมีนัยสำคัญของตัวแปรต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ จะสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการในเทอมของรหัส โดยค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรหลักจะแปรผันตรงกับความมีนัยสำคัญของตัวแปรนั้น กล่าวคือ ถ้าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรใดมีค่ามากที่สุดตัวแปรนั้นจะมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์สูงสุด โดยการพิจารณาจะไม่คำนึงถึงเครื่องหมายบวกหรือลบ เนื่องจากเครื่องหมายจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยในลักษณะเชิงบวก หรือเชิงลบต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ซึ่งสมการในเทอมของรหัสสำหรับเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เป็นดังสมการที่ (4) โดยจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรอุณหภูมิ (A) มีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรความเร็วปฏิวัติ (B) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากกราฟ perturbation ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิ (A) และความเร็วปฏิวัติ (B) ในช่วงที่ทำการศึกษาต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ซึ่งการสร้างกราฟ perturbation จะทำโดยการเปลี่ยนค่าของปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งในช่วงที่ทำการศึกษา ในขณะที่ปัจจัยอื่นจะถูกกำหนดไว้ที่ค่าคงที่ โดยปัจจัยใดที่มีความชันของเส้นกราฟมากกว่าจะมีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากกว่า (Tariq *et al.*, 2021) ซึ่งผลการศึกษานี้เป็นดังแสดงในภาพที่ 3 โดยกราฟของตัวแปร



อุณหภูมิจะมีความชันสูงกว่ากราฟของตัวแปรความเร็วปฏิกิริมา ดังนั้นแสดงว่าปัจจัยของอุณหภูมิจะส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากกว่าปัจจัยความเร็วปฏิกิริมา

ผลของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริมาต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

กลไกการแตกตัวของน้ำมันปาล์มเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ จะเกิดจากน้ำมันปาล์มเมื่อได้รับความร้อนที่ความดันบรรยากาศจนถึงอุณหภูมิของจุดเดือดจะเกิดการระเหยเป็นไอ แต่จะไม่เกิดการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) เพราะอยู่ในสภาวะที่ความดันต่ำ จากนั้นไอระเหยของน้ำมันจะสัมผัสกับพื้นผิวที่ว่องไว (active site) ของตัวเร่งปฏิกิริมาภายใต้อุณหภูมิสูง จึงส่งผลให้โมเลกุลของน้ำมันเกิดการสลายตัวกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก ซึ่งในขณะที่มีการป้อนน้ำมันเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง จะทำให้เกิดไอระเหยของน้ำมันอย่างต่อเนื่องเช่นกันจึงทำให้เกิดความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์และส่งผลให้โมเลกุลที่แตกตัวแล้วมีการเคลื่อนที่ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์และเกิดการควบแน่นจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ซึ่งผลของอันตรกิริมาแสดงว่าในขณะที่ความเร็วปฏิกิริมามีค่าคงที่เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400°C เป็น 480°C แต่เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงกว่า 480°C จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริมาเคมีของตัวเร่งปฏิกิริมา หรือความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริมา (catalytic activity) มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริมาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการแตกตัวของไอระเหยน้ำมันอย่างต่อเนื่อง (secondary cracking) จนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นโมเลกุลของแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ (Istadi *et al.*, 2021) อีกทั้งปฏิกิริมาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มด้วยตัวเร่งปฏิกิริมาเป็นปฏิกิริมาแบบดูดความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมียิ่งสูงก็จะทำให้สามารถเกิดปฏิกิริมาการแตกตัวได้ดียิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของความเร็วปฏิกิริมา พบว่า เมื่อความเร็วปฏิกิริมาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีค่าลดลง ซึ่งจากงานวิจัยของ Dujanutat & Kaewkannetra (2020) ได้ให้ข้อเสนอแนะว่าความเร็วปฏิกิริมาสำหรับการผลิตแก๊สโซลีนควรจะมีค่าต่ำ เพราะหากความเร็วปฏิกิริมามีค่าสูงจะส่งผลให้น้ำมันที่ระเหยกลายเป็นไอไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์เร็วเกินไปในขณะที่การแตกตัวยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ซึ่งถ้าความเร็วปฏิกิริมามีค่าต่ำจะทำให้ไอระเหยอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้นส่งผลให้เกิดการแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ได้สมบูรณ์มากขึ้น

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ดำเนินการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพินที่ผิวตอบสนองที่มีการวางแผนการทดลองแบบประสมกลางมาใช้เพื่อหาภาวะที่เหมาะสม และศึกษาความมีนัยสำคัญของปัจจัยอุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริมาที่มีต่อกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริมาของน้ำมันปาล์ม โดยการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการจะอยู่ในช่วง 400-600°C จากนั้นจึงทำการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA ทำให้ได้สมการที่สามารถใช้ในการทำนายผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 480°C และความเร็วปฏิกิริมา 27.6 hr⁻¹ จะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ เท่ากับ 51.5% ซึ่งจากข้อมูลทางสถิติแสดงให้เห็นว่าปัจจัยของอุณหภูมามีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากกว่าปัจจัยของความเร็วปฏิกิริมา อีกทั้งยังช่วยยืนยันว่าข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ และสมการที่ได้สามารถนำมาใช้ในการอธิบายผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี



ซึ่งเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์พบว่ามีโอเลฟินและพาราฟินในสัดส่วน 19.4% และ 15.2% ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยทักษิณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

เอกสารอ้างอิง

- Bank of Thailand. (2020). " Major industrial production in the southern region." from https://www.bot.or.th/App/BTWS_STAT/statistics/ReportPage.aspx?reportID=590&language=th. (in Thai)
- Chew, T.L. & Bhatia, S. (2008). Catalytic processes towards the production of biofuels in a palm oil and oil palm biomass-based biorefinery. *Bioresource Technology*, 99(17), 7911-7922.
- Dujjanutat, P. & Kaewkannetra, P. (2020). Production of bio-hydrogenated kerosene by catalytic hydrocracking from refined bleached deodorised palm/ palm kernel oils. *Renewable Energy*, 147, 464-472.
- Hassan, S.N., Sani, Y.M., Abdul Aziz, A.R., Sulaiman, N.M.N. & Daud, W.M.A.W. (2015). Biogasoline: An out-of-the-box solution to the food-for-fuel and land-use competitions. *Energy Conversion and Management*, 89, 349-367.
- Istadi, I., Riyanto, T., Khofiyandia, E., Buchori, L., Anggoro, D.D., Sumantri, I., Putro, B.H.S. & Firnanda, A.S. (2021). Low-oxygenated biofuels production from palm oil through hydrocracking process using the enhanced Spent RFCC catalysts. *Bioresource Technology Reports*, 14, 100677.
- Khammasan, T. & Tippayawong, N. (2018). Light Liquid Fuel from Catalytic Cracking of Beef Tallow with ZSM-5. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(1), 407-413.
- Makertihartha, I.G.B.N., Fitriadi, R.B., Ramadhani, A.R., Laniwati, M., Muraza, O. & Subagjo (2020). Biogasoline Production from Palm Oil: Optimization of Catalytic Cracking Parameters. *Arabian Journal for Science and Engineering*(9).



- Memon, A.M., Hartadi Sutanto, M., Napiah, M., Khan, M.I. & Rafiq, W. (2020). Modeling and optimization of mixing conditions for petroleum sludge modified bitumen using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 264, 120701.
- Mishra, A., Sawood, G.M., Gautam, S.B. & Trivedi, R.K. (2021). Optimization of process inputs for the synthesis of waste rice bran oil isolated *Pseudomonas aeruginosa* MTCC 424 biosurfactant using response surface methodology for oil recovery applications. *Bioresource Technology Reports*, 14, 100653.
- National Statistical Office. (2020). "Quantity and Value of Crude Oil and Condensate Imports 2010 - 2019." from <http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/13.aspx>. (in Thai)
- Nishu, Liu, R., Rahman, M.M., Sarker, M., Chai, M., Li, C. & Cai, J. (2020). A review on the catalytic pyrolysis of biomass for the bio-oil production with ZSM-5: Focus on structure. *Fuel Processing Technology*, 199, 106301.
- No, S.-Y. (2014). Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride based biomass to CI engines – A review. *Fuel*, 115, 88-96.
- Nuhma, M.J., Alias, H., Tahir, M. & Jazie, A.A. (2021). Microalgae biomass conversion into biofuel using modified HZSM-5 zeolite catalyst: A review. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2308-2313.
- Qu, T., Niu, S., Gong, Z., Han, K., Wang, Y. & Lu, C. (2020). Wollastonite decorated with calcium oxide as heterogeneous transesterification catalyst for biodiesel production: Optimized by response surface methodology. *Renewable Energy*, 159, 873-884.
- Rahman, M.H., Bhoi, P.R., Saha, A., Patil, V. & Adhikari, S. (2021). Thermo-catalytic co-pyrolysis of biomass and high-density polyethylene for improving the yield and quality of pyrolysis liquid. *Energy*, 225, 120231.
- Saad, A., Ratanawilai, S. & Tongurai, C. (2015). Catalytic Cracking of Pyrolysis Oil Derived from Rubberwood to Produce Green Gasoline Components. *BioResources*, 10(2), 3224-3241.



- Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S. & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262-2289.
- Shrivastava, Y. & Singh, B. (2021). Tool chatter prediction based on empirical mode decomposition and response surface methodology. *Measurement*, 173, 108585.
- Sirajudin, N., Jusoff, K., Yani, S. & Roesyadi, L.I.a.A. (2013). Biofuel Production from Catalytic Cracking of Palm Oil. *World Applied Sciences Journal* 26 (Natural Resources Research and Development in Sulawesi Indonesia), 67-71.
- Sultana, N., Hossain, S.M.Z., Alam, M.S., Hashish, M.M.A. & Islam, M.S. (2020). An experimental investigation and modeling approach of response surface methodology coupled with crow search algorithm for optimizing the properties of jute fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 243, 118216.
- Tambun, R., Gusti, O.N., Nasution, M.A. & Saptawaldi, R.P. (2017). Biofuel Production from Palm Olein by Catalytic Cracking Process using ZSM-5 Catalyst. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 6(1), 50-55.
- Tariq, R., Maqbool, F. & Abbas, S.Z. (2021). Small-scale production of hydrogen via auto-thermal reforming in an adiabatic packed bed reactor: Parametric study and reactor's optimization through response surface methodology. *Computers & Chemical Engineering*, 145, 107192.
- Thangadurai, T & Tye, C.T. (2021). Acidity and basicity of metal oxide-based catalysts in catalytic cracking of vegetable oil. *Brazilian of Chemical Engineering*, 38, 1-20.
- Yotsomnuk, P. & Skolpap, W. (2018). Effect of Process Parameters on Yield of Biofuel Production from Waste Virgin Coconut Oil. *Engineering Journal* 22(6), 21-35.