

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จาก กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง Study of Chemical Composition of Organic Liquid Product from Catalytic Cracking Process using Response Surface Methodology

โชคชัย เหมือนมาศ*

Chokchai Mueanmas*

Received: 2 October 2022, Revised: 16 December 2022, Accepted: 17 January 2023

บทคัดย่อ

น้ำมันปาล์มมีศักยภาพในการที่จะใช้เป็นแหล่งผลิตเชื้อเพลิงเหลวได้ด้วยกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 ในปฏิกรณ์แบบแนวนอนเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ซึ่งองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จะทำการวิเคราะห์สารกลุ่ม โอลิฟินส์ (olefins), พาราฟิน (paraffins), แนฟทีน (naphthenes), อะโรมาติก (aromatics), ออกซิเจน (oxygenated) และ มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (mixed naphthenes-aromatics) โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 400 - 600 °C และความเร็วปฏิกิริยาในช่วง 23.20 – 68.70 hr⁻¹ ต่อองค์ประกอบของ โอลิฟินส์ (olefins), พาราฟิน (paraffins) และ อะโรมาติก (aromatics) ในผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ผลิตได้ ปริมาณของสารแต่ละกลุ่มจะถูกวิเคราะห์และนำข้อมูลมาใช้ในการสร้างสมการเพื่อใช้ทำนายปริมาณของสารแต่ละกลุ่มด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งผลที่ได้จากการใช้สมการทำนาย พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 460.3 °C และความเร็วปฏิกิริยา 23.2 hr⁻¹ จะได้ปริมาณสารกลุ่มโอลิฟินส์ (olefins), พาราฟิน (paraffins), แนฟทีน (naphthenes), อะโรมาติก (aromatics), ออกซิเจน (oxygenated) และ มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (mixed naphthenes-aromatics) เท่ากับ 19.5%, 13.9%, 7.0%, 29.8%, 18.8% และ 10.8% ตามลำดับ โดยค่าเหล่านี้มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบยืนยัน ดังนั้นสมการที่ใช้สำหรับการทำนายปริมาณของสารแต่ละกลุ่มจึงมีความเหมาะสมและมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 20 นาที จากผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลให้ได้ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่มีองค์ประกอบของ โอลิฟินส์ (olefins), พาราฟิน (paraffins) และ อะโรมาติก (aromatics) สูงสุด ซึ่งมีนัยสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนน้ำมันปาล์มให้กลายเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพโดยตรง

คำสำคัญ: น้ำมันปาล์ม, องค์ประกอบทางเคมี, ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์, กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210

Energy Engineering Program, Faculty of Engineering, Thaksin University, Phatthalung Campus, Paphayom, Phatthalung 93210, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chokchai@tsu.ac.th

ABSTRACT

The palm oil has the potential to use as a source for liquid fuel production. The catalytic cracking process with a HZSM-5 catalyst was carried out in the horizontal reactor to produce organic liquid product (OLP). The composition of OLP was analyzed in the fraction of olefins, paraffins, naphthenes, aromatics, oxygenated and mixed naphthenes - aromatics. The aim of this research was to study the influence of temperature (400 - 600 °C) and weight hourly space velocity (WHSV) (23.20 – 68.70 hr⁻¹) on the composition of olefins, paraffins and aromatics in organic liquid product (OLP). The quantity of product distributions was analyzed and modeled using the response surface method (RSM). The predicted results showed that the composition of olefins, paraffins, naphthenes, aromatics, oxygenated and mixed naphthenes - aromatics at the temperature 461.9 °C and WSHV 23.2 hr⁻¹ was 19.5%, 13.9%, 7.0%, 29.8%, 18.8% and 10.8%, respectively. These were very close to the verification experiment results. Therefore, the models for the prediction of the product distributions were adequate and statistically significant. The optimum residence time for OLP production was 20 min. Based on the finding in this work, it provides insights into the operational factors for maximizing the quantity of olefins, paraffins and aromatics. Moreover, it has tremendous guiding significance to the efficient operation of transforming palm oil into biofuels.

Key words: palm oil, chemical composition, organic liquid product, catalytic cracking process

บทนำ

ความเจริญก้าวหน้าทางด้านเศรษฐกิจส่งผลให้การใช้น้ำมันปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกภาคส่วน จึงทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การพัฒนาน้ำมันเชื้อเพลิงจากชีวมวลเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนจึงกลายเป็นหนึ่งในแนวทางสำคัญที่จะช่วยแก้ไขทั้งปัญหาปริมาณแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ลดน้อยลง ราคาพลังงานที่สูงขึ้น และมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น เพราะชีวมวลสามารถปลูกทดแทนได้อย่างต่อเนื่อง ราคาต่ำ และไม่ก่อให้เกิดการสะสมเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากวัฏจักรชีวิตของชีวมวลจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นศูนย์ ชีวมวลที่สำคัญในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยคือ ปาล์มน้ำมัน ซึ่งในปี พ.ศ.

2564 มีปริมาณผลผลิต 16.79 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2563 ร้อยละ 3.51 ซึ่งปริมาณความต้องการใช้น้ำมันปาล์มดิบภายในประเทศทั้งเพื่อการบริโภคและเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งศักยภาพของน้ำมันปาล์มในการที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวมีหลายรูปแบบ เช่น ไบโอดีเซลจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Soly Peter *et al.*, 2021) ไบโอแก๊สโซลีนจากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Ahmad *et al.*, 2016)

กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่พบมากในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งใช้สำหรับการแตกสลายน้ำมันปิโตรเลียมที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ให้กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น (Yaisamlee and Reubroycharoen, 2021; Huang *et al.*, 2022) ซึ่งในกระบวนการจะต้องมีตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่จะทำหน้าที่เร่งให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุล

โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบได้หลากหลายประเภท ได้แก่ น้ำมันไพโรไลซิสจากยางรถยนต์ (Palos *et al.*, 2022) ฟลูออไรด์ (Yaisamlee and Reubroycharoen, 2021) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Wang *et al.*, 2022b) น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะหน้ากากอนามัยที่ใช้ป้องกันโรคโควิด-19 (Sun *et al.*, 2022) น้ำมันไพโรไลซิสจากชีวมวล (Guo *et al.*, 2018) โดยตัวเร่งที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนมีหลายชนิด ได้แก่ $\text{NiO/Nb}_2\text{O}_5$ (Amjad *et al.*, 2022), แกมมาอะลูมินา (γ -alumina) (Ramezani *et al.*, 2022), ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แซววาย (HY zeolite) (Hwang *et al.*, 2021) แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (Singh *et al.*, 2021) เนื่องจากมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี (Wang *et al.*, 2022a) มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและความสามารถในการดูดซับสูง มีโครงสร้างรูพรุนที่เป็นเอกลักษณ์ (Ma *et al.*, 2017) และราคาถูก (Li *et al.*, 2022) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบแบ่งออกเป็น 6 กลุ่มตามลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล และองค์ประกอบของน้ำมันฐานแนฟทา (Naphtha based (PIANO)) รวมถึงออกซิเจน (oxygenated) และ มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (mixed naphthenes-aromatics) อันประกอบด้วย

1. โอลิฟินส์ (Olefins) คือ สารไฮโดรคาร์บอนที่อะตอมของคาร์บอนยังมีไฮโดรเจนเกาะอยู่ไม่อิ่มตัว
2. พาราฟิน (paraffins) คือ สารไฮโดรคาร์บอนที่อะตอมของคาร์บอนมีไฮโดรเจนเกาะอยู่จนอิ่มตัว
3. แนฟทีน (naphthenes) คือ สารที่มีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนต่อเรียงตัวกันเป็นวง
4. อะโรมาติก (aromatics) คือ สารไฮโดรคาร์บอน

ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยเบนซีนริง (Benzenes ring) 5. ออกซิเจน (Oxygenated) คือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ 6. มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (Mixed Naphthenes-Aromatics) คือ สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างประกอบด้วยแนฟทีนิกริง (Naphthenic ring) และ อะโรมาติกริง (Aromatic ring) อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยถึงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากวัตถุดิบต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ Balboul *et al.* (2022) ศึกษากระบวนการแตกตัวของน้ำมันใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด เพอร์ซีโอดิเมียม (III) ออกไซด์ (praseodymium (III) oxide) เคลือบบนอะลูมินา (alumina) เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 350°C ที่ปริมาณและความเข้มข้นของ เพอร์ซีโอดิเมียม (praseodymium) เท่ากับ 10% และ 0.6% ตามลำดับ จะส่งผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ 92% และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีองค์ประกอบของ $\text{C}_5\text{-C}_{16}$ เท่ากับ 41.5% Bhattacharjee and Biswas (2022) ศึกษาการสลายตัวของแกลบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิ 550°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน $50^\circ\text{C}/\text{min}$ ที่อัตราการไหลของ N_2 เท่ากับ 0.3 ลิตร/นาที พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และมีองค์ประกอบร้อยละโดยโมลของ แนฟทีนิก (naphthenic), โอลิฟินิก (olefinic), อะโรมาติก (aromatic) และ พาราฟินิก (paraffinic) เท่ากับ 0.54, 1.98, 4.18 และ 4.42 ตามลำดับ Gurdeep Singh *et al.* (2019) ได้ศึกษาการแตกตัวของ ลิโนเลอิกแอซิด (Linoleic acid) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยใช้ อินคอนเนลแบทช์รีแอกเตอร์ (Inconel batch reactor) ที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 90 นาที พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบของ ไอโซพาราฟินส์ (Isoparaffins) 1.05% และ อะโรมาติก (aromatics) 51.5% อีกทั้ง Valle *et al.* (2022) ได้ทำการศึกษาการ

แตกตัวของน้ำมันไพโรไลซิสจากชี้เลี้ยงไม้สนโดยใช้ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 450°C พบว่าสารตั้งต้นมีการเปลี่ยนแปลง 85% และมีร้อยละผลได้ของสารกลุ่ม อะโรมาติก (aromatics) และแนฟเธลีน (Naphthalenes) เท่ากับ 9% และ 4% ตามลำดับ Muttaqii *et al.* (2021) ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันมะพร้าวด้วยกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในเวสเซลรีแอคเตอร์ (vessel reactor) ที่อุณหภูมิ 350°C ความดัน 15 บาร์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีองค์ประกอบของ ไซโคลพาราฟิน (cycloparaffins), นอร์มอลพาราฟิน (normal paraffins), โอลิฟินส์ (olefins) และ อะโรมาติก (aromatics) เท่ากับ 0.11%, 5.33%, 7.85% และ 0.08% ตามลำดับ ส่วนที่เหลือเป็นสารประกอบกลุ่ม oxygenated compound 86.63% นอกจากนี้ Prajitno *et al.* (2022) ยังได้ศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันต้นตีนเป็ดทราย (Cerbera manghas oil) ที่อุณหภูมิ 400°C พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีองค์ประกอบของ นอร์มอลพาราฟิน (n-paraffins), ไซโคลพาราฟิน (cycloparaffins), โอลิฟินส์ (olefins), กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) และ สารประกอบที่มีอะตอมออกซิเจน (Compound containing oxygen) เท่ากับ 0.02%, 0.06%, 0.07%, 92.99% และ 6.67% ตามลำดับ Ghaffar *et al.* (2020) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันไพโรไลซิสของพอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 โดยศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนในช่วง 2-18 °C/min และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาในช่วง 75-105 นาที พบว่าที่เวลา 75 นาที และอัตราการให้ความร้อน 2°C/min จะทำให้ผลได้ที่สูงที่สุดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเป็น 61.05 wt% และมีผลได้ของผลิตภัณฑ์แข็ง และก๊าซ เท่ากับ 0.41 wt% และ 38.54wt% ตามลำดับ โดยที่สภาวะนี้จะทำให้

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์มี พาราฟิน (paraffins), โอลิฟินส์ (olefins), แนฟทีน (naphthenes) และ อะโรมาติก (aromatics) เท่ากับ 60.97%, 17.82%, 11.75% และ 8.04% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลผลิตทางการเกษตรที่มีอยู่ในประเทศจะพบว่า น้ำมันปาล์ม เป็นชีวมวลที่มีศักยภาพในการจะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลังงานทดแทน ทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ZSM-5 ของน้ำมันปาล์ม โดยใช้เทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เพื่อออกแบบการทดลองสำหรับศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริยา จากนั้นจึงทำการศึกษาผลของเวลาในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์ อันจะเป็นแนวทางในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวลซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สามารถจัดหาได้ภายในประเทศ ดังนั้นจึงสามารถสร้างความยั่งยืนทางด้านพลังงานให้กับประเทศได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ และสารเคมี

น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined palm oil) ของบริษัท มรกต อินดัสทรี จำกัด ตัวเร่งปฏิกิริยา H⁺-Zeolite Socony Mobil-5 (HZSM-5) จากบริษัท ACS Material ซึ่งมีอัตราส่วนเชิงโมลของ Si/Al เท่ากับ 38 และใช้ซูโดโบเอไมต์ (Pseudo-Boehmite) ร้อยละ 30 โดยมวลเป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการอัดเป็นแท่งให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และความยาวในช่วง 2-10 มิลลิเมตร โดยก่อนการนำไปใช้ในกระบวนการจะทำการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อเป็นการกระตุ้น

ตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (active site) ของตัวเร่งปฏิกิริยา แก๊สไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.999% จากบริษัท ลินเค้ (ประเทศไทย) จำกัด

2. การศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

ปฏิกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยาออกแบบให้มีขนาดต่างกัน 2 ส่วน (Figure 1) คือ ส่วนแรกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.3 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร เพื่อใช้สำหรับการป้อนน้ำมันปาล์มเข้าสู่ระบบ จากนั้นเมื่อได้รับความร้อนน้ำมันปาล์มจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ แล้วไหลเข้าสู่ส่วนที่สอง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และเป็นส่วนที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเอาไว้ ซึ่งการที่ปฏิกรณ์ส่วนนี้มีขนาดเล็กลงมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ไอระเหยของน้ำมันปาล์มได้มี

การไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา และสามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ ก่อนเริ่มการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำหนัก 5 กรัม (3.33% ของน้ำมันปาล์ม) จะถูกบรรจุเอาไว้ในปฏิกรณ์ แล้วจึงให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ พร้อมกับการป้อนแก๊สไนโตรเจนเพื่อเป็นการกำจัดออกซิเจนที่อยู่ในระบบ จากนั้นจึงป้อนน้ำมันปาล์ม 150 กรัมเข้าสู่ปฏิกรณ์ด้วยปั๊มแบบรีดท่อ (peristaltic pump) ตามอัตราการไหลที่สอดคล้องกับค่าความเร็วปริภูมิที่กำหนด เมื่อไอระเหยของผลิตภัณฑ์ออกจากปฏิกรณ์จะทำการควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์เหลวที่ควบแน่นได้ไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography – Mass Spectrometer, GC-MS)

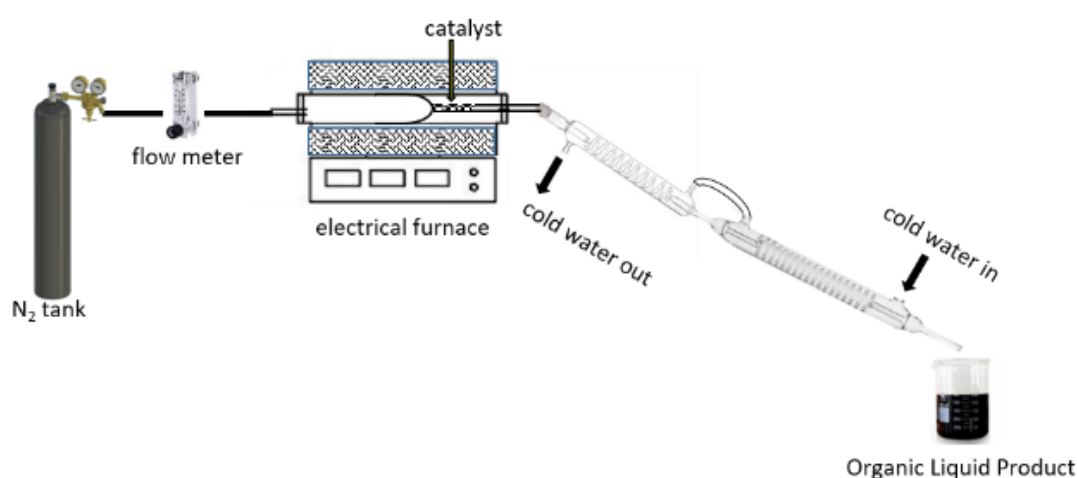


Figure 1 Experimental setup for catalytic cracking of palm oil to organic liquid product

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

ผลิตภัณฑ์ที่ควบแน่นได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม จะนำมาผสมกับตัวทำละลายเฮกเซนในอัตราส่วน 1:10 เพื่อ

เจือจางความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ก่อนจะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-MS โดยแต่ละตัวอย่างจะใช้เวลาในการวิเคราะห์ 65 นาที ซึ่งสภาวะของเครื่องจะกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของ oven ที่ 50°C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจะเพิ่มอุณหภูมิเป็น 300°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 5°C/min

และให้คงที่ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 10 นาที อีกทั้งอุณหภูมิของ injection MS source temperature และ MS quad temperature จะกำหนดให้เท่ากับ 290 °C 230 °C และ 150 °C ตามลำดับ และใช้ HP-5MS (30 m * 0.25 mm ID, 0.25µm film thickness) เป็นคอลัมน์สำหรับการวิเคราะห์ ด้วย split ratio เท่ากับ 16.7:1

4. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองด้วยการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) ได้นำมาใช้เพื่อศึกษาผลของปัจจัยอุณหภูมิ (400-600 °C) และความเร็วปริภูมิ (weight hourly space velocity

(WHSV)) (23.20 – 68.70 hr⁻¹) ต่อองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม ซึ่งผลการออกแบบการทดลองเป็นดังแสดงใน Table 1 และนำผลการทดลองที่ได้มาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least square regression) สำหรับใช้ในการทำนายผลของตัวแปรและผลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ต่อค่าตอบสนอง ซึ่งสมการที่ได้เป็นดังสมการที่ (1)

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

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

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. องค์ประกอบทางเคมีของของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำ มีความหนืดสูง ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) และผลที่ได้เป็นดังแสดงใน Table 2 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแบ่งออกเป็น 6 กลุ่ม ได้แก่ โอลิฟินส์ (olefins), พาราฟิน (paraffins), แนฟทีน (naphthenes), อะโรมาติก (aromatics), ออกซิเจน (oxygenated) และ มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (mixed naphthenes-aromatics)

2. การศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

การศึกษากิจกรรมการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มที่มีปัจจัยอิสระจำนวน 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ (A) และความเร็วปริภูมิ (B) โดยทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) แบบการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) ได้จำนวนการทดลองทั้งสิ้น 11 การทดลอง ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นดังแสดงใน Table 1 พบว่า เปอร์เซนต์โอเลฟินส์ (%olefins) มีค่าสูงสุดคือ 25.3% เมื่อใช้อุณหภูมิ 571 °C ที่ความเร็วปริภูมิ 29.86 hr⁻¹ และมีค่าต่ำสุดคือ 5.0% เมื่อใช้อุณหภูมิ 400 °C ที่ความเร็วปริภูมิ 45.95 hr⁻¹ เปอร์เซนต์พาราฟิน (%paraffins) มีค่าสูงสุดคือ 15.5% เมื่อใช้อุณหภูมิ 429 °C ที่ความเร็วปริภูมิ 62.04

hr⁻¹ และมีค่าต่ำสุดคือ 6.2% เมื่อใช้อุณหภูมิ 600 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 45.95 hr⁻¹ เพอร์เซนต์แนฟทีน (%naphthenes) มีค่าสูงสุดคือ 13.1% เมื่อใช้อุณหภูมิ 500 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 45.95 hr⁻¹ และมีค่าต่ำสุดคือ 1.5% เมื่อใช้อุณหภูมิ 400 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 45.95 hr⁻¹ เพอร์เซนต์อะโรมาติก (%aromatics) มีค่าสูงสุดคือ 45.6% เมื่อใช้อุณหภูมิ 429 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 62.04 hr⁻¹ และมีค่าต่ำสุดคือ 24.4% เมื่อใช้อุณหภูมิ 500 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 23.20 hr⁻¹ เพอร์เซนต์ออกซิเจน (%oxygenated) มีค่าสูงสุดคือ 26.6% เมื่อใช้อุณหภูมิ 400 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 45.95 hr⁻¹ และมี

ค่าต่ำสุดคือ 11.2% เมื่อใช้อุณหภูมิ 600 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 45.95 hr⁻¹ เพอร์เซนต์มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) มีค่าสูงสุดคือ 15.5% เมื่อใช้อุณหภูมิ 429 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 62.04 hr⁻¹ และมีค่าต่ำสุดคือ 5.4% เมื่อใช้อุณหภูมิ 500 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 45.95 hr⁻¹ และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาสร้างสมการด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least square regression) สำหรับใช้ในการทำนายผลของตัวแปรและผลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ต่อค่าตอบสนอง จะได้ดังสมการที่ (2) - (7)

$$\%Olefins = -180.377 + 0.746A - 0.012B - 1.075 \times 10^{-3}AB - 6.324 \times 10^{-4}A^2 + 4.082 \times 10^{-3}B^2 \quad (2)$$

$$\%Paraffins = -77.363 + 0.363A + 0.479B - 8.035 \times 10^{-4}AB - 3.663 \times 10^{-4}A^2 - 1.301 \times 10^{-3}B^2 \quad (3)$$

$$\%Naphthenes = -264.533 + 0.965A + 1.258B - 1.652 \times 10^{-3}AB - 8.562 \times 10^{-4}A^2 - 5.374 \times 10^{-3}B^2 \quad (4)$$

$$\%Aromatics = +380.823 - 1.341A - 0.545B + 2.330 \times 10^{-4}AB + 1.285 \times 10^{-3}A^2 + 8.045 \times 10^{-3}B^2 \quad (5)$$

$$\%Oxygenated = +43.757 - 0.015A + 8.964 \times 10^{-3}B + 2.650 \times 10^{-3}AB - 1.821 \times 10^{-4}A^2 - 0.015B^2 \quad (6)$$

$$\%Mixed Naphthenes-Aromatics = +197.730 - 0.718A - 1.189B + 6.487 \times 10^{-4}AB + 7.517A^2 + 9.621 \times 10^{-3}B^2 \quad (7)$$

Table 1 Response surface experimental design and results for catalytic cracking process of palm oil

Run	Independent variable		%Olefins			%Paraffins			%Naphthenes			%Aromatics			%Oxygenated			%Mixed Naphthenes - Aromatics		
	A	B	Actual value	Predicted value		Actual value	Predicted value		Actual value	Predicted value		Actual value	Predicted value		Actual value	Predicted value		Actual value	Predicted value	
1	400	45.95	5.0	5.2		12.5	13.7		1.5	0.7		45.2	46.1		26.6	26.0		9.1	8.3	
2	429	62.04	9.5	9.7		15.5	14.3		4.8	5.4		45.6	45.2		16.6	17.0		7.9	8.4	
3	429	29.86	13.6	12.9		14.5	13.8		2.7	3.6		37.0	35.7		24.0	24.7		8.3	9.3	
4	500	45.95	18.9	18.0		13.0	13.4		13.1	12.5		28.2	28.7		21.3	20.4		5.4	7.1	
5	500	23.20	23.1	24.0		13.7	13.7		12.0	11.2		24.4	25.8		14.4	13.7		12.4	11.6	
6	500	45.95	18.3	18.0		12.7	13.4		12.3	12.5		28.3	28.7		22.0	20.4		6.4	7.1	
7	500	68.70	16.4	16.1		11.0	11.7		8.6	8.3		39.8	40.0		11.5	11.4		12.6	12.5	
8	500	45.95	16.7	18.0		14.4	13.4		12.2	12.5		29.6	28.7		17.8	20.4		9.4	7.1	
9	571	62.04	16.4	16.4		6.7	6.7		6.2	6.3		39.5	39.3		12.4	12.4		18.8	18.8	
10	571	29.86	25.3	24.4		9.4	9.9		11.6	12.1		29.8	28.8		7.6	8.1		16.3	16.7	
11	600	45.95	17.6	18.1		6.2	5.7		7.4	7.3		36.4	37.0		11.2	11.0		21.0	20.9	

Table 2 Chemical composition of organic liquid product from catalytic cracking process of palm oil

Compound Name	Formular	Retention time	Compound Name	Formular	Retention time
Olefins compound					
1,8-Nonadiene	C ₉ H ₁₆	3.844	Decane	C ₁₀ H ₂₂	7.976
4-Nonene	C ₉ H ₁₈	4.251	Undecane	C ₁₁ H ₂₄	11.457
1,3,11-Dodecatriene	C ₁₂ H ₂₀	7.342	Dodecane	C ₁₂ H ₂₆	14.605
1-Decene	C ₁₀ H ₂₀	7.715	Tridecane	C ₁₃ H ₂₈	17.491
1,10-Undecadiene	C ₁₁ H ₂₀	10.881	n-Nonylcyclohexane	C ₁₅ H ₃₀	23.747
1-Undecene	C ₁₁ H ₂₂	11.219	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	27.182
5-Undecene, (E)-	C ₁₁ H ₂₂	11.369	Naphthenes compound		
5-Undecene	C ₁₁ H ₂₂	11.638	Cyclohexene, 1,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₄	2.678
1,11-Dodecadiene	C ₁₂ H ₂₂	14.091	Cyclopentadiene, 2,5,5-trimethyl-	C ₈ H ₁₂	3.004
1-Dodecene	C ₁₂ H ₂₄	14.388	1-Propylcyclopentene	C ₈ H ₁₄	3.016
3-Dodecene, (E)-	C ₁₂ H ₂₄	14.758	Cyclohexene, 1-ethyl-	C ₈ H ₁₄	3.076
1-Tridecene	C ₁₃ H ₂₆	17.279	Pentalene, 1,2,3,3a,4,6a-hexahydro-	C ₈ H ₁₂	3.207
1-Tridecene	C ₁₃ H ₂₆	22.468	Cyclohexane, 1-ethenyl-2-methyl-, trans-	C ₉ H ₁₆	3.66
Cetene	C ₁₆ H ₃₂	24.793	Cyclopropane, 1-methyl-2-pentyl-	C ₉ H ₁₈	4.154
8-Heptadecen	C ₁₇ H ₃₄	26.671	Bicyclo[3.2.1]octane	C ₈ H ₁₄	4.264
1-Pentadecene	C ₁₅ H ₃₀	27.024	Cyclopentene, 1-butyl-	C ₉ H ₁₆	5.959
Paraffins compound					
Nonane	C ₉ H ₂₀	4.364	Cyclohexene, 1-propyl-	C ₉ H ₁₆	6.326
			Bicyclo[2.2.2]octane	C ₈ H ₁₄	6.687
			Trans-2,3-dimethylbicyclo[2.2.2]octane	C ₁₀ H ₁₈	7.009

Table 2 (Continuuous)

Compound Name	Formular	Retention time	Compound Name	Formular	Retention time
Bicyclo[3.3.1]nonane	C ₉ H ₁₆	10.172	Mesitylene	C ₉ H ₁₂	7.666
Cycloundecene(E)	C ₁₁ H ₂₀	12.281	Benzene, (1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂	8.615
Cyclododecene, (Z)-	C ₁₂ H ₂₂	15.336	Benzene, 1-methyl-4-propyl-	C ₁₀ H ₁₄	9.695
Cyclopentadecane	C ₁₅ H ₃₀	22.283	Benzene, n-butyl-	C ₁₀ H ₁₄	9.850
Cyclotetradecane	C ₁₄ H ₂₈	19.972	Benzene, 1-methyl-3-(1-methylethyl)-	C ₁₀ H ₁₂	10.806
Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	20.146	Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	10.831
Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	22.694	Benzene, 4-ethenyl-1,2-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₂	11.248
Aromatics compound					
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	3.357	Benzene, 1-ethenyl-3,5-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₂	11.394
Benzene, 1,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀	3.588	Benzene, hexyl-	C ₁₂ H ₁₈	16.252
p-Xylene	C ₈ H ₁₀	3.651	Benzene, 4-ethenyl-1,2-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₂	12.321
1,3,5,7-Cyclooctatetraene	C ₈ H ₈	4.123	Benzene, pentyl-	C ₁₁ H ₁₆	13.197
Benzene, 1,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀	4.185	Benzene, (1-methylbutyl)-	C ₁₁ H ₁₆	13.475
Benzene, (1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂	5.132	Naphthalene	C ₁₀ H ₈	13.927
Benzene, propyl-	C ₉ H ₁₂	6.181	1,1'-Biphenyl, 4-methyl-	C ₁₃ H ₁₂	22.131
Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C ₉ H ₁₂	6.535	Naphthalene, 2-ethyl-	C ₁₂ H ₁₂	19.78
Benzene, 1,2,4-trimethyl-"	C ₉ H ₁₂	6.728	Naphthalene, 1,2-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	19.864
Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C ₉ H ₁₂	7.118	Naphthalene, 2,6-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	20.067
alpha-Methylstyrene	C ₉ H ₁₀	7.233	Naphthalene, 1,4-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	20.446
			Naphthalene, 1,6-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	20.525

Table 2 (Continuous)

Compound Name	Formular	Retention time	Compound Name	Formular	Retention
Naphthalene, 2-ethenyl-	C ₁₂ H ₁₀	20.695	Naphthalene, 1,2-dihydro-4-methyl-	C ₁₁ H ₁₂	15.728
Anthracene, 2-methyl-	C ₁₅ H ₁₂	30.954	Naphthalene, 1,2-dihydro-	C ₁₀ H ₁₀	11.801
1,1'-Biphenyl, 2-methyl-	C ₁₃ H ₁₂	23.47	Indan, 1-methyl-	C ₁₀ H ₁₂	12.512
1H-Phenylene	C ₁₃ H ₁₀	23.926	2-Methylindene	C ₁₀ H ₁₀	12.855
Pyrene	C ₁₆ H ₁₀	34.985	Cycloprop[a]indene, 1,1a,6,6a-tetrahydro-	C ₁₀ H ₁₀	13.269
Oxygenated compound					
Furan, 3-methyl-	C ₅ H ₆ O	2.785	Benzene, 1,3-hexadienyl-	C ₁₂ H ₁₄	14.851
Formic acid, 2,3-dimethylphenyl ester	C ₉ H ₁₀ O ₂	11.738	Acenaphthene	C ₁₂ H ₁₀	21.998
Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O	10.256	1H-Indene, 1-ethylidene-	C ₁₁ H ₁₀	17.142
Pentadecanal-	C ₁₅ H ₃₀ O	29.627	1H-Indene, 1,1,3-trimethyl-	C ₁₂ H ₁₄	19.319
2-Heptadecanone	C ₁₇ H ₃₄ O	31.372	Acenaphthylene	C ₁₂ H ₈	21.135
n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	33.46	1H-Indene, 2-phenyl-	C ₁₃ H ₁₂	31.227
16-Hentriacontanone	C ₃₁ H ₆₂ O	52.279	Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	24.352
Mixed Naphthenes – Aromatics compound					
Indene	C ₉ H ₈	9.389	4a,9a-Methano-9H-fluorene	C ₁₄ H ₁₂	26.953
Indane	C ₉ H ₁₀	5.904	9H-Fluorene, 4-methyl-	C ₁₄ H ₁₂	27.091
Benzene, cyclopropyl-	C ₉ H ₁₀	7.823	9H-Fluorene, 9-methylene-	C ₁₄ H ₁₀	28.62
Indan, 1-methyl-	C ₁₀ H ₁₂	10.51	Fluoranthene	C ₁₆ H ₁₀	34.06
Cycloprop[a]indene, 1,1a,6,6a-tetrahydro-	C ₁₀ H ₁₀	10.659	11H-Benzol[b]fluorene	C ₁₇ H ₁₂	36.756
			8,9-Dihydrocyclopenta[def]phenanthrene	C ₁₅ H ₁₂	31.449

ความมีนัยสำคัญของสมการที่ (2) - (7) จะแสดงด้วยข้อมูลจาก Analysis of variance (ANOVA) ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าทุกสมการมีค่า F-value มากกว่า critical value ที่ความเชื่อมั่น 95% อีกทั้งค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้น สมการที่ได้จึงมีนัยสำคัญในการใช้ทำนายองค์ประกอบต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์เหลว และเมื่อพิจารณาความมีนัยสำคัญของตัวแปรหลัก และปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรหลักในแต่ละองค์ประกอบ โดยใช้ค่า P-value เป็นเกณฑ์ (P-value น้อยกว่า 0.05 จะเป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญ) จะพบว่าตัวแปร AB และ B² ไม่มีนัยสำคัญต่อ

เปอร์เซ็นต์โอเลฟินส์ (%olefins) ตัวแปร B, AB และ B² ไม่มีนัยสำคัญต่อ เปอร์เซ็นต์พาราฟิน (%paraffins) ตัวแปร AB ไม่มีนัยสำคัญต่อ เปอร์เซ็นต์อะโรมาติก (%aromatics) ตัวแปร B และ A² ไม่มีนัยสำคัญต่อ เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (%oxygenated) และตัวแปร B และ AB ไม่มีนัยสำคัญต่อ เปอร์เซ็นต์มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า R² ขององค์ประกอบต่าง ๆ จะพบว่ามีค่ามากกว่า 0.93 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการที่ได้นั้นสามารถใช้ในการทำนายได้เป็นอย่างดี

Table 3 Analysis of variance of the developed model for %Olefin, %Paraffin, %Napthenes, %Aromatics, %Oxygenated and %Mixed Napthenes - Aromatics

ปัจจัยที่ศึกษา	%Olefin		%Paraffin		%Napthenes	
	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
Model	64.39	0.0002	15.16	0.0048	48.87	0.0003
A	169.16	< 0.0001	53.88	0.0007	63.16	0.0005
B	64.16	0.0005	3.15	0.1363	11.54	0.0193
AB	6.11	0.0565	2.78	0.1563	20.36	0.0063
A ²	57.63	0.0006	15.77	0.0106	149.12	< 0.0001
B ²	6.43	0.0521	0.53	0.4982	15.74	0.0107
Lack of Fit	0.62	0.6644	1.84	0.3716	4.03	0.2053
Adeq Precision	26.309		10.610		19.296	
C.V. (%)	6.02		9.31		9.91	
Std. Dev.	0.99		1.10		0.83	
Good of Fit	R ² = 0.9847		R ² = 0.9381		R ² = 0.9799	
ปัจจัยที่ศึกษา	%Aromatics		%Oxygenated		%Mixed Napthenes -	
	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
Model	68.30	0.0001	29.52	0.0010	22.67	0.0019
A	54.52	0.0007	94.07	0.0002	71.15	0.0004
B	132.35	< 0.0001	2.29	0.1909	0.36	0.5764
AB	0.19	0.6844	15.19	0.0114	0.97	0.3697
A ²	154.27	< 0.0001	1.96	0.2208	35.57	0.0019
B ²	16.19	0.0101	35.91	0.0019	15.61	0.0108
Lack of Fit	3.50	0.2301	0.11	0.9490	0.22	0.8777

Table 3 (Continuous)

ปัจจัยที่ศึกษา	%Aromatics		%Oxygenated		%Mixed Napthenes -	
	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
Adeq Precision	22.356		15.741		12.507	
C.V. (%)	3.52		9.18		12.90	
Std. Dev.	1.23		1.55		1.50	
Good of Fit	$R^2 = 0.9856$		$R^2 = 0.9672$		$R^2 = 0.9577$	

3. การวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อค่าตอบสนอง ในกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมัน ปาล์ม

3.1 เปอร์เซนต์โอเลฟินส์ (%olefins)

ปฏิสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความเร็ว
ปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณของ เปอร์เซนต์โอเลฟินส์
(%olefins) สามารถแสดงเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนอง
และกราฟโครงร่างดัง Figure 2(a) – 2(b) ซึ่งผลของ
ปฏิสัมพันธ์แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผล
ให้ เปอร์เซนต์โอเลฟินส์ (%olefins) มีค่าเพิ่มขึ้น
เช่นกัน โดยจะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 550°C และเมื่อ
อุณหภูมิเพิ่มมากยิ่งขึ้นส่งผลให้ เปอร์เซนต์โอเลฟินส์
(%olefins) มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลจากการเกิด coke

บนบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้
ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดต่ำลง ซึ่ง
สอดคล้องกับผลการทดลองของ Hou *et al.* (2017)
ในขณะที่เมื่อความเร็วปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้
เปอร์เซนต์โอเลฟินส์ (%olefins) มีค่าลดลงเพราะเมื่อ
ความเร็วปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาการ
สัมผัสกันระหว่างไอระเหยของน้ำมันปาล์มกับพื้นผิว
ของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ทำให้ไม่สามารถเกิดการ
แตกตัวของโมเลกุลได้อย่างสมบูรณ์ โดยผลการ
ทดลองของทั้งสองตัวแปรสอดคล้องกับผลการ
ทดลองของ Yaisamlee and Reubroycharoen (2021)
ซึ่งเป็นการศึกษาการผลิต โอเลฟินส์ (olefins) จากฟู
เซลอยล์ (Fusel oil) ด้วยกระบวนการแตกตัวด้วย
ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5

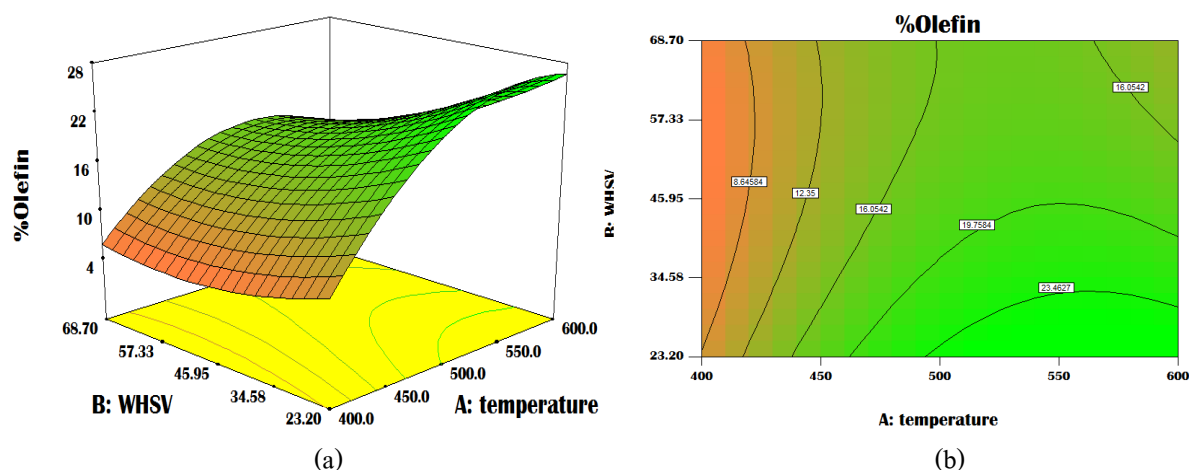


Figure 2 Response surface (a) and contour plot (b) as interactive effect of temperature and WHSV on %Olefins

3.2 เปอร์เซนต์พาราฟิน (%paraffins)

ปฏิสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณของ เปอร์เซนต์พาราฟิน (%paraffins) สามารถแสดงเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนอง และกราฟโครงร่างดัง Figure 3(a) – 3(b) ซึ่งผลของปฏิสัมพันธ์แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ เปอร์เซนต์พาราฟิน (%paraffins) มีค่าต่ำลง และเมื่อพิจารณาผลของ

ความเร็วปฏิกิริยา จะพบว่าที่อุณหภูมิ 400 – 500 °C เปอร์เซนต์พาราฟิน (%paraffins) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ต่ำและความเร็วปฏิกิริยาที่สูงจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ปริมาณ เปอร์เซนต์พาราฟิน (%paraffins) ในผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Yang *et al.* (2013)

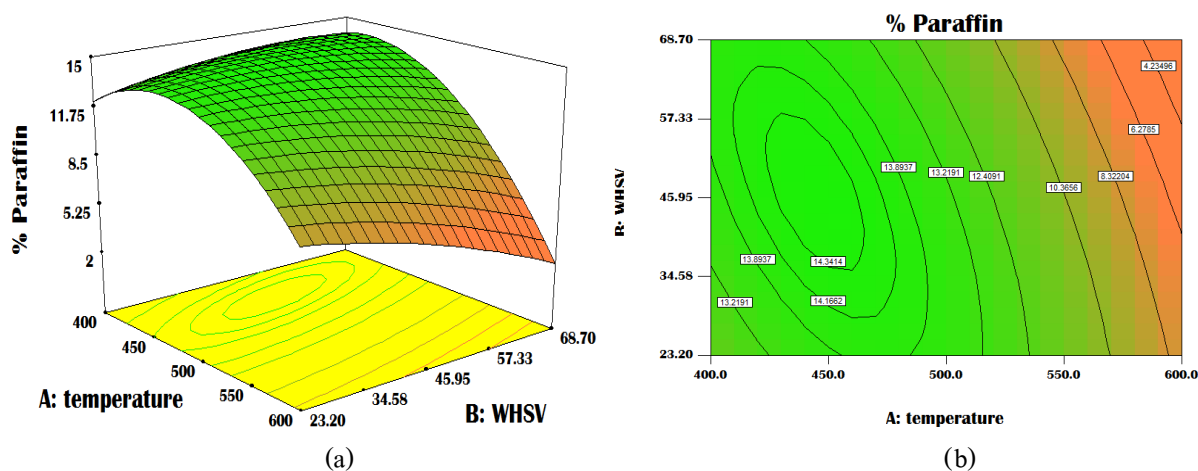


Figure 3 Response surface (a) and contour plot (b) as interactive effect of temperature and WHSV on %Paraffins

3.3 เปอร์เซนต์แนฟทีน (%naphthenes)

ปฏิสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณของ เปอร์เซนต์แนฟทีน (%naphthenes) สามารถแสดงเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนอง และกราฟโครงร่าง Figure 4(a) – 4(b) ซึ่งผลของปฏิสัมพันธ์แสดงว่าเมื่อความเร็วปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ เปอร์เซนต์แนฟทีน (%naphthenes) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400°C เป็น 550°C จะส่งผลให้ เปอร์เซนต์แนฟทีน (%naphthenes) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพการเลือก (selectivity) ของปฏิกิริยา แต่เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 550°C จะส่งผลให้ เปอร์เซนต์แนฟทีน (%naphthenes) มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผล

การศึกษาของ Sanhoob *et al.* (2022) และ Potapenko *et al.* (2019) และเมื่อพิจารณาผลของความเร็วปฏิกิริยาต่อ เปอร์เซนต์แนฟทีน (%naphthenes) จะพบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ความเร็วปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับ เปอร์เซนต์แนฟทีน (%naphthenes) ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิสูงจะมีการแปรผกผันซึ่งกันและกัน ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากเมื่อ ความเร็วปฏิกิริยามีค่าต่ำจะส่งผลให้เวลาในการสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดเป็น เปอร์เซนต์แนฟทีน (%naphthenes) มากขึ้น และเมื่อความเร็วปฏิกิริยามีค่าสูงระยะเวลาในการสัมผัสกันน้อยลงจึงส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์น้อยลง สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยของ Mettu *et al.* (2022)

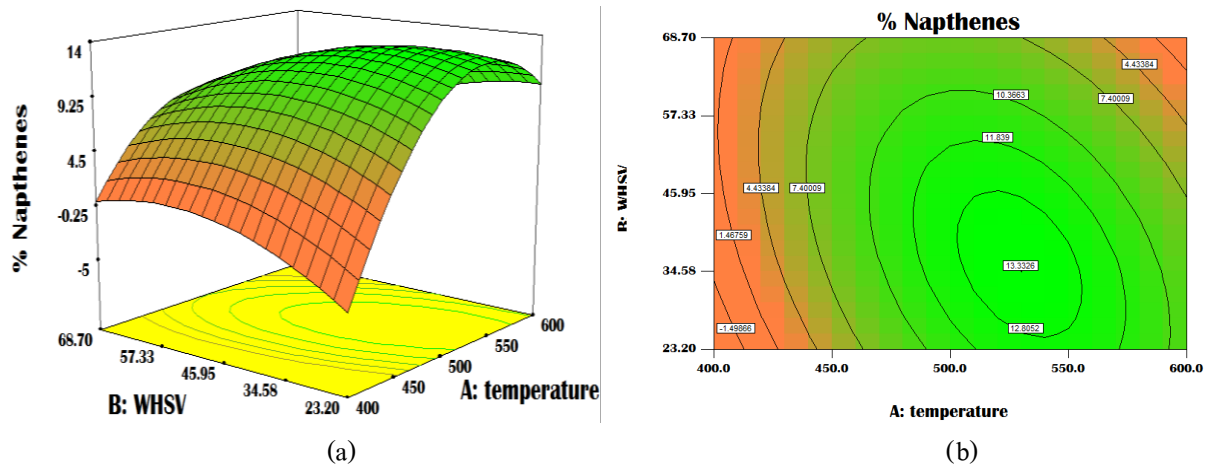


Figure 4 Response surface (a) and contour plot (b) as interactive effect of temperature and WHSV on %Naphthenes

3.4 เปอร์เซนต์อะโรมาติก (%aromatics)

ปฏิสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความเร็ว ปริภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณของ เปอร์เซนต์อะโรมาติก (%aromatics) สามารถแสดงเป็นกราฟพื้นผิว ตอบสนอง และกราฟโครงร่างดัง Figure 5(a) – 5(b) ซึ่งผลของปฏิสัมพันธ์แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จาก 400°C เป็น 525°C จะส่งผลให้ เปอร์เซนต์ อะโรมาติก (%aromatics) ลดลง (Metttu *et al.*, 2022) แต่เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 525°C จะส่งผลให้

เปอร์เซนต์อะโรมาติก (%aromatics) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไฮโดรไซคลิกเซชัน อะโรมาไทเซชัน (dehydrocyclization aromatization) ของสารประกอบแอลคีน โอลิโกเมอร์ (alkene oligomers) เกิดเพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้ค่าสภาพการเลือก (selectivity) ของ อะโรมาติก (aromatics) เพิ่มขึ้น (Zhu *et al.*, 2005) ในขณะที่เมื่อความเร็วปริภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ เปอร์เซนต์อะโรมาติก (%aromatics) มีค่าเพิ่มขึ้น

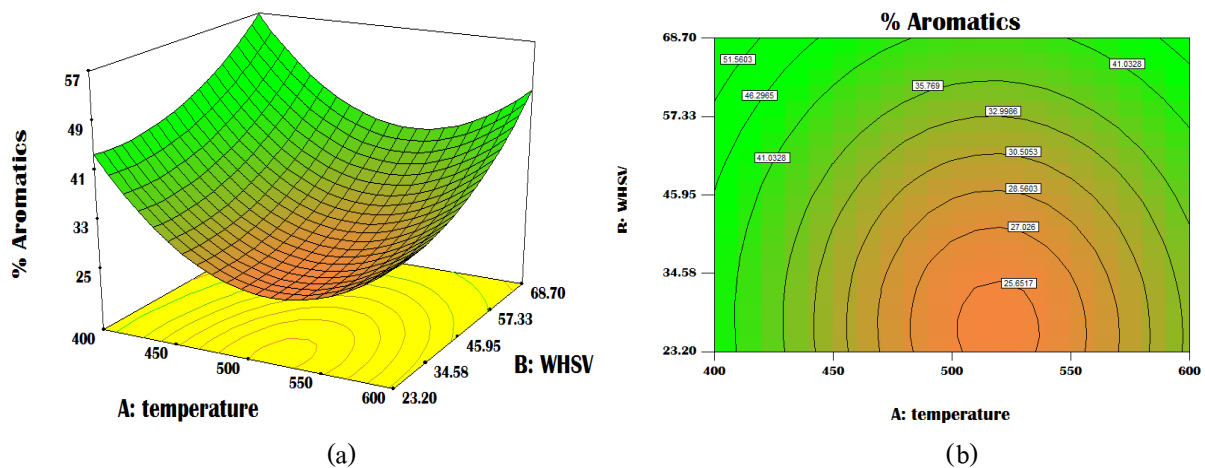


Figure 5 Response surface (a) and contour plot (b) as interactive effect of temperature and WHSV on %Aromatics

3.5 เปอร์เซนต์ออกซิเจน (%oxygenated)

ปฏิสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณของ เปอร์เซนต์ออกซิเจน (%oxygenated) สามารถแสดงเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนอง และกราฟโครงร่างดัง Figure 6(a) – 6(b) ซึ่งผลของปฏิสัมพันธ์แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ เปอร์เซนต์ออกซิเจน (%oxygenated) มีค่าลดลง เป็นผลจากปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจน (deoxygenation) ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยที่ปริมาณของออกซิเจนที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ที่

ได้จากกระบวนการ hydrocracking ของน้ำมันพืชจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Istadi *et al.* (2021) ในส่วนของความเร็วปฏิกิริยาจะส่งผลให้ เปอร์เซนต์ออกซิเจน (%oxygenated) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 23.20 เป็น 45.95 และ เปอร์เซนต์ออกซิเจน (%oxygenated) จะมีค่าลดลง เมื่อความเร็วปฏิกิริยามีค่าสูงกว่า 45.95 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu *et al.* (2016)

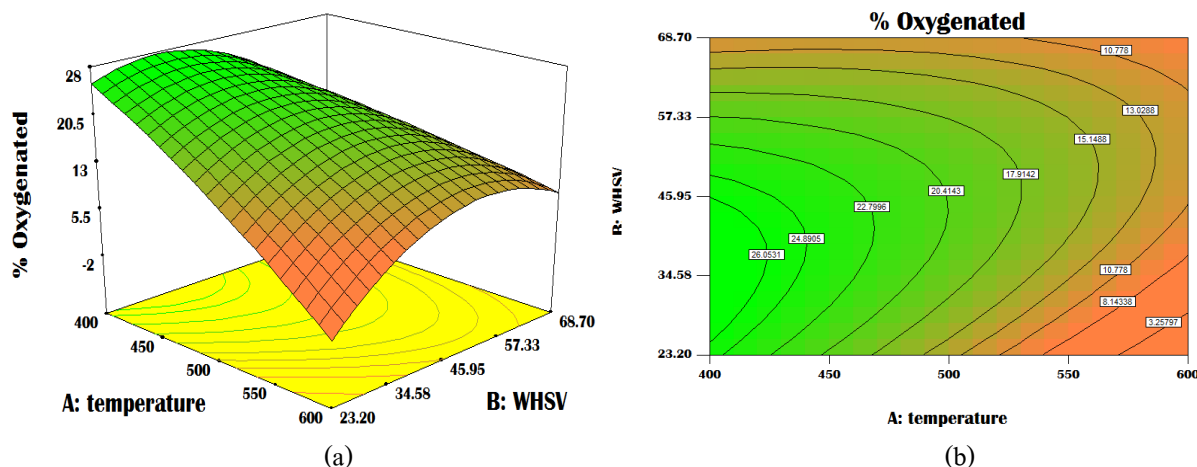


Figure 6 Response surface (a) and contour plot (b) as interactive effect of temperature and WHSV on %Oxygenated

3.6 เปอร์เซนต์มิกซ์เนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics)

ปฏิสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณของ เปอร์เซนต์มิกซ์เนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) สามารถแสดงเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนอง และกราฟโครงร่างดัง Figure 7(a) – 7(b) ซึ่งผลของปฏิสัมพันธ์แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ เปอร์เซนต์มิกซ์เนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อความเร็วปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 23.2 hr⁻¹ เป็น

45.95 hr⁻¹ จะส่งผลให้ เปอร์เซนต์มิกซ์เนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) มีค่าลดลง แต่เมื่อความเร็วปฏิกิริยาสูงกว่า 45.95 hr⁻¹ จะส่งผลให้ เปอร์เซนต์มิกซ์เนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนปัจจัยของความเร็วปฏิกิริยาจะส่งผลให้ เปอร์เซนต์มิกซ์เนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) มีค่าลดลง ในช่วงความเร็วปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 23.20 h⁻¹ เป็น 45.95 h⁻¹ และเมื่อความเร็วปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ เปอร์เซนต์มิกซ์เนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

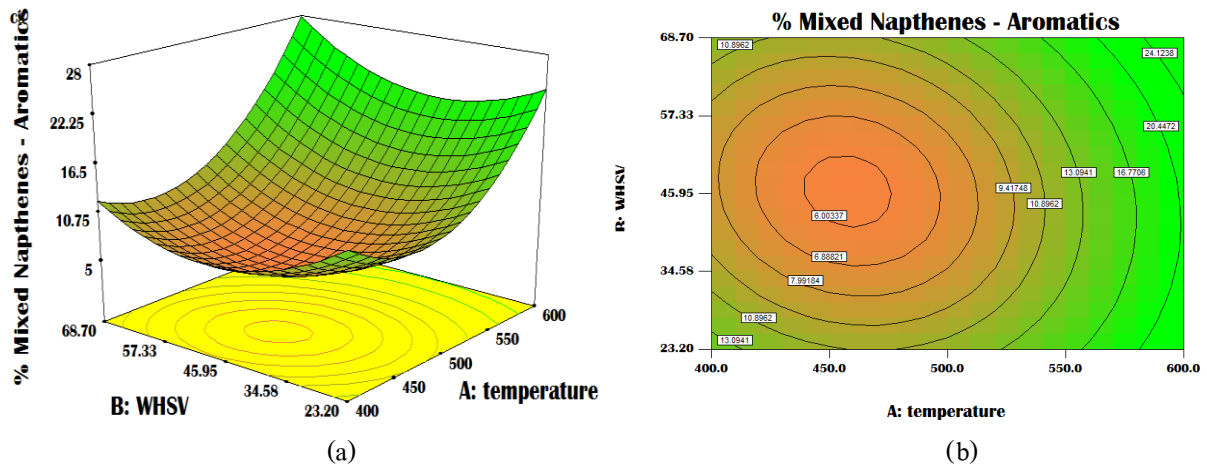


Figure 7 Response surface (a) and contour plot (b) as interactive effect of temperature and WHSV on %Mixed Naphthenes – Aromatics

4. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มทำได้โดยใช้ฟังก์ชันสำหรับหาสภาวะที่เหมาะสม (optimization) ในโปรแกรมดีไซน์เอ็กเพอร์ท (Design Expert®) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้สำหรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่าง ๆ โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมนั้นทำได้โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระอยู่ในช่วงขอบเขตที่ทำการศึกษา อีกทั้งกำหนดเป้าหมายของเปอร์เซ็นต์โอเลฟินส์ (%olefins), เปอร์เซ็นต์พาราฟิน (%paraffins) และ เปอร์เซ็นต์อะโรมาติก (%aromatics) ให้มีค่ามากที่สุด (maximum) และกำหนดเป้าหมายของ เปอร์เซ็นต์แนฟทีน (%naphthenes), เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (%oxygenated) และ เปอร์เซ็นต์มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) ให้มีค่าน้อยที่สุด (minimum)

จากการทำนายด้วยสมการสำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม เป็นดังแสดงใน Table 4 พบว่า กระบวนการที่อุณหภูมิ 460.3 °C ที่ความเร็วปฏิกิริยา 23.2 hr⁻¹ จะเป็น

สภาวะที่ส่งผลให้ เปอร์เซ็นต์โอเลฟินส์ (%olefins), เปอร์เซ็นต์พาราฟิน (%paraffins), เปอร์เซ็นต์แนฟทีน (%naphthenes), เปอร์เซ็นต์อะโรมาติก (%aromatics), เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (%oxygenated) และ เปอร์เซ็นต์มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) มีค่าเท่ากับ 19.5, 13.9, 7.0, 29.8, 18.8 และ 10.8 ตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองตามสภาวะที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ เพื่อยืนยันความแม่นยำของสมการพบว่า เปอร์เซ็นต์โอเลฟินส์ (%olefins), เปอร์เซ็นต์พาราฟิน (%paraffins), เปอร์เซ็นต์แนฟทีน (%naphthenes), เปอร์เซ็นต์อะโรมาติก (%aromatics), เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (%oxygenated) และ เปอร์เซ็นต์มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics) มีค่าเท่ากับ 19.4, 15.2, 6.6, 34.7, 15.4 และ 8.7 ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.5 – 19.4% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า 20% แสดงว่าสมการที่ได้มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำนายผลของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริยาต่อ เปอร์เซ็นต์โอเลฟินส์ (%olefins), เปอร์เซ็นต์พาราฟิน (%paraffins),

เปอร์เซ็นต์แนฟทีน (%naphthenes), เปอร์เซ็นต์อะโรมาติก (%aromatics), เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนเนท (%oxygenated) และ เปอร์เซ็นต์มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (%mixed naphthenes-aromatics)

Table 4 Optimization criteria to maximize %paraffins at optimized condition for catalytic cracking process of palm oil

Description	Optimization target	Lower limit	Upper limit	Optimized condition		% Different
				Predicted	Experimental	
				value	value	
Temperature (°C)	In range	400	600	460.3	462	-
WSHV (hr ⁻¹)	In range	23.2	68.7	23.2	23.2	-
%Olefins	Maximize	-	-	19.5	19.4	0.5
%Paraffins	Maximize	-	-	13.9	15.2	-9.4
%Naphthenes	Minimize	-	-	7.0	6.6	5.7
%Aromatics	Maximize	-	-	29.8	34.7	-16.4
%Oxygenated	Minimize	-	-	18.8	15.4	18.1
%Mixed Naphthenes – Aromatics	Minimize	-	-	10.8	8.7	19.4

5. การศึกษาผลของเวลาต่อกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม

เมื่อทำการออกแบบการทดลองด้วย CCD เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยอุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริยา โดยวิธี ANOVA ทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม จากนั้นจะทำการศึกษาต่อถึงผลของปัจจัยเวลาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลการทดลองเป็นดัง Figure 8 จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้ง 6 กลุ่มที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม พบว่าปริมาณของพาราฟิน (paraffins) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10 นาที ไปจนมีค่ามากที่สุดที่เวลา 30 นาที จากนั้นปริมาณจะมีค่าลดลง และมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงเวลา 40 นาทีจนถึง 120 นาที และจะลดลงเป็นอย่างมากหลังจากเวลา 120

นาที โดยในช่วงเวลา 40-120 นาทีจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างคงที่ ปริมาณของแนฟทีน (naphthenes) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 10 นาที จนถึง 120 นาที และจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 120 นาที ปริมาณของอะโรมาติก (aromatics) จะลดลงเรื่อย ๆ ในช่วงเวลา 10 นาที จนถึง 120 นาที และจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นจาก 120 นาที โดยในช่วงเวลา 100 – 120 นาที ปริมาณของอะโรมาติก (aromatics) จะมีค่าคงที่ ปริมาณของออกซิเจนเนท (oxygenated) จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมากในช่วงระยะเวลา 10 นาที จนถึง 140 นาที ปริมาณของโอเลฟินส์ (olefins) จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงเวลา 10 นาทีจนถึง 120 นาที และจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 120 นาที ปริมาณของ มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (mixed naphthenes-aromatics) จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงเวลา 10 นาทีจนถึง 120 นาที และจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 120 นาที ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เป็นผลสืบเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา ขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไปจะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอันเป็นผลทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง สืบเนื่องจากในเวลาที่ปฏิกิริยากำลังดำเนินไปจะมีปริมาณคาร์บอนเกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากคาร์บอนเหล่านี้จะเข้าไปปกคลุมส่วนที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา

ดังนั้น หากมีคาร์บอนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นจำนวนมาก จะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมประสิทธิภาพได้เร็วขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดน้อยลง เพราะฉะนั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีปริมาณสัดส่วนขององค์ประกอบที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง (โอเลฟินส์ (olefins), พาราฟิน (paraffins) และ อะโรมาติก (aromatics)) สูงสุดจึงมีค่าเท่ากับ 20 นาที

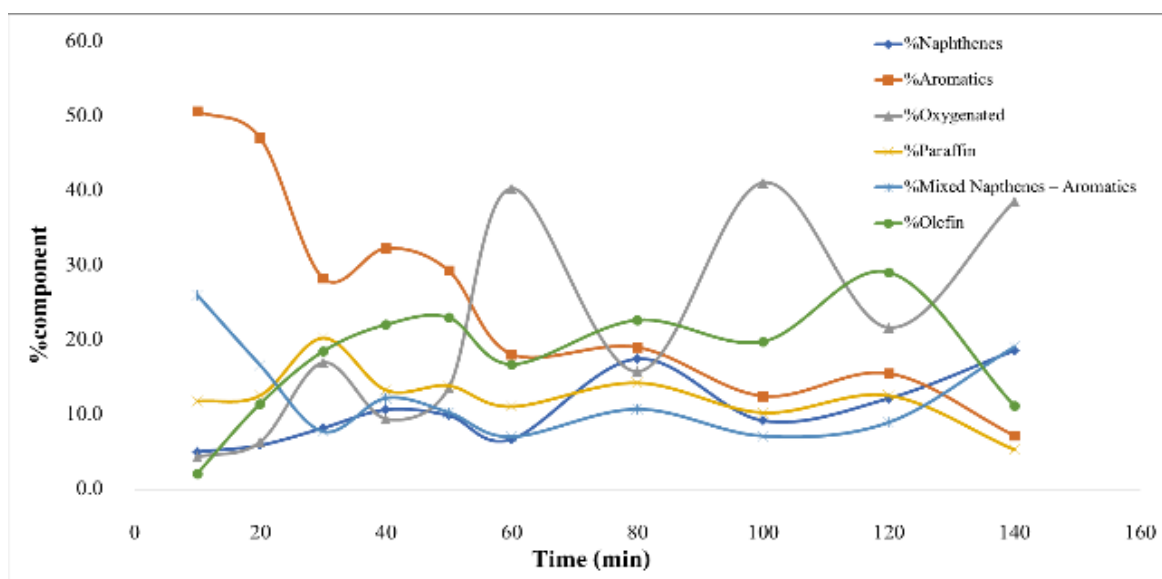


Figure 8 Effect of residence time on %component of catalytic cracking process of palm oil

สรุป

การผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ด้วยกระบวนการแตกตัวของน้ำมันปาล์มบนตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบด้วยสารกลุ่มโอเลฟินส์ (olefins), พาราฟิน (paraffins), แนฟทีน (naphthenes), อะโรมาติก (aromatics), ออกซิเจน (oxygenated) และ มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (mixed naphthenes-aromatics) ซึ่งสารกลุ่ม โอเลฟินส์ (olefins), พาราฟิน (paraffins) และ อะโรมาติก (aromatics) นั้น สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพได้ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาวิจัย

ผลของอุณหภูมิ และความเร็วปฏิกิริยาต่อปริมาณของสารแต่ละกลุ่มในผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบประสมกลาง และวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA เพื่อให้ได้สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ จากการพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) พบว่าสภาวะที่อุณหภูมิ 460.3 °C และความเร็วปฏิกิริยา 23.2 hr⁻¹ ทำให้ได้ปริมาณสารกลุ่มโอเลฟินส์ (olefins), พาราฟิน (paraffins), แนฟทีน (naphthenes), อะโรมาติก (aromatics), ออกซิเจน

(oxygenated) และ มิกซ์แนฟทีน-อะโรมาติก (mixed naphthenes-aromatics) เท่ากับ 19.5% 13.9% 7.0% 29.8% 18.8 และ 10.8% ตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองตามสภาวะดังกล่าว พบว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 20% แสดงว่าสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำมาใช้อธิบายผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้ และเมื่อศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตสารกลุ่มต่าง ๆ พบว่าที่เวลา 20 นาทีจะทำให้ผลรวมของสารโอเลฟินส์ (olefins), พาราฟิน (paraffins) และ อะโรมาติก (aromatics) เกิดขึ้นสูงที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยทักษิณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, M., Farhana, R., Raman, A.A.A. and Bhargava, S.K. 2016. Synthesis and activity evaluation of heterometallic nano oxides integrated ZSM-5 catalysts for palm oil cracking to produce biogasoline. **Energy Conversion and Management** 119: 352-360.
- Amjad, U.E.S., Tajjamal, A., Ul-Hamid, A., Faisal, A., Zaidi, S.A.H., Sherin, L., Mir, A., Mustafa, M., Ahmad, N., Hussain, M. and Park, Y.K. 2022. Catalytic cracking of polystyrene pyrolysis oil: Effect of Nb₂O₅ and NiO/Nb₂O₅ catalyst on the liquid product composition. **Waste Management** 141: 240-250.
- Balboul, B.A.A., Abdelrahman, A.A., Salem, H.M., Mohamed, E.A., Osman, D.I. and Rabie, A.M. 2022. Enhanced production of liquid fuel via catalytic cracking of used sunflower oil catalyzed by Praseodymium supported alumina. **Journal of Molecular Liquids** 367: 120562.
- Bhattacharjee, N. and Biswas, A.B. 2022. Catalytic pyrolysis of rice husk with SnCl₂, Al₂O₃.4SiO₂.H₂O and MoS₂ for improving the chemical composition of pyrolysis oil and gas. **Journal of the Indian Chemical Society** 99(10): 100728.
- Ghaffar, N.F.A., Johari, A., Abdullah, T.A.T. and Ripin, A. 2020. Catalytic Cracking of High Density Polyethylene Pyrolysis Vapor over Zeolite ZSM-5 towards Production of Diesel. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 808(1): 1-12.
- Guo, F., Li, X., Liu, Y., Peng, K., Guo, C. and Rao, Z. 2018. Catalytic cracking of biomass pyrolysis tar over char-supported catalysts. **Energy Conversion and Management** 167: 81-90.
- Gurdeep Singh, H.K., Yusup, S., Quitain, A.T., Kida, T., Sasaki, M., Cheah, K.W. and Ameen, M. 2019. Production of gasoline range hydrocarbons from catalytic cracking of linoleic acid over various acidic zeolite catalysts. **Environmental Science and Pollution Research** 26(33): 34039-34046.
- Hou, X., Qiu, Y., Yuan, E., Li, F., Li, Z., Ji, S., Yang, Z., Liu, G. and Zhang, X. 2017. Promotion on light olefins production through

- modulating the reaction pathways for n-pentane catalytic cracking over ZSM-5 based catalysts. **Applied Catalysis A: General** 543: 51-60.
- Huang, M., Zheng, Y. and Li, S. 2022. Distributed economic model predictive control for an industrial fluid catalytic cracking unit ensuring safe operation. **Control Engineering Practice** 126: 105263.
- Hwang, K.R., Choi, S.A., Choi, I.H. and Lee, K.H. 2021. Catalytic cracking of chlorinated heavy wax from pyrolysis of plastic wastes to low carbon-range fuels: Catalyst effect on properties of liquid products and dechlorination. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 155: 105090.
- Istadi, I., Riyanto, T., Khofiyandita, E., Buchori, L., Anggoro, D.D., Sumantri, I., Putro, B.H. and 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.
- Li, S., Yan, H., Liu, Y., Chen, X., Zhou, X., Feng, X. and Yang, C. 2022. Rational screening of transition metal single-atom-doped ZSM-5 zeolite catalyst for naphtha cracking from microkinetic analysis. **Chemical Engineering Journal** 445: 136670.
- Ma, W., Liu, B., Ji, X., Li, X., Yan, B., Cheng, Z. and Chen, G. 2017. Catalytic co-cracking of distilled bio-oil and ethanol over Ni-ZSM-5/MCM-41 in a fixed-bed. **Biomass and Bioenergy** 102: 31-36.
- Mettu, A., Loke, N., Patil, V., Panday, R. and Gajula, S. 2022. Hydrocracking of Di-and Triaromatic Hydrocarbons to Monoaromatics over Mixed Bi-functional Catalysts. **Catalysis Research** 2(3): 1-26.
- Muttaqii, M.A., Kurniawansyah, F., Prajitno, D.H. and Roesyadi, A. 2021. Hydrocracking process of coconut oil using Ni-Zn/HZSM-5 catalyst for hydrocarbon biofuel production. **Journal of Physics: Conference Series** 1725(1): 012008.
- Palos, R., Rodríguez, E., Gutiérrez, A., Bilbao, J. and Arandes, J.M. 2022. Kinetic modeling for the catalytic cracking of tires pyrolysis oil. **Fuel** 309: 122055.
- Potapenko, O., Khudyakov, M., Altynkovich, E., Plekhova, K., Sorokina, T. and Doronin, V. 2019. Catalytic Cracking of Cyclohexane and 1-Hexene Mixtures on Mono-, Bi-, and Tri-Zeolite Catalysts. **Kinetics and Catalysis** 60(1): 74-86.
- Prajitno, D.H., Al Muttaqii, M., Gunardi, I., Mirzayanti, Y.W., Budianto, A., Marlinda, L. and Roesyadi, A. 2022. Biofuel from hydrocracking of Cerbera manghas oil over Ni-Zn/HZSM-5 catalyst. **Eclética Química** 47(1): 17-39.
- Ramezani, T., Sadrameli, S.M., Bayat, A. and Saeedi Dehaghani, A.H. 2022. Bio-gasoline and bio-naphtha production from catalytic cracking of linseed oil methyl ester over

- iron- and zinc-modified HZSM-5 and γ -Al₂O₃ catalysts in a fixed double-beds reactor. **Fuel Processing Technology** 238: 107514.
- Sanhoob, M.A., Shafei, E.N., Khan, A., Nasser, G.A., Bakare, I., Muraza, O., Al-Bahar, M.Z., Al-Jishi, A.N., Al-Badairy, H.H. and Ummer, A.C. 2022. Catalytic Cracking of n-Dodecane to Chemicals: Effect of Variable-Morphological ZSM-5 Zeolites Synthesized Using Various Silica Sources. **ACS Omega** 7(12): 10317-10329.
- Singh, H.K.G., Yusup, S., Quitain, A.T., Abdullah, B., Inayat, A., Ameen, M., Cheah, K.W., Sasaki, M., Kida, T. and Chai, Y.H. 2021. Five-lump kinetic approach on biofuel production from refined rubber seed oil over Cu/ZSM-5 catalyst via catalytic cracking reaction. **Renewable Energy** 171: 1445-1453.
- Soly Peter, A., Alias, M.P., Iype, M.P., Jolly, J., Sankar, V., Joseph Babu, K. and Baby, D.K. 2021. Optimization of biodiesel production by transesterification of palm oil and evaluation of biodiesel quality. **Materials Today: Proceedings** 42: 1002-1007.
- Sun, X., Liu, Z., Shi, L. and Liu, Q. 2022. Pyrolysis of COVID-19 disposable masks and catalytic cracking of the volatiles. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 163: 105481.
- Valle, B., Palos, R., Bilbao, J. and Gayubo, A.G. 2022. Role of zeolite properties in bio-oil deoxygenation and hydrocarbons production by catalytic cracking. **Fuel Processing Technology** 227: 107130.
- Wang, X., Li, F., Ali, A., Gu, H., Fu, H., Li, Z. and Lin, H. 2022a. Preparation of sodium silicate/red mud-based ZSM-5 with glucose as a second template for catalytic cracking of waste plastics into useful chemicals. **RSC advances** 12(34): 22161-22174.
- Wang, Y., Zhang, Y., Fan, H., Wu, P., Liu, M., Li, X., Yang, J., Liu, C., Bai, P. and Yan, Z. 2022b. Elucidating the structure-performance relationship of typical commercial zeolites in catalytic cracking of low-density polyethylene. **Catalysis Today** 405-406: 135-143.
- Xu, X., Jiang, E., Du, Y. and Li, B. 2016. BTX from the gas-phase hydrodeoxygenation and transmethylation of guaiacol at room pressure. **Renewable Energy** 96: 458-468.
- Yaisamlee, R. and Reubroycharoen, P. 2021. Light olefin production from the catalytic cracking of fusel oil in a fixed bed reactor. **Biomass and Bioenergy** 153: 106217.
- Yang, Y., Wang, Q., Zhang, X., Wang, L. and Li, G. 2013. Hydrotreating of C18 fatty acids to hydrocarbons on sulphided NiW/SiO₂ – Al₂O₃. **Fuel Processing Technology** 116: 165-174.
- Zhu, X., Liu, S., Song, Y. and Xu, L. 2005. Butene catalytic cracking to propene and ethene over potassium modified ZSM-5 catalysts. **Catalysis letters** 103(3): 201-210.