



ผลของชนิดและตำแหน่งติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการไพโรไลซิสชีวมวลที่ส่งผลต่อปริมาณและสมบัติของน้ำมันชีวภาพ

Effects of the type and location of catalyst installation for biomass pyrolysis on yields and properties of the bio-oil

ณัฐดนัย พรรณเจริญวงษ์¹, กัมปนาท ไชยเพชร², ชินภัทร ชูระการ², เกียรติ ดวงอุปมา^{2*} และ สุวิทย์ เหมะธูลิน³

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 39/4 หมู่ 5 ตำบลโป่ง อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี 20150

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ 62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ตำบลกาฬสินธุ์ อำเภอกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000

³สาขาวิชาเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร 680 ถนนนิตโย ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

*ผู้ประพันธ์บทความ keyoon.du@ksu.ac.th, k_duanguppama@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของชนิดและตำแหน่งติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณและสมบัติของน้ำมันชีวภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อไพโรไลซิสแบบเร็วของชี้อยู่ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ ดินขาวเคโอลิน โดโลไมต์ และหินภูเขาไฟ ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกติดตั้ง 2 ตำแหน่ง คือ เครื่องปฏิกรณ์และกรองไอร้อน เงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส ชี้อยู่ 1 กิโลกรัม และ Weight Hourly Space Velocity (WHSV) ของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการป้อนชีวมวล คือ 2 น้ำมันชีวภาพแบ่งออกเป็น 2 ส่วน น้ำมันชีวภาพหนักได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นและชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ น้ำมันชีวภาพเบาจากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งผสมเกลือมีความหนาแน่นเท่ากับน้ำ น้ำมันชีวภาพหนัก คือ ผลิตภัณฑ์หลักที่นำไปวิเคราะห์สมบัติ ผลการวิจัย พบว่า การติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินที่เครื่องปฏิกรณ์ได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุทธ้อยู่ 50.5 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และหินภูเขาไฟปริมาณน้ำมันชีวภาพลดลงและมีปริมาณแกลสเพิ่มขึ้นสูงถึงอยู่ 56.7 โดยน้ำหนัก ผลวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวภาพหนัก พบว่า การติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่เครื่องปฏิกรณ์ช่วยเพิ่มค่าความร้อนสูงสุดเป็น 36.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และมีความหนืดต่ำสุด 42.4 เซนติสโตกร จึงสรุปได้ว่า การติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินที่ตำแหน่งเครื่องปฏิกรณ์ช่วยผลิตน้ำมันชีวภาพได้สูงสุด ขณะที่การติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่ตำแหน่งเครื่องปฏิกรณ์ช่วยปรับปรุงสมบัติของน้ำมันชีวภาพได้ดี

คำหลัก: น้ำมันชีวภาพ, น้ำมันชีวภาพหนัก, น้ำมันชีวภาพเบา, ตัวเร่งปฏิกิริยา, ไพโรไลซิส

ABSTRACT

The study of the effect of the type and location of catalyst installation on the quantity and properties of bio-oil was aimed at rapid pyrolysis of sawdust with three types of catalysts: kaolin, dolomite, and volcanic rock. The catalyst was installed in two locations: the reactor and the hot filter. The conditions of the experiment were a pyrolysis temperature of 500°C, 1 kilogram of sawdust, and the Weight Hourly Space Velocity (WHSV) of catalyst weight to biomass feed rate was 2. Bio-oil has 2 parts: heavy bio-oil (It is denser than water) from the water-cooled condenser and the

electrostatic precipitator condenser. light bio-oil (has the same density as water) from the ice-salt condenser. Heavy bio-oil is the main product that is analyzed for properties. The results showed that the installation of the kaolin catalyst at the reactor produced the highest bio-oil content of 50.5 wt%. But when the dolomite and volcanic rock catalysts were installed, the bio-oil content decreased, and the gas content increased up to 56.7 wt%. Analysis of the heavy bio-oil properties found that installing a dolomite catalyst at the reactor increased the heating value maximum of 36.8 MJ/kg and the viscosity minimum of 42.5 cSt. Therefore, it can be concluded that installing the kaolin catalyst at the reactor location maximizes bio-oil production. Installing a dolomite catalyst at the reactor location greatly improves the properties of the bio-oil.

Keywords: bio-oil, heavy bio-oil, light bio-oil, catalyst, pyrolysis

1. บทนำ

การไพโรไลซิสชีวมวล คือ การย่อยสลายอนุภาคชีวมวลด้วยเคมีความร้อนที่อุณหภูมิ 400–600 องศาเซลเซียส และควบแน่นไอย่างรวดเร็วเพื่อเป็นของเหลวที่เรียกว่า “น้ำมันชีวภาพ” [1] ชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีหลายชนิด เช่น ใบอ้อย [2–4] ไม้กระถินยักษ์ [5–9] เหง้ามันสำปะหลัง [10–15] เศษมันสำปะหลัง [16–21] เปลือกไม้ยูคาลิปตัส [22] ฟางข้าว [23] แกลบ [24, 25] และซีลี้อย [25–28] เป็นต้น จากชีวมวลที่กล่าวมาซีลี้อยมีกระบวนการเตรียมง่ายที่สุด เนื่องจากไม่ต้องนำชีวมวลไปดลละเอียดเพราะว่าผ่านกระบวนการนั้นมาแล้วแต่อย่างไรก็ตามจากรายงานที่ผ่านมา พบว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้ก็มีคุณภาพค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีค่าความร้อนต่ำและความหนืดสูง จึงยังไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง หากนำมาปรับปรุงโดยการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้คุณภาพของน้ำมันชีวภาพดีขึ้น

การไพโรไลซิสชีวมวลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ การเร่งปฏิกิริยาของการกลายเป็นไอที่เกิดจากการสลายตัวของชีวมวลเพื่อให้โครงสร้างทางเคมีเปลี่ยนแปลงเป็นสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอนได้รวดเร็วมากขึ้น ซึ่งการไพโรไลซิสสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งกำเนิดไอในเครื่องปฏิกรณ์ [8] และตำแหน่งไอลผ่านในกรองไอร้อน [9] โดยมีรายงานว่า ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นเมื่อไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติ เช่น ดินขาวเคโอลิน [9, 29–31] โดโลไมต์ [8, 9, 32–34] และหินภูเขาไฟ [35, 36] แต่ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิดนี้เมื่อนำไปไพโรไลซิสซีลี้อยในตำแหน่งที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อปริมาณและสมบัติของน้ำมันชีวภาพอย่างไร นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลที่สำคัญ คือ อุณหภูมิไพโรไลซิส [16] อุณหภูมิกรองไอร้อน [3] Weight Hourly Space Velocity (WHSV) ของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการป้อนชีวมวล [37] ชนิดของชุดควบแน่น [9] และอัตราการป้อนชีวมวล [38] หากต้องการศึกษาชนิดและตำแหน่งติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาต้องกำหนดปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไพโรไลซิสแบบเร็วของซีลี้อยด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน โดโลไมต์ และหินภูเขาไฟ ภายใต้เงื่อนไขการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิกรองไอร้อน 500 องศาเซลเซียส Weight Hourly Space Velocity (WHSV) ของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 2 ที่อัตราการป้อนซีลี้อย 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ชุดควบแน่น 3 ชุด คือ ชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็น ชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ และชุดควบแน่นน้ำแข็งผสมเกลือ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาถูกติดตั้งในเครื่องปฏิกรณ์และกรองไอร้อนเพื่อศึกษาชนิดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพ จากนั้นน้ำมันชีวภาพถูกนำไปวิเคราะห์ค่าความร้อน ความหนาแน่น และความหนืด ต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุดิบ

วัตถุดิบสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ซีเมนต์จากโรงเลื่อยของพื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยวัตถุดิบนี้ถูกนำมาคัดให้มีขนาดอนุภาค 0.6–3 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นให้ต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก [1] หลังอบเสร็จซีเมนต์ถูกเก็บไว้ในภาชนะมิดชิดเพื่อป้องกันการดูดความชื้นก่อนการทดลอง ซึ่งสมบัติของซีเมนต์วิเคราะห์ตามมาตรฐานดังนี้

- 1) ปริมาณความชื้นวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 871–82
- 2) สารระเหยเกิดจากการระเหยตัวของสารที่ควมแน่นได้และไม่ได้ในชีวมวล ซึ่งวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 872–82
- 3) เถ้า คือ สารอนินทรีย์ในชีวมวล วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 1755–01
- 4) คาร์บอนคงที่ จะทราบได้หลังจากรู้ปริมาณของความชื้น สารระเหย และเถ้า เพราะปริมาณคาร์บอนคงที่คำนวณจากน้ำหนักของชีวมวลตัวอย่างเริ่มต้นลบด้วยปริมาณของความชื้น สารระเหย และเถ้า ตามลำดับ
- 5) ความหนาแน่นรวมวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E873
- 6) ค่าความร้อนสูงวิเคราะห์ด้วยวิธีบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D240 โดยเครื่อง S.M.D. Torino บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ รุ่น Art.2060/2070

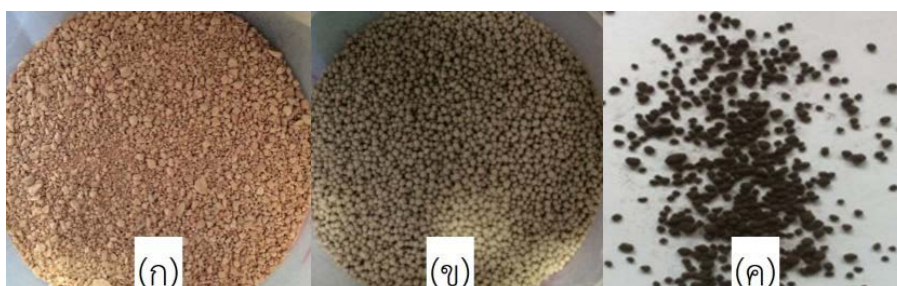
ผลวิเคราะห์สมบัติของซีเมนต์ฐานเปียก พบว่า มีความชื้นร้อยละ 7.6 ± 0.2 โดยน้ำหนัก สารระเหยร้อยละ 75.1 ± 0.4 โดยน้ำหนัก เถ้าร้อยละ 6.5 ± 0.1 โดยน้ำหนัก คาร์บอนคงที่ร้อยละ 10.8 ± 0.2 โดยน้ำหนัก ความหนาแน่นรวม 375.4 ± 0.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าความร้อนสูง 19.8 ± 0.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม



รูปที่ 1 ซีเมนต์ที่ผ่านการคัดขนาด

2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ ดินขาวเคโอสิน โดโลไมต์ และหินภูเขาไฟ ผ่านการเผาในเตาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง เพื่อกระตุ้นให้เกิดรูพรุน [9] จากนั้นคัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.5–3 มิลลิเมตร แล้วนำไปเก็บในภาชนะมิดชิดป้องกันการดูดซับความชื้นก่อนการทดลอง



รูปที่ 2 ตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ดินขาวเคโอสิน (ข) โดโลไมต์ (ค) หินภูเขาไฟ

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์ Automatic Specific Surface Area/Pore Size Distribution Measurement รุ่น Belsorp-mini โดยวิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET) ซึ่งใช้หลักการกำหนดจุดของพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนเพื่อดูดซับไนโตรเจน จากนั้นไนโตรเจนจะถูกกำจัดออกจากพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนที่กำหนดด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะความดันไออิ่มตัวประมาณ 99 กิโลปาสคาล เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดข้อมูลที่ได้จากการกำหนดจุดของพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำไปคำนวณและประมวลผลด้วย Desorption Data Analysis Software–Ver 6.1.0.4 ต่อไป โดยผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

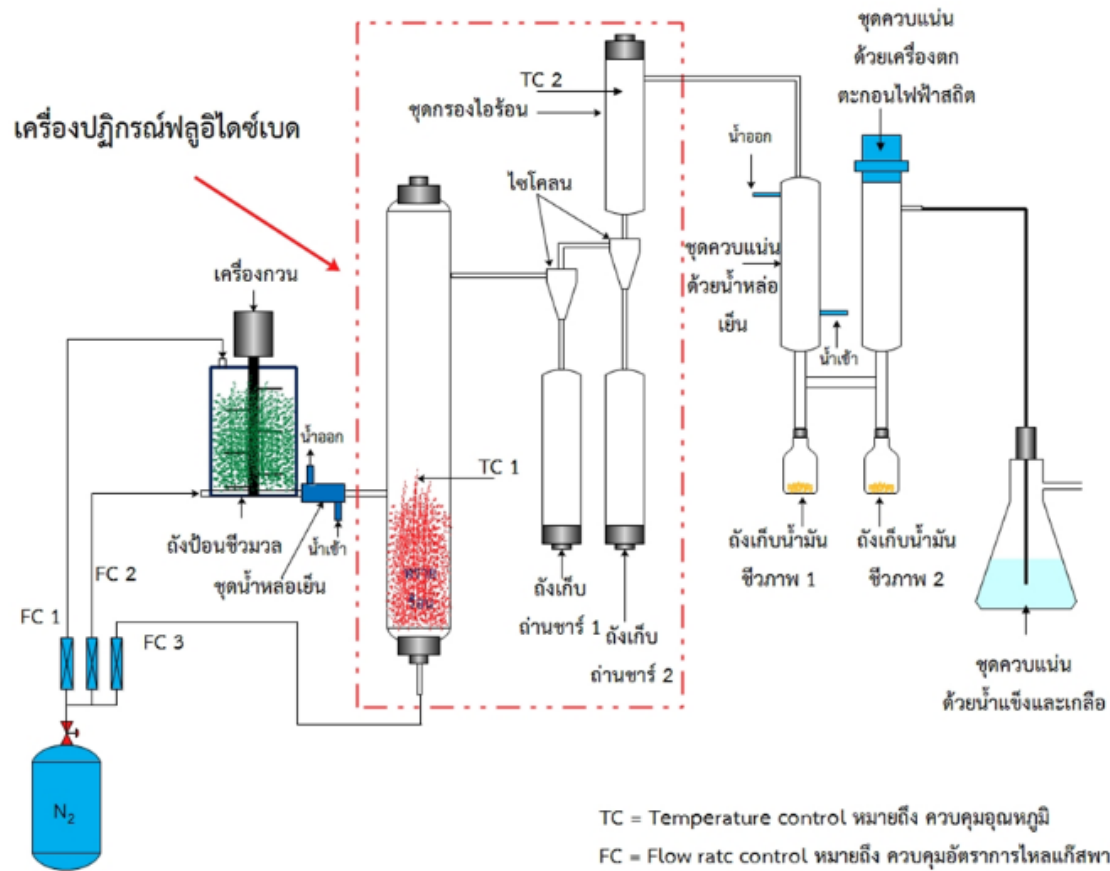
รายการ	ตัวเร่งปฏิกิริยา		
	ดินขาวเคโอลิน	โดโลไมต์	หินภูเขาไฟ
ความหนาแน่นรวม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	687	1,128	975
ความหนาแน่นอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1,074	1,728	1,537
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	32.6	13.2	30.2
ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)	13.7	8.1	10.7
ปริมาตรรูพรุนรวม (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.18	0.11	0.16

2.3 การไฟโรไลซิสแบบเร็วของซีลี้อยด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

เริ่มต้นบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์และกรองไอร้อนเพื่อให้ได้ Weight Hourly Space Velocity (WHSV) ของน้ำหนักรตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 2 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิดมีความหนาแน่นที่มากกว่าซีลี้อย จึงพิจารณาปฏิกิริยาไฟโรไลซิสที่ทำต่อซีลี้อย 1 กิโลกรัม ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ให้เท่ากับทุกการทดลอง ถึงป้อนชีวมวลในรูปที่ 3 บรรจุซีลี้อย 1 กิโลกรัม ชุตควบคุมแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นควบคุมอุณหภูมิน้ำประมาณ 30 องศาเซลเซียส ชุตควบคุมแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ใช้ไฟกระแสตรงที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และชุตควบคุมแน่นน้ำแข็งและเกลือมีอุณหภูมิประมาณ -15 องศาเซลเซียส จากนั้นตรวจสอบอุปกรณ์ทุกส่วนให้แน่ใจว่าพร้อมสำหรับการทดลอง

เริ่มการทดลองด้วยการให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์และกรองไอร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยขดลวดความร้อนที่ควบคุมการทำงานโดยชุดแม็กเนติกส์ไฟฟ้าและเทอร์โมคัปเปิ้ล ปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (FC 3) ที่ 15 ลิตรต่อนาที เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับความร้อนจนอุณหภูมิไฟโรไลซิสและกรองไอร้อน (TC 1 และ TC 2) ได้ 500 องศาเซลเซียส ตามรูปที่ 3 ได้ตามค่าที่กำหนดจึงเปิดการทำงานของปั้มน้ำหล่อเย็นชุดป้อนชีวมวล ชุตควบคุมแน่นด้วยน้ำหล่อเย็น และเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ จากนั้นป้อนชีวมวลด้วยการเปิดเครื่องกวนและปรับอัตราการไหล (FC 1 และ FC 2) ตำแหน่งละ 2.5 ลิตรต่อนาที เพื่อป้อนซีลี้อยจากถังผ่านท่อลำเลียงเข้าไปภายในของเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับทำปฏิกิริยากับตัวเร่งจนเกิดการสลายตัวทางโครงสร้างเคมีกลายเป็นไอผสมกับของแข็งที่ไม่สามารถสลายตัวได้ไหลขึ้นไปด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหลของแก๊สพาผ่านไปยังไซโคลอนทั้งสองตัว เพื่อแยกของแข็งหรือถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางเคมีความร้อนออกจากไอ จากนั้นไอนี้ยังคงมีของแข็งขนาดเล็กผสมอยู่จะถูกส่งผ่านไปยังชุดกรองไอร้อนเพื่อเร่งปฏิกิริยาเป็นครั้งที่สอง ไอนี้จึงถูกส่งต่อไปยังชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นของถังเก็บน้ำมันชีวภาพ 1 (น้ำมันชีวภาพหนัก) และชุตควบคุมแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ของถังเก็บน้ำมันชีวภาพ 2 (น้ำมันชีวภาพหนัก) และชุตควบคุมแน่นน้ำแข็งผสมเกลือ

(น้ำมันชีวภาพเบา) ซึ่งโอไมด์สัมผัสโดยตรงกับสารช่วยควบแน่นแต่สัมผัสกับหลอดแก้วที่แช่ในน้ำแข็งผสมเกลือ โดยหน่วยไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเล็ยแสดงในรูปที่ 4 ทุกการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 3 ไดอะแกรมหน่วยไพโรไลซิส



รูปที่ 4 หน่วยไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเล็ย

2.4 สมดุลมวล

สมดุลมวลด้วยการชั่งน้ำหนักของอุปกรณ์ทั้งหมดที่อยู่ในเส้นทางการเดินของไฮโดรไลซิสด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล Comparator XPR5004SC ค่าอ่านความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม พิกัดน้ำหนักสูงสุด 5.1 กิโลกรัม เพื่อบำรุงปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยปริมาณน้ำมันชีวภาพได้จากน้ำหนักของชุดควบแน่นทั้งสามที่เพิ่มขึ้น ปริมาณเอทานอลได้จากน้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์ กรองไอร้อนและไซโคลนที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณแก๊สคำนวณจาก 100-ปริมาณน้ำมันชีวภาพ-ปริมาณเอทานอล

2.5 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพที่นำมาวิเคราะห์ คือ น้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็น และน้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ ขณะที่น้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งผสมเกลือมีการทดสอบเบื้องต้น พบว่า ไม่สามารถจุดติดไฟเพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนได้ งานวิจัยนี้จึงไม่นำน้ำมันส่วนดังกล่าวมาวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง โดยน้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นและเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์หลังการทดลองถูกจัดเก็บไว้ในตู้แช่เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติ และการวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวภาพทุกครั้งต้องเขย่าขวดเก็บน้ำมันก่อนวิเคราะห์ตามมาตรฐานที่กำหนดดังนี้

2.5.1 ค่าความร้อนสูง (High heating value)

วิเคราะห์ด้วยวิธีบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D240 D4809 ด้วยเครื่อง S.M.D. Torino บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ รุ่น Art.2060/2070 ค่าอ่านความละเอียด ± 1 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เริ่มจากชั่งน้ำหนักของน้ำมันชีวภาพตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยเผาไหม้แล้ววางลงในถ้วยบอมบ์พร้อมบรรจุออกซิเจน จากนั้นประกอบถ้วยบอมบ์เข้ากับเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์แล้วจุดระเบิดน้ำมันชีวภาพตัวอย่างด้วยเส้นลวดไฟฟ้า หลังการเผาไหม้จะเกิดความร้อนขึ้นภายในถ้วยบอมบ์และถ่ายเทความร้อนนี้ไปยังน้ำ 2000 มิลลิลิตร ที่ถ้วยบอมบ์แช่อยู่ เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการเผาไหม้สารมาตรฐานจะทราบค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ

2.5.2 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของน้ำมันชีวภาพวิเคราะห์โดยชั่งน้ำหนักน้ำมันชีวภาพบนเครื่องชั่งดิจิทัล Mettler Toledo AL104 ค่าอ่านความละเอียด ± 0.0001 กรัม พิกัดน้ำหนักสูงสุด 110 กรัม เทียบกับปริมาตรของปิเกตอร์ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D4052 ซึ่งปิเกตอร์ที่ใช้งานวิจัยครั้งนี้มีปริมาตร 10 มิลลิลิตร เริ่มต้นการวิเคราะห์ด้วยการเทน้ำมันชีวภาพลงในปิเกตอร์ 5 มิลลิลิตร จากนั้นอ่านน้ำหนักเปรียบเทียบกับปริมาตรปิเกตอร์จะทราบความหนาแน่นของน้ำมันชีวภาพ

2.5.3 ความหนืด (Viscosity)

โมเลกุลสารในน้ำมันชีวภาพมีผลต่อความหนืดของน้ำมันชีวภาพ ซึ่งความหนืดของน้ำมันชีวภาพสามารถวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D445 ด้วยหลอดวัดความหนืด Cannon-Fenske opaque viscometer เบอร์ 350 ค่าความแม่นยำร้อยละ ± 0.3 โดยเทน้ำมันชีวภาพ 15 มิลลิลิตร ลงในหลอดวัดความหนืดแล้วจับเวลาที่น้ำมันชีวภาพไหลในหลอดซึ่งแช่ในน้ำอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเวลาที่ได้ไปคูณกับแฟคเตอร์ของหลอด คือ 0.344 เซนติสโตกส์ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบกับของเหลวมาตรฐาน

3. ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

รูปที่ 5 แสดงน้ำมันชีวภาพทั้ง 3 ส่วน ที่ได้จากชุดควบแน่นที่แตกต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และระยะเวลาทดลอง คือ 1 ชั่วโมง น้ำมันชีวภาพ (ก) และ (ข) คือ น้ำมันชีวภาพหนักเนื่องจากมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ซึ่งลักษณะทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพนี้เป็นสีน้ำตาลเข้มคล้ายน้ำมันชีวภาพจากงานวิจัยที่ผ่านมา [8, 9, 16] ขณะที่น้ำมันชีวภาพ (ค) คือ น้ำมันชีวภาพเบาเนื่องจากมีความหนาแน่นเท่ากับน้ำและมีสีส้มคล้ายน้ำมันคั่ว [22, 26] และไม่สามารถจุดติดไฟได้



รูปที่ 5 น้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่น (ก) น้ำหล่อเย็น (ข) เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ (ค) น้ำแข็งผสมเกลือ

3.1 ผลชนิดและตำแหน่งติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลิตภัณฑ์

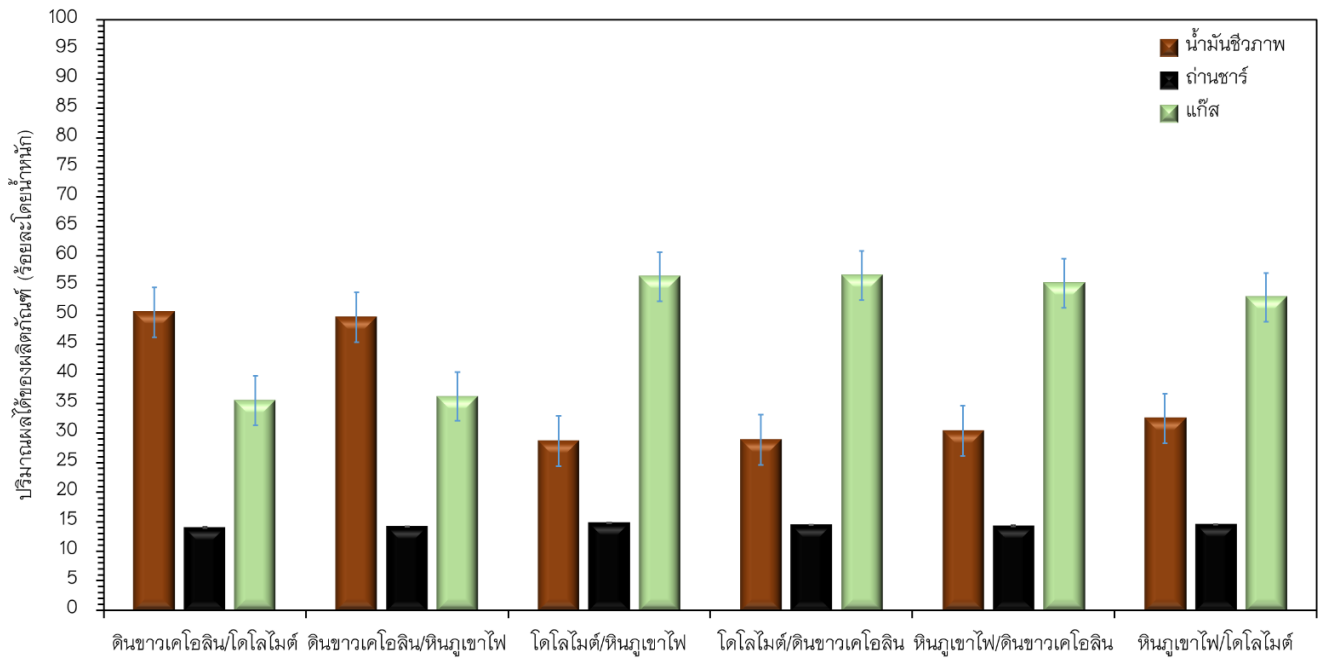
การไพโรไลซิสซึ่งเสียดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ ดินขาวเคโอลิน โดโลไมต์ และหินภูเขาไฟ มีการทดลองจำนวน 6 การทดลอง ดังนี้ การทดลองแรกติดตั้งดินขาวเคโอลินที่เครื่องปฏิกรณ์และโดโลไมต์ที่กรองไอร้อน การทดลองสองติดตั้งดินขาวเคโอลินที่เครื่องปฏิกรณ์และหินภูเขาไฟที่กรองไอร้อน การทดลองสามติดตั้งโดโลไมต์ที่เครื่องปฏิกรณ์และหินภูเขาไฟที่กรองไอร้อน การทดลองสี่ติดตั้งโดโลไมต์ที่เครื่องปฏิกรณ์และดินขาวเคโอลินที่กรองไอร้อน การทดลองห้าติดตั้งหินภูเขาไฟที่เครื่องปฏิกรณ์และดินขาวเคโอลินที่กรองไอร้อน การทดลองหกติดตั้งหินภูเขาไฟที่เครื่องปฏิกรณ์และโดโลไมต์ที่กรองไอร้อน โดยแต่ละการทดลองทำสามซ้ำ

ผลการทดลองในรูปที่ 6 พบว่า การติดตั้งดินขาวเคโอลินที่เครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 50.5 โดยน้ำหนัก ขณะที่การติดตั้งโดโลไมต์ที่เครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณน้ำมันชีวภาพต่ำสุดร้อยละ 28.7 โดยน้ำหนัก นั่นเป็นเพราะว่าตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเร่งการแตกตัวของไอน้ำในช่วงที่สอง [26] กลายเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ซึ่งรูปที่ 6 จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ผลิตแก๊สได้สูงสุดร้อยละ 56.7 โดยน้ำหนัก สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาหินภูเขาไฟเมื่อติดตั้งในเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณน้ำมันชีวภาพร้อยละ 32.5 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นลดลงเพียงเล็กน้อย

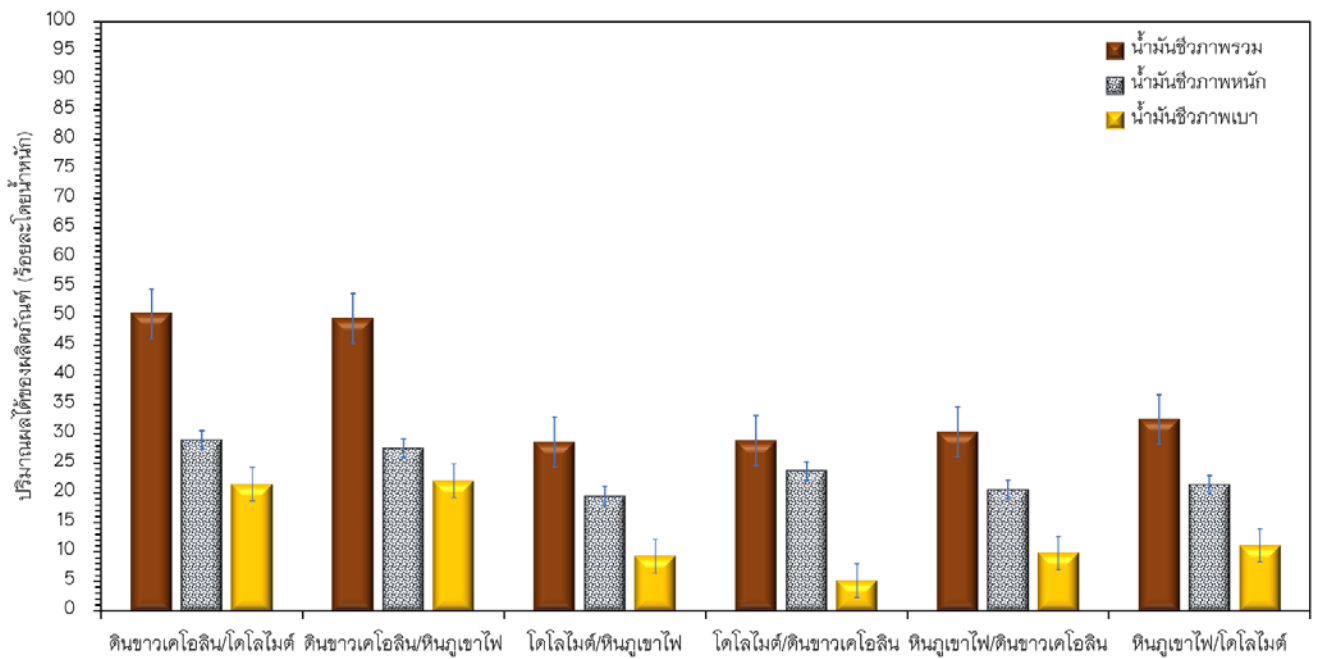
ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ลดลงแล้วมีปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาณรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา [9] เพราะว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์มีพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาณรูพรุนที่เล็ก เมื่อไพโรไลซิสซึ่งเสียดจึงทำให้ความจุความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยานี้ไม่มากพอที่จะทำให้ซึ่งเสียดสลายตัวได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นจากตัวเร่งปฏิกิริยานี้จึงเป็นไอที่ไม่สามารถควบแน่นได้ เนื่องจากสารอินทรีย์ที่อยู่ในชีวมวลไม่สามารถสลายตัวได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยานี้กลายเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ในปริมาณสูงสุด

เมื่อพิจารณาสัดส่วนน้ำมันชีวภาพในรูปที่ 7 จะเห็นว่าน้ำมันชีวภาพหนักเป็นผลิตภัณฑ์หลักของน้ำมันชีวภาพรวม โดยน้ำมันชีวภาพหนักได้มาจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นและชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ ขณะที่น้ำมันชีวภาพเบาได้จากชุดควบแน่นน้ำแข็งผสมเกลือ พบว่า การติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินที่เครื่องปฏิกรณ์ช่วยผลิตน้ำมันชีวภาพหนักสูงสุดร้อยละ 29 โดยน้ำหนัก และน้ำมันชีวภาพเบาสูงสุดร้อยละ 22 โดยน้ำหนัก ขณะที่การไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และหินภูเขาไฟส่งผลให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพหนักและน้ำมันชีวภาพเบาลดลงอย่างชัดเจน นั่นเป็นเพราะว่าประสิทธิภาพในการไพโรไลซิสซึ่งเสียดของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และหินภูเขาไฟไม่มากพอสำหรับการสลายตัวของสารอินทรีย์ในชีวมวล ไอที่เกิดขึ้นจึงไม่สามารถควบแน่นได้ด้วยชุดควบแน่นที่ติดตั้งไว้

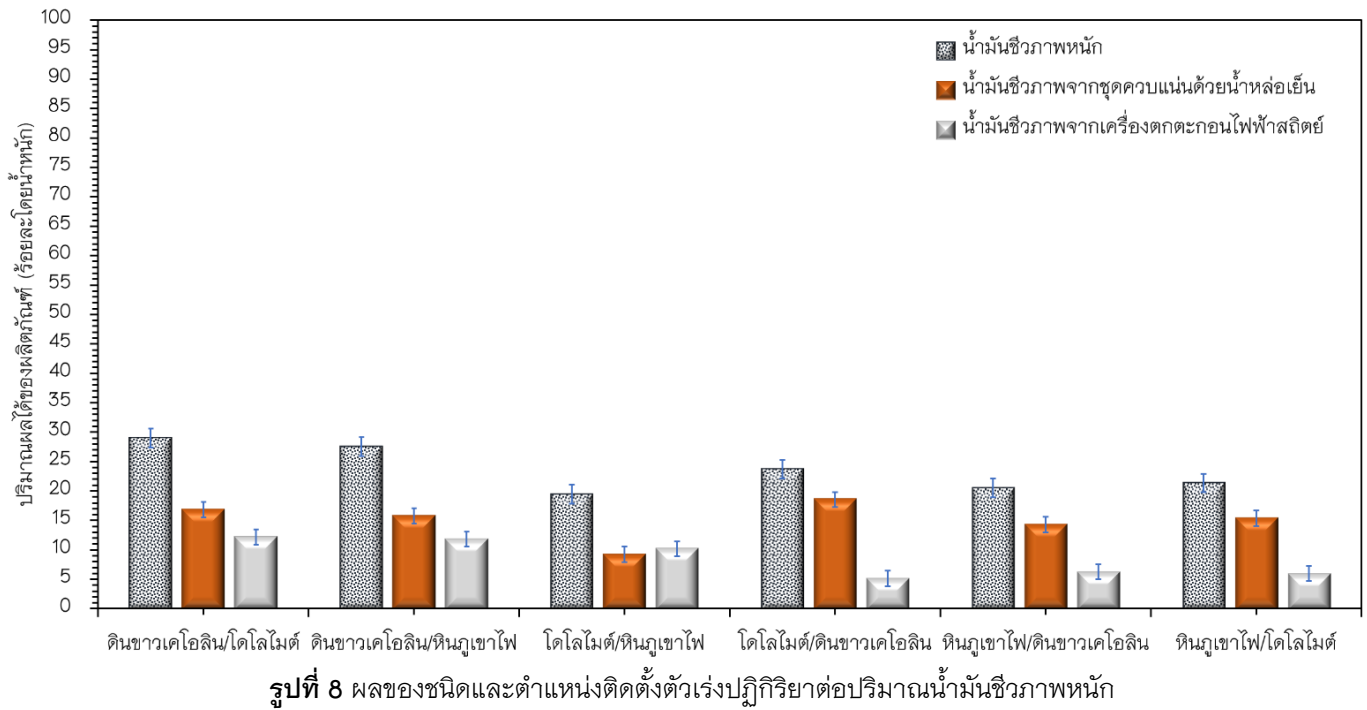
รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่า น้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นเป็นผลิตภัณฑ์หลักของน้ำมันชีวภาพหนัก โดยการติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่เครื่องปฏิกรณ์และดินขาวเคโอลินที่กรองไอร้อนมีปริมาณน้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นสูงสุดร้อยละ 18.6 โดยน้ำหนัก ขณะที่การติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่เครื่องปฏิกรณ์และหินภูเขาไฟที่กรองไอร้อนมีปริมาณน้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นต่ำสุดร้อยละ 9.3 โดยน้ำหนัก หากพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิด พบว่า ดินขาวเคโอลินช่วยเพิ่มปริมาณน้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นได้สูงสุด ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และหินภูเขาไฟทำให้น้ำมันชีวภาพดังกล่าวมีปริมาณลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดตั้งโดโลไมต์ที่เครื่องปฏิกรณ์และหินภูเขาไฟที่กรองไอร้อนสัดส่วนของน้ำมันชีวภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 6 ผลของชนิดและตำแหน่งติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก

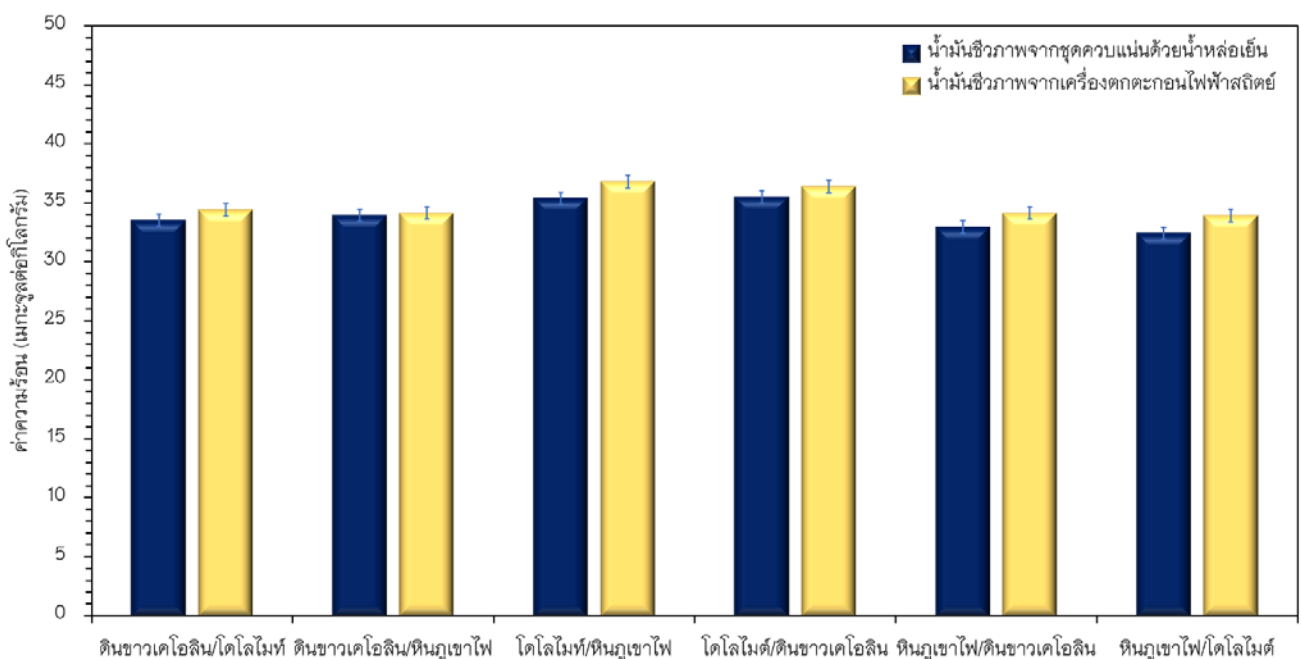


รูปที่ 7 ผลของชนิดและตำแหน่งติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณน้ำมันชีวภาพ



3.2 ผลของชนิดและตำแหน่งติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติของน้ำมันชีวภาพ

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า น้ำมันชีวภาพหนักจากชุดควบคุมแน่นด้วยเครื่องตักตะกอนไฟฟ้าสถิตย์มีค่าความร้อนสูงกว่าน้ำมันชีวภาพหนักจากชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นเล็กน้อย นั่นเป็นเพราะว่าไอไพโรไลซิสที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีองค์ประกอบทางเคมีของออกซิเจนผสมอยู่ถูกควบคุมแน่นก่อนที่ชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำหล่อเย็น [8, 9] ส่งผลให้น้ำมันชีวภาพที่ควบคุมแน่นด้วยเครื่องตักตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ปริมาณออกซิเจนน้อยจึงมีค่าความร้อนสูง เมื่อพิจารณารูปที่ 9 จึงอธิบายได้ว่าโดโลไมต์ช่วยปรับปรุงค่าความร้อนได้สูงสุด 36.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันดีเซลที่มีค่าความร้อนประมาณ 43 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันชีวภาพที่ได้จากงานวิจัยนี้ก็มีค่าความร้อนใกล้เคียงกับน้ำมันเตา ดังนั้น หากพิจารณาสมบัติทางความร้อนแล้วสามารถนำน้ำมันชีวภาพนี้ไปใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้

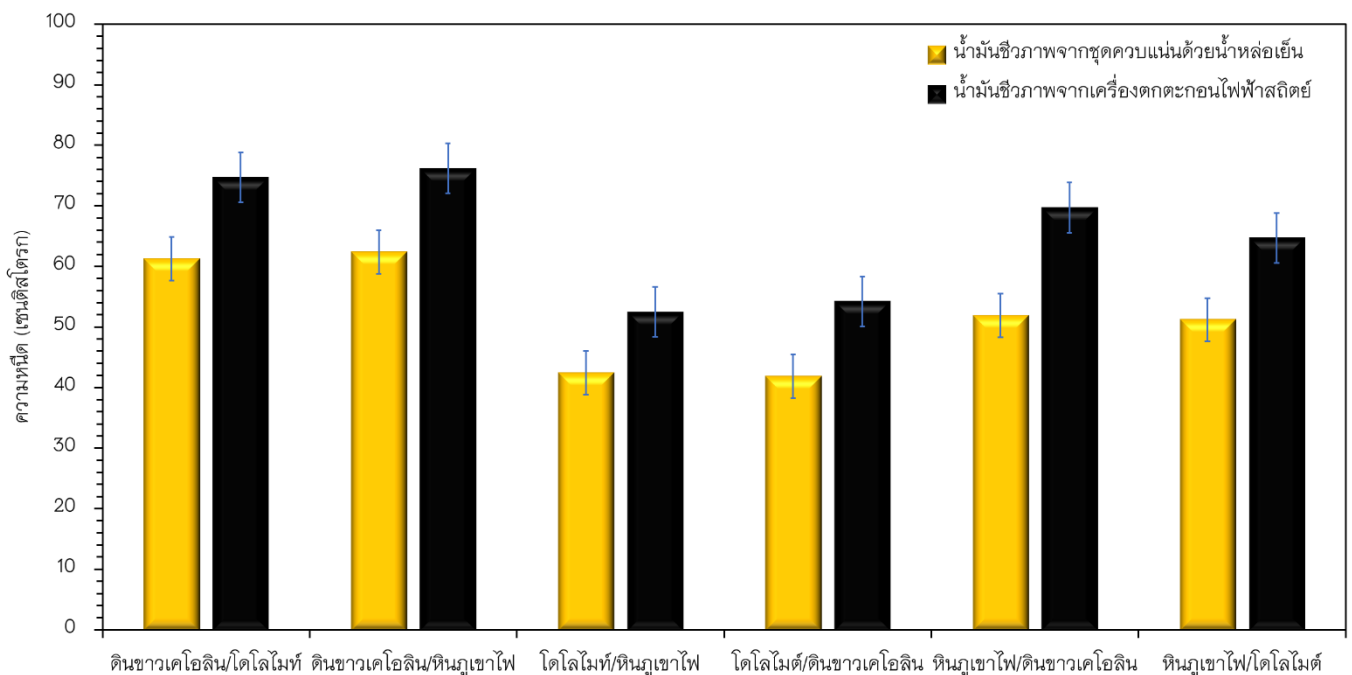


รูปที่ 9 ผลของชนิดและตำแหน่งติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ

รูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ช่วยให้ความหนืดลดลงอย่างชัดเจน นั่นเป็นเพราะว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้เข้าไปช่วยเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของไฮโดรไลซิสที่มีพันธะยาวให้มีขนาดสั้นลง [32] ส่งผลให้น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานี้ไหลได้สะดวกขึ้น ความหนืดของน้ำมันชีวภาพในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์สามารถปรับปรุงความหนืดได้ดีที่สุด เพราะฉะนั้นน้ำมันชีวภาพที่ได้จากชุดควบแน่นทั้งสองนี้มีความหนืดต่ำสุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นมีความหนืดต่ำสุด 41.9 เซนติสโตกรก

รูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่า น้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นเล็กน้อย โดยการติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินที่เครื่องปฏิกรณ์ส่งผลให้น้ำมันชีวภาพมีความหนาแน่นสูงสุด 1.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ขณะที่การติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์และหินภูเขาไฟที่เครื่องปฏิกรณ์ส่งผลให้ความหนาแน่นของน้ำมันชีวภาพเปลี่ยนแปลงในช่วง 1.15–1.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร จึงอธิบายได้ว่าโคโลไมต์และหินภูเขาไฟช่วยผลิตน้ำมันชีวภาพได้ค่อนข้างเบาเก๋าดินขาวเคโอลิน

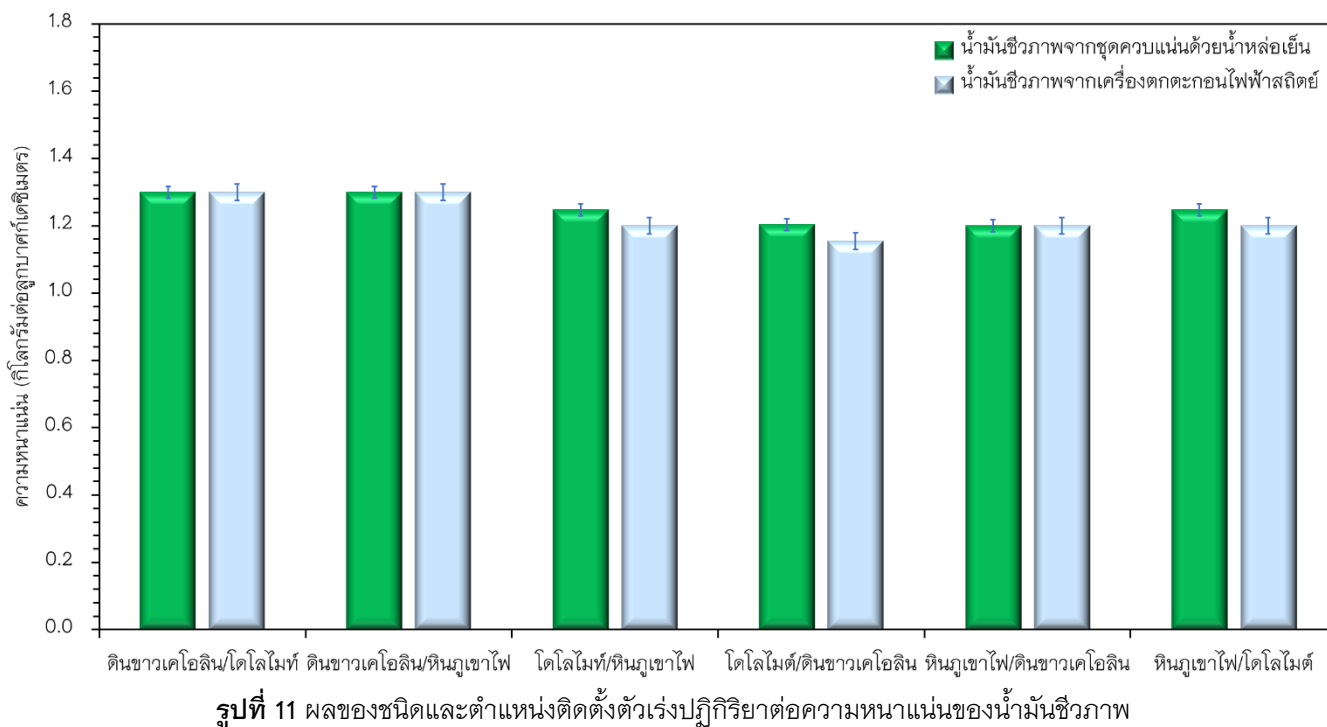
หากพิจารณาสมบัติทั้ง 3 ด้านจึงสรุปได้ว่า การติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ที่ตำแหน่งเครื่องปฏิกรณ์ช่วยปรับปรุงสมบัติของน้ำมันชีวภาพได้ดีที่สุด โดยน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้มีสมบัติที่ใกล้เคียงน้ำมันเตาจึงอาจนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาได้ในอนาคต



รูปที่ 10 ผลของชนิดและตำแหน่งติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความหนืดของน้ำมันชีวภาพ

4. สรุปผลการทดลอง

การไฮโดรไลซิสแบบเร็วของซีลี้อยู่ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน โคโลไมต์ และหินภูเขาไฟ พบว่า ดินขาวเคโอลินช่วยผลิตน้ำมันชีวภาพได้ดีที่สุด ขณะที่โคโลไมต์ช่วยปรับปรุงสมบัติของน้ำมันชีวภาพได้ดีที่สุด โดยการติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินที่ตำแหน่งเครื่องปฏิกรณ์และโคโลไมต์ที่กรองไอร้อนมีปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 50.5 โดยน้ำหนัก สำหรับการติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ที่ตำแหน่งเครื่องปฏิกรณ์และหินภูเขาไฟที่ตำแหน่งกรองไอร้อนน้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนสูงสุด 36.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และมีความหนืดต่ำสุด 42.4 เซนติสโตกรก ซึ่งน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้นี้เหมาะสำหรับนำไปใช้ทดแทนน้ำมันเตาเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกต่อไป



5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่สนับสนุนทุนวิจัยรหัสขอเสนอโครงการ 59845 สัญญาเลขที่ 005/2562 รหัสขอเสนอโครงการ 14912 สัญญาเลขที่ กท 012/2563 และรหัสขอเสนอโครงการ 4285363 สัญญาเลขที่ FRB038/2566

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy. 2012;38(0):68–94.
- [2] Duangupama K, Pattiya A. Properties of Bio-oil and Char Obtained from Fast Pyrolysis of Sugarcane Leaves. Science and technology journal mahasarakham university. 2013;34(4):504–9.
- [3] Pattiya A, Suttibak S. Fast pyrolysis of sugarcane residues in a fluidised bed reactor with a hot vapour filter. Journal of the Energy Institute. 2017;90(1):110–9.
- [4] Suttibak S. Influence of reaction temperature on yields of bio-oil from fast pyrolysis of sugarcane residues. Engineering and Applied Science Research. 2017;44(3):142–7.
- [5] Duangupama K, Pattiya A. Fast pyrolysis of Leucaena leucocephala in a circulating fluidised bed reactor. European Biomass Conference and Exhibition. 2015;23rd 1206–11.
- [6] Duangupama K, Rueangsak K, Kraisoda P, Turakan C, Phinnarat C, Simmee K, et al. Catalytic Fast Pyrolysis of Leucaena leucocephala in Fluidised-bed Reactor with In-situ and Ex-situ Vapors Upgrading. TSME International Conference on Mechanical Engineering. 2016;7th:170.
- [7] Duangupama K, Rueangsak K, kraisoda P, Turakan C. The effect of catalyst on the heating value and energy yield from the fast pyrolysis of leucaena leucocephala. Udon thani rajabhat university journal of sciences and technology. 2017;5(1):97–111.
- [8] Duangupama K, Pannuchoenwong N, Echaroj S, Pham LKH, Samart C, Rattanadecho P. Integrated catalytic pyrolysis and catalytic upgrading of Leucaena leucocephala over natural catalysts. Journal of the Energy Institute. 2023;106:101155.

- [9] Duanguppama K, Pannuchaoenwong N, Echaroj S, Turakarn C, Chaiphet K, Rattanadecho P. Processing of *Leucaena Leucocephala* for renewable energy with catalytic fast pyrolysis. *Energy Reports*. 2022;8:466–79.
- [10] Pattiya A, Titiloye JO, Bridgwater AV. Fast pyrolysis of cassava rhizome in the presence of catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2008;81(1):72–9.
- [11] Pattiya A, Titiloye JO, Bridgwater AV. Catalytic effect of char and ash in fast pyrolysis of cassava rhizome. 15th European Biomass Conference & Exhibition. 2007;15:1374–7.
- [12] Pattiya A, Titiloye JO, Bridgwater AV. Catalytic Fast Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Micro-Reactor. *Asian J Energy Environ*. 2007;8(3 & 4):211–28.
- [13] Pattiya A, Titiloye JO, Bridgwater AV. Catalytic Pyrolysis of Cassava Rhizome. The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)”. 2006;2:1–6.
- [14] Pattiya A, Titiloye JO, Bridgwater AV. Evaluation of catalytic pyrolysis of cassava rhizome by principal component analysis. *Fuel*. 2010;89(1):244–53.
- [15] Suttibak S, Sriprateep K, Pattiya A. Production of Bio-oil via Fast Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Fluidised-Bed Reactor. *Energy Procedia*. 2012;14(0):668–73.
- [16] Rueangsan K, Heman A, Kraisoda P, Tasarod H, Duanguppama K, Morris J. Bio-oil production via fast pyrolysis of cassava residues combined with ethanol and volcanic rock in a free-fall reactor. *Cogent Engineering*. 2022;10.
- [17] Pattiya A, Titiloye JO, Bridgwater AV. Fast Pyrolysis of Agricultural Residues from Cassava Plantation for Bio-oil Production. The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)”. 2006;2:1–5.
- [18] Pattiya A. Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. *Bioresource Technology*. 2011;102(2):1959–67.
- [19] Pattiya A, Sukkasi S, Goodwin V. Fast pyrolysis of sugarcane and cassava residues in a free-fall reactor. *Energy*. 2012;44(1):1067–77.
- [20] Pattiya A, Suttibak S. Production of bio-oil via fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations in a fluidised-bed reactor with a hot vapour filtration unit. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2012;95:227–35.
- [21] Rueangsan K, Heman A, Kraisoda P, Tasarod H, Duanguppama K, Trisupakitti S, et al. Bio-oil production via fast pyrolysis of cassava residues combined with ethanol and volcanic rock in a free-fall reactor. *Cogent Engineering*. 2023;10(1):2156054.
- [22] Pidtasang B, Sukkasi S, Pattiya A. Effect of in-situ addition of alcohol on yields and properties of bio-oil derived from fast pyrolysis of eucalyptus bark. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016;120:82–93.
- [23] Jung S-H, Kang BS, Kim J-S. Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2008;82(2):240–7.
- [24] Yang E, Jun M, Haijun H, Wenfu C. Chemical composition and potential bioactivity of volatile from fast pyrolysis of rice husk. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2015;112(0):394–400.
- [25] Suttibak S, Chuntanapum A. Optimization of producer gas production from rice husks and sawdust in a three-stage gasifier. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2021:1–12.
- [26] Duanguppama K, Suwapaet N, Pattiya A. Fast pyrolysis of contaminated sawdust in a circulating fluidised bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016;118:63–74.

- [27] Suttibak S, Sriprateep K, Pattiya A. Production of Bio-oil from Pine Sawdust by Rapid Pyrolysis in a Fluidized-bed Reactor. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2015;37(13):1440–6.
- [28] Turakan C, Chaiphet K, Duanguppama K. *Journal of Engineering and Industrial Technology Kalasin University*. Production of bio-oil by fast pyrolysis of biomass for testing in engines. 2023;1(6):15–27.
- [29] Mante OD, Agblevor FA, McClung R. Fluid catalytic cracking of biomass pyrolysis vapors. *Biomass Conv Bioref*. 2011;1(4):189–201.
- [30] Shadangi KP, Mohanty K. Production and characterization of pyrolytic oil by catalytic pyrolysis of Niger seed. *Fuel*. 2014;126(0):109–15.
- [31] Shadangi KP, Mohanty K. Thermal and catalytic pyrolysis of Karanja seed to produce liquid fuel. *Fuel*. 2014;115(0):434–42.
- [32] Encinar JM, González JF, Martínez G, Román S. Catalytic pyrolysis of exhausted olive oil waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2009;85(1–2):197–203.
- [33] Meesuk S, Cao J–P, Sato K, Ogawa Y, Takarada T. Fast Pyrolysis of Rice Husk in a Fluidized Bed: Effects of the Gas Atmosphere and Catalyst on Bio-oil with a Relatively Low Content of Oxygen. *Energy & Fuels*. 2011;25(9):4113–21.
- [34] Li R, Zhong ZP, Jin BS, Zheng AJ. Application of mineral bed materials during fast pyrolysis of rice husk to improve water-soluble organics production. *Bioresource Technology*. 2012;119(0):324–30.
- [35] Putun E, Uzun BB, Putun AE. Fixed-bed catalytic pyrolysis of cotton-seed cake: effects of pyrolysis temperature, natural zeolite content and sweeping gas flow rate. *Bioresour Technol*. 2006;97(5):701–10.
- [36] Pütün E, Uzun BB, Pütün AE. Production of bio-fuels from cottonseed cake by catalytic pyrolysis under steam atmosphere. *Biomass and Bioenergy*. 2006;30(6):592–8.
- [37] Lim JHK, Gan YY, Ong HC, Lau BF, Chen W–H, Chong CT, et al. Utilization of microalgae for bio-jet fuel production in the aviation sector: Challenges and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;149:111396.
- [38] Paenpong C, Inthidech S, Pattiya A. Effect of filter media size, mass flow rate and filtration stage number in a moving-bed granular filter on the yield and properties of bio-oil from fast pyrolysis of biomass. *Bioresource Technology*. 2013;139:34–42.