

## ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ Effect of Natural Catalysts in Fast Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Free - Fall Reactor

นิกรศิลป์ บุญสมบัติ<sup>1</sup> อติศักดิ์ ปัตติยะ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท <sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150  
Nikornsin Boonsombut<sup>1</sup> Adisak Pattiya<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Student, <sup>2</sup>Assistant Professor, Bio-Energy and Renewable Resources Research Unit, Faculty of  
Engineering Mahasarakham University Khamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150

\*Corresponding author: Email: adisak\_pattiya@yahoo.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส และตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ศึกษาได้แก่ 350 400 และ 500 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตที่ให้ปริมาณผลได้โดยมวลและเชิงพลังงานสูงสุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณผลได้โดยมวลสูงสุดของไบโอออยล์มีค่าเป็นร้อยละ 62 ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณผลได้เชิงพลังงานร้อยละ 46 เมื่อใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส ไบโอออยล์ที่ผลิตจากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีค่าความร้อนสูง 15.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ขณะที่สมบัติอื่น ๆ เช่น ค่าพีเอช ความหนืด และความหนาแน่น ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM D7544-12 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นี้ถูกเลือกมาสำหรับการทดลองไพโรไลซิสชนิดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้อุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาครั้งที่ 500 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่ ซีโอไลด์ธรรมชาติ เพอร์ไลท์ ดินขาวเคโอลิน ตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดทำให้ปริมาณผลได้โดยมวลและเชิงพลังงานของไบโอออยล์มีค่าลดลง สมบัติของไบโอออยล์บางชนิดสามารถถูกปรับปรุงได้ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาทั้งหมด ดินขาวเคโอลินพบว่าเหมาะสมที่สุด การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินให้ปริมาณผลได้โดยมวลของไบโอออยล์ร้อยละ 46 และเชิงพลังงานร้อยละ 20 นอกจากนี้ ค่าความร้อนของไบโอออยล์ที่ได้จากการใช้ดินขาวเคโอลินเร่งปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 19.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

**คำสำคัญ:** ชีวมวล ไบโอออยล์ ไพโรไลซิสแบบเร็ว ตัวเร่งปฏิกิริยา เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ

### ABSTRACT

Fast pyrolysis of cassava rhizome was carried out in a free-fall reactor to investigate the effect of pyrolysis temperature and natural catalysts on the pyrolysis products. The pyrolysis temperatures

of 350, 400 and 500°C were tested for non-catalytic experiments in order to determine optimum temperature for maximising the bio-oil mass and energy yields. The results showed that the maximum bio-oil mass yield of 62wt% with the corresponding energy yield of 46% was achieved at 400°C. The non-catalytic bio-oils produced had a higher heating value (HHV) of 15.8 MJ/kg. Other properties of the non-catalytic bio-oil such as pH, viscosity and density were found to meet the standard requirements of the ASTM D7544-12. The pyrolysis temperature of 400°C was selected for the catalytic pyrolysis experiments applying a constant catalyst temperature of 500°C. Activated natural zeolite, perlite and kaolin catalysts were tested in the biomass catalytic pyrolysis experiments. Although all catalysts led to bio-oil mass and energy yield reduction, certain bio-oil properties could be improved. Among the catalysts studied, kaolin was found to be the most suitable catalyst. The use of kaolin gave the bio-oil mass yield of 46 wt% and energy yield of 20%. In addition, the HHV of the kaolin-catalysed bio-oil could be increased to 19.5 MJ/kg.

**Keyword:** Biomass, bio-oil, fast pyrolysis, catalyst, free-fall reactor.

## 1. บทนำ

เศษเหลือจากไร่มันสำปะหลังที่ถูกทิ้งโดยเปล่าประโยชน์นั้นก็คือ “เหง้ามันสำปะหลัง” ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างหัวมันกับลำต้น เมื่อถึงฤดูเก็บเกี่ยว ชาวเกษตรกรจะตัดส่วนหัวเพื่อส่งขายให้กับโรงงานแป้งมัน หรือโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ ส่วนของลำต้นจะนำไปเป็นต้นพันธุ์ เหง้ามันสำปะหลังถูกมองข้ามทั้งที่มีคุณประโยชน์ โดยเกษตรกรมักจะปล่อยให้เน่าในไร่ เมื่อเวลาผ่านไปก็จะกลายเป็นปุ๋ยบำรุงดิน แต่เกษตรกรบางคนก็ยังคงเผาทิ้ง หากมีการควบคุมการเผาก็จะเกิดประโยชน์ในด้านพลังงานความร้อน โดยการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อน้ำเพื่อใช้ในการปั่นกังหันผลิตไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า “ไฟฟ้าชีวมวล” และการควบคุมการเผาแบบกระบวนการทางเคมีความร้อน ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานชีวมวล จากของแข็งให้เป็นของเหลวได้ เรียกกระบวนการนี้ว่า “ไพโรไลซิสแบบเร็ว” ซึ่งสามารถใช้ชีวมวลประเภทไม้ พืชน้ำมัน และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร [1-7] เซลลูโลส [8] ของเสี่ยพอลิไธรีน [9] และถ่านหิน [3, 10] เป็นวัตถุดิบได้ โดยกระบวนการนี้ นอกจากจะเหมาะกับชีวมวลที่เป็นของแข็งหลายชนิด ยัง

ช่วยให้ค่าใช้จ่ายในการขนย้ายลดลง หากนำกระบวนการนี้เข้าใกล้แหล่งวัตถุดิบเพื่อเปลี่ยนรูปของพลังงาน

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือกระบวนการย่อยสลายอนุภาคด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วโดยปราศจากออกซิเจน อุณหภูมิการเกิด ปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอสั้น และมีการควบแน่นไอน้ำไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว [11] ซึ่งผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการควบแน่นเป็นที่รู้จักว่า “ไบโอออยล์ (Bio-oil)” ส่วนของแข็งที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาเรียกว่า “ถ่านชาร์ (Char)” และผลิตภัณฑ์อีกอย่างคือ แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non-condensable gas) ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเกิดขึ้นได้ในเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการพัฒนามาจากอดีตจนถึงปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบด (Bubbling fluidised bed reactor) ซึ่งทรายที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อเวลาผ่านไปทรายถูกถ่านชาร์เคลือบที่บริเวณผิว ทำให้ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง [12] เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating fluidised bed reactor) ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถหมุนวนทรายกลับมาเผาไหม้ได้

ทำให้ทรายสะอาดอยู่ตลอดเวลา [12] เครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยหมุน (Rotating cone pyrolyser) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกรวยหมุนด้วยความเร็วสูง ทรายจะล้นออกมาทางขอบด้านบนของกรวยลงสู่ช่องเก็บ ซึ่งจะนำกลับมาวนเข้าเตาใหม่ [12] เครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดละลาย (Ablative pyrolyser) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นปาดใช้กักต่อนุภาคของชีวมวล มีข้อเสียด้านการควบคุมพื้นผิวให้ความร้อน และชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่มีอุณหภูมิสูง การขยายขนาดหน่วยผลิตทำได้ยาก [13] เครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolyser) ซึ่งมีอัตราการให้ความร้อนต่ำ แต่สามารถดึงไอไพโรไลซิสออกได้เร็ว อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ และราคาสูง เนื่องจากการสร้างภาวะสุญญากาศที่ความดันประมาณ 15 กิโลปาสกาล ซึ่งยากต่อการขยายขนาดหน่วยการผลิต [12] เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger reactor) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกวางในแนวนอน ภายในมีสกรูลำเลียงก่อนเริ่มกระบวนการต้องให้ความร้อนกับทรายก่อน [12] และเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ (Free-fall reactor) [14] ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างจากเครื่องปฏิกรณ์แบบอื่น ๆ โดยชีวมวลจะตกตามแรงโน้มถ่วงของโลก ไม่ต้องใช้ทรายในการแลกเปลี่ยนความร้อน อาศัยความยาวของเตาปฏิกรณ์ในการกำหนดเวลาของการสลายตัวของชีวมวล ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในระบบน้อยมากเมื่อเทียบกับแบบอื่น ๆ มีความซับซ้อนน้อย และง่ายต่อการขยายขนาดหน่วยการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระมาใช้สำหรับทำการทดลอง

จากงานวิจัยที่มีการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ โดยมีหลายงานวิจัยเป็นการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ เช่น ชนิดของชีวมวลหรือชนิดของเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้ [1-3, 6, 7, 10] อัตราการให้ความร้อน [1] อุณหภูมิอยู่ในช่วง 400-1,100 องศาเซลเซียส [1-10, 15, 16] ขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.2-1.8 มิลลิเมตร [1, 2, 4-9, 15, 16] ระยะเวลาคงอยู่ของไอไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 0.7-3.5 วินาที [1, 3, 15] อัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง 0.5-5 ลิตรต่อนาที [4, 16] อัตราการป้อนชีวมวล หรือวัตถุดิบของแข็งอยู่ในช่วง 1-2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง [8, 16] และอัตราการทำปฏิกิริยา

ของถ่านชาร์ [1, 2, 10, 17] งานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของไบโอออยล์ให้ดีขึ้นมีหลายวิธี เช่น การเติมแอลกอฮอล์ร้อยละ 2.5-10 [14] การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 [18] โดโลไมท์ [19] ซีโอไลต์ธรรมชาติ [20] ซิงค์ออกไซด์ [21] เคโอลิน [22] โพแทสเซียมคาร์บอเนต [23] และ CoMo [24] พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของไบโอออยล์ [25]

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วช่วยในแง่ของการลดปริมาณออกซิเจนในไบโอออยล์ ซึ่งเป็นผลให้ค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น รวมไปถึงสมบัติต่าง ๆ ของไบโอออยล์ดีขึ้น เมื่อเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [26] ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ หาได้ง่าย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังราคาถูกจึงทำให้สามารถลดต้นทุนในการทำวิจัยได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง เพอร์ไลท์ และดินขาวเคโอลิน ซึ่งจากการศึกษา งานวิจัยพบว่า ยังไม่มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิดมาใช้กับชุดกรองไอร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระโดยใช้ชีวมวลแห้งมาสำปะหลัง และยังไม่มีการเปรียบเทียบปริมาณผลได้และสมบัติต่าง ๆ ของไบโอออยล์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิด จึงไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใดได้ปริมาณผลได้ร้อยละเท่าไร และสมบัติต่าง ๆ ของไบโอออยล์ผ่านมาตรฐาน ASTM D7544-12 หรือไม่ จึงเป็นที่มาของการศึกษาและทำวิจัยในครั้งนี้

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 6 ส่วน ดังนี้

### 2.1. วัตถุดิบชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เหง้ามันสำปะหลังได้จากไร่มันในเขตพื้นที่หมู่บ้านหนองบอน ตำบลนากลาง อำเภอสองเนิน จังหวัดนครราชสีมา ก่อนการทดลองได้มีขั้นตอนการเตรียมชีวมวลโดยนำชีวมวลมาบดละเอียดตากแห้ง และคัดขนาดโดยมีอนุภาค 212-600 ไมโครเมตร

จากนั้นนำชีวมวลที่ได้มาทำการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ซึ่งค่าความร้อนสูง (ฐานแห้ง) ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Art.2060/2070 Bomb calorimeter ดำเนินการตามมาตรฐาน DIN 51900 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของชีวมวล

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ฐานเปียก	ฐานแห้ง
ความชื้น	6.64	-
สารระเหย	76.13	81.54
คาร์บอนคงที่	13.46	14.42
เถ้า	3.77	4.04
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ฐานแห้ง ปราศจากเถ้า	
คาร์บอน (C)	43.16	
ไฮโดรเจน (H)	6.03	
ไนโตรเจน (N)	1.22	
กำมะถัน (S)	0.05	
ออกซิเจน (O)	45.50	
ค่าความร้อนสูง (HHV) (เมกะจูล/กิโลกรัม)	14.48	15.51
ค่าความร้อนต่ำ (LHV) (เมกะจูล/กิโลกรัม)	13.36	14.19

คาร์บอนคงที่ (ฐานแห้งปราศจากเถ้า) = 100 - สารระเหย - เถ้า

ออกซิเจน (O) = 100 - คาร์บอน - ไฮโดรเจน - ไนโตรเจน - กำมะถัน - เถ้า

## 2.2. ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองนี้จำนวน 3 ชนิด คือ ซีโอไซด์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ซึ่งมีลักษณะคล้ายก้อนหินแต่มีรูพรุน สีออกน้ำตาลเข้ม โดยทั่วไปจะพบในตู้เลี้ยงปลาใช้เพื่อประดับตกแต่ง ขนาดที่ใช้ทำการทดลอง

3-5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) ชนิดหนึ่ง โดยก่อนการใช้สำหรับการทดลองทำการกระตุ้นด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง ดินขาวเคโอลิน ซึ่งเป็นดินภูเขาที่ได้จากจังหวัดลำปาง มีลักษณะเบาเมื่อเทียบกับดินเหนียวในปริมาณที่เท่ากัน มีสีเหลือง ขนาดที่ใช้ทำการทดลอง 0.5-1 เซนติเมตร กระตุ้นโดยการเผาที่อุณหภูมิ 732 องศาเซลเซียส ตามคำแนะนำของ [22] โดยระหว่างทำการเผาจะปล่อยไอน้ำผ่านเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเพอร์ไลต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติโดยการเปลี่ยนแปลงของหินภูเขาไฟเป็นซิลิกา ที่มีสีชาวมเทา ขนาดที่ใช้ทำการทดลอง 0.5-1 เซนติเมตร กระตุ้นด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

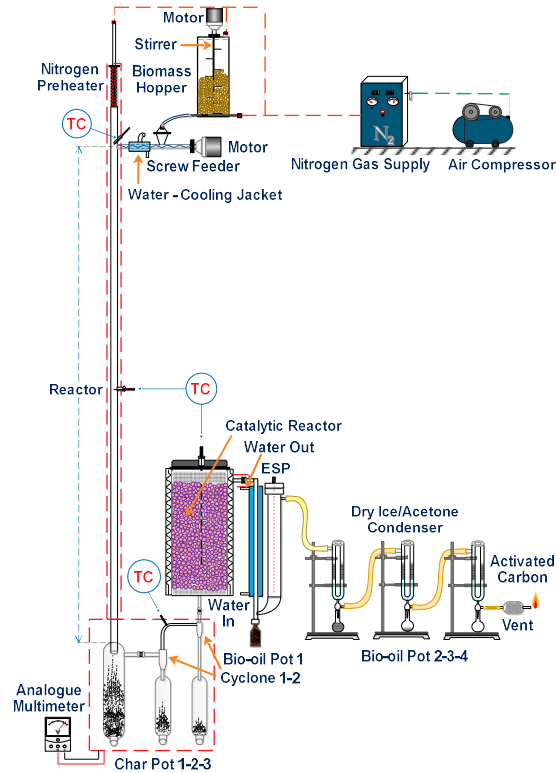
## 2.3. อุปกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเร็ว

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้ ถังป้อนชีวมวลแบบใบกวน เตาปฏิกรณ์โดยมีความสูง 150 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร ถังเก็บถ่านชาร์จำนวน 3 ถัง ชุดไซโคลอนจำนวน 2 ชุด เครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีความสูง 45 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร ชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นโดยใช้อุณหภูมิห้อง ชุดทำให้ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตจำนวน 1 ชุด ชุดเครื่องแก้วที่ควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสซิโตนจำนวน 3 ชุด และชุดกรองดักกลิ่นจำนวน 1 ชุด แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้สามารถนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการหมุนวนกลับมาใช้ใหม่ในระบบเพื่อเพิ่มปริมาณผลได้และสมบัติที่ดีขึ้นของไบโอออยล์ [24] ในทำนองเดียวกันถ่านชาร์ก็สามารถนำกลับมาใช้ได้โดยนำมาเผาเพื่อเพิ่มความร้อนให้กับเตาปฏิกรณ์ [27]

## 2.4. การทำสมดุลมวล

การทำสมดุลมวลทำได้โดยการคำนวณผลต่างก่อนและหลังของน้ำหนักอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง ได้แก่ ถังป้อนชีวมวล เตาปฏิกรณ์ ชุดไซโคลอน ชุดกรองไอร้อน ชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นกับชุดทำให้ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมกับแอสซิโตน และชุด

กรองดักกลิ่น ซึ่งค่าผลต่างของอุณหภูมิต่อจุดจะบ่งบอกถึงผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ของแต่ละส่วน



รูปที่ 1 แผนภาพอุปกรณ์การไพโรไลซิสแบบเร็ว

## 2.5. เงื่อนไขการทดลอง

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงสุดที่ 350 400 และ 500 องศาเซลเซียส และส่วนที่ 2 คือ การทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมจากผลการทดลองในส่วนที่ 1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ดินขาวเคโอลิน และเพอร์ไลต์

## 2.6. สมบัติของไบโอออยล์

สมบัติที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ความหนาแน่น ความหนืด ค่าความร้อนสูง และปริมาณของแข็ง โดยทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

2.6.1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH value) ทำการวัดโดยใช้เครื่อง Denver instrument รุ่น UB-10 ซึ่งก่อน

ทำการวิเคราะห์ทุกครั้งจะทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดเทียบกับของเหลวมาตรฐานที่ค่าพีเอช 4 7 และ 10

2.6.2. ความหนาแน่น (Density) ทำการวิเคราะห์โดยการชั่งน้ำหนักของไบโอออยล์เทียบกับปริมาตร ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D4052

2.6.3. ความหนืด (Viscosity) เป็นการวัดความเสียดทานของของเหลวภายในหลอดวัดความหนืดยี่ห้อแคนนอน เบอร์ 450 โดยมีค่าคงที่ 2.5 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที หรือเซนติสโตกส์ต่อวินาที โดยจะทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D445

2.6.4. ค่าความร้อนสูง (Higher Heating value) ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Art.2060/2070 Bomb calorimeter ซึ่งจะใช้ไบโอออยล์ประมาณ 1 กรัม ปริมาณน้ำ 2 ลิตร ดำเนินการตามมาตรฐาน DIN 51900

2.6.5. ปริมาณของแข็ง (Solids content) ใช้วิธีการแบบสุญญากาศ (Vacuum filtration) โดยดูดไบโอออยล์ 2-3 กรัม ผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 3 ขนาด 110 มิลลิเมตร และใช้เอทานอลในการทำลายของแข็งที่ไม่สามารถผ่านกระดาษกรองได้คือ ของแข็งที่อยู่ในไบโอออยล์ ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D7579

## 3. ผลการศึกษา

ผลของการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม หลังจากนั้นนำอุณหภูมิที่เหมาะสมไปใช้ในการศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

### 3.1. ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส

ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณผลได้โดยมวลจากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ไบโอออยล์รวม ไบโอออยล์หนัก ไบโอออยล์เบา ถ่านชาร์ และแก๊ส โดยไบโอออยล์รวมสามารถแบ่งได้เป็นไบโอออยล์หนัก และไบโอออยล์เบา ซึ่งไบโอออยล์หนักได้จากการควบแน่นด้วยน้ำและชุดทำให้ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต ขณะที่ไบโอออยล์เบาได้จากการควบแน่น

ด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอมโมเนีย จากรูปที่ 1 ส่วนที่เป็น ไบโอบอยล์ Pot 1 คือไบโอบอยล์หนัก และไบโอบอยล์ Pot 2-4 เป็นไบโอบอยล์เบา นอกจากนี้ยังได้ถ่านชาร์และแก๊ส โดยถ่านชาร์ได้จาก Char Pot 1-3 และส่วนที่ติดอยู่ในชุดกรองไอร้อน รูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิส่งผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณผลได้ของไบโอบอยล์รวม ไบโอบอยล์หนัก และแก๊ส ขณะที่ไบโอบอยล์เบา และถ่านชาร์ อุณหภูมิส่งผลเพียงเล็กน้อย อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 400 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลได้ของไบโอบอยล์รวมสูงสุด อยู่ที่ร้อยละ 62 ซึ่งแบ่งได้เป็นไบโอบอยล์หนักร้อยละ 45 และไบโอบอยล์เบาร้อยละ 18 การเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 เป็น 400 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลได้ของไบโอบอยล์ซึ่งเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 400 เป็น 500 องศาเซลเซียส ปริมาณผลได้ของไบโอบอยล์รวมลดลง โดยการลดลงนี้สอดคล้องกับการลดลงของปริมาณผลได้ของไบโอบอยล์หนัก และสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สจากร้อยละ 21 เป็นร้อยละ 35 แสดงให้เห็นว่าปริมาณผลได้โดยมวลที่ 400 องศาเซลเซียส มีปริมาณสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pattiya และคณะ [28] ที่ใช้ชีวมวลห้ำมันสำปะหลัง และเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเดียวกัน พบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลได้ของไบโอบอยล์รวมสูงสุดถึงร้อยละ 50.3 ดังนั้นจึงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการผลิตไบโอบอยล์

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเพียงปริมาณผลได้โดยมวลอาจไม่เพียงพอต่อการสรุป ดังนั้นจึงมีการศึกษาปริมาณผลได้เชิงพลังงาน โดยนำค่าความร้อนของไบโอบอยล์หนักและถ่านชาร์มาคำนวณ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3 จากรูปแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสไม่ส่งผลต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านชาร์ ขณะที่ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของไบโอบอยล์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 เป็น 400 องศาเซลเซียส แต่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 400 เป็น 500 องศาเซลเซียส ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของไบโอบอยล์สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 46 โดยการ

เปลี่ยนแปลงของปริมาณผลได้เชิงพลังงานของไบโอบอยล์ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแก๊สสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pattiya และคณะ [28] เมื่อปริมาณผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้นไบโอบอยล์จะมีปริมาณลดลง ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณของทั้งรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วพบว่าอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอบอยล์จากห้ำมันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ เนื่องจากให้ปริมาณผลได้ทั้งโดยมวลและเชิงพลังงานของไบโอบอยล์ สูงที่สุด ดังนั้นจึงเป็นอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการนำไปศึกษาในส่วนถัดไป ซึ่งเป็นส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

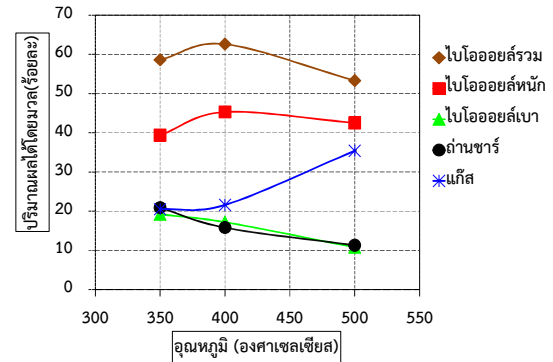
เมื่อพิจารณาสมบัติของไบโอบอยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิทั้งสามระดับโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งเทียบกับมาตรฐาน ASTM D7544-12 จากตารางพบว่า ไบโอบอยล์ที่ผลิตมีปริมาณของแข็งอยู่ในช่วง 1.2-4.2 โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิปริมาณของแข็งมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shiguang Li และคณะ [6] แต่อย่างไรก็ตามยังมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 0.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่ออกแบบมานี้ ส่วนที่ส่งผลต่อปริมาณของแข็ง คือชุดกรองไอร้อนยังไม่เหมาะสมและควรมีการปรับปรุงระบบซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของใยแก้วที่ใช้ในการกรอง [29] หรือเพิ่มขนาดของชุดกรอง หรืออาจจะสามารถทำได้โดยใช้ตัวกลางกรองชนิดอื่น [30] ซึ่งไม่ได้อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ตารางที่ 2 แสดงค่าพีเอชของไบโอบอยล์ ซึ่งพบว่าอยู่ในช่วง 2.6-3.5 และอุณหภูมิไพโรไลซิสไม่ส่งผลอย่างชัดเจน ค่าพีเอชของไบโอบอยล์ที่ได้นี้อยู่ในช่วงตามมาตรฐาน ASTM D7544-12 และยังมีสมบัติอีกชนิดหนึ่งสำคัญต่อการนำไปใช้ซึ่งก็คือ ค่าความหนืด ข้อกำหนดได้กำหนดไว้ว่าไบโอบอยล์ควรมีค่าความหนืดไม่เกิน 125 เซนติสโตกส์ ขณะที่ตารางที่ 2 แสดงชัดเจนว่าไบโอบอยล์ที่ผลิตจากทั้งสามอุณหภูมิมีค่าความหนืดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งอยู่ในช่วง 23-29 เซนติสโตกส์

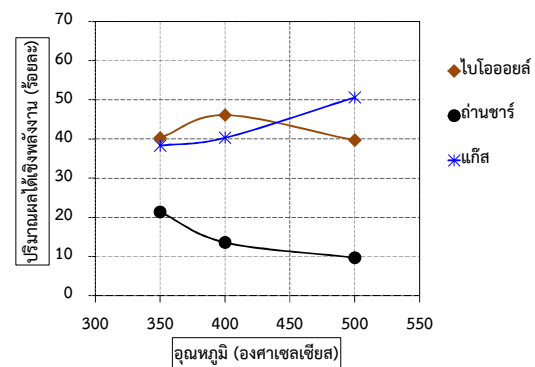
โตกส์ และยังพบว่ามีความมากกว่าความหนืดของไบโอออยล์ที่ได้จากหมักน้ำมันสำหรับหลังโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอซ์เบดเป็น 5.1 เซนติสโตกส์ [29]

อุณหภูมิไม่ส่งผลชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด หากไบโอออยล์มีความหนืดสูงเกินไปการนำไปใช้งานจะยาก เนื่องจากการขนถ่ายด้วยปั๊มหรือการฉีดผ่านหัวฉีดอาจมีปัญหาได้ [31] จากค่าความหนาแน่นของไบโอออยล์ดังตารางที่ 2 พบว่าอยู่ในช่วง 1.3-1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 400 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นเป็น 1.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อยู่ในช่วงตามมาตรฐาน ASTM D7544-12 และอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นมากนัก ตารางที่ 2 ยังแสดงค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 350 และ 500 องศาเซลเซียส ให้ไบโอออยล์มีค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกันประมาณ 13-14 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ว่ามากกว่า 15 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ พบว่าค่าความร้อนมีค่าสูงถึง 15.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นที่ใช้ชนิดของชีวมวล เต่าปฏิกิริยา และอุณหภูมิเดียวกันพบว่า ได้ค่าความร้อน 26.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [28] แสดงให้เห็นว่ามีค่า

น้อยกว่า แต่เมื่อเทียบปริมาณผลได้โดยมวลของไบโอออยล์รวมเป็นร้อยละ 53 พบว่างานวิจัยนี้มีค่ามากกว่า



รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณผลได้โดยมวลเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานเมื่อไม่ใช้ตัวเร่ง

ตารางที่ 2 สมบัติของไบโอออยล์จากกระบวนการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์สมบัติ	อุณหภูมิไพโรไลซิส (องศาเซลเซียส)			มาตรฐาน ASTM D7544-12
	350	400	500	
ปริมาณของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	4.2	3.2	1.2	<0.5
ค่าพีเอช	3.0	2.6	3.5	2-3
ความหนืด (เซนติสโตกส์)	28.7	23.3	25.4	<125
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.4	1.3	1.4	1.1-1.3
ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	13.3	15.8	13.6	>15

### 3.2. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก่อนและหลังการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 โดยจากรูปแสดงให้เห็นชัดเจนว่าหลังการใช้งาน สีของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสีดำ ซึ่งเมื่อสังเกตพบว่ามีลักษณะผงถ่านขนาดเล็กไปติดอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ผงถ่านนี้อาจเกิดจากการควบแน่นของไอไพโรไลซิส หรืออาจเกิดจากผงถ่านขนาดเล็กหลุดออกจากชุดไซโคลน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพเมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง โดยปริมาณถ่านที่ไปเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ดินขาวเคโอลิน และเพอร์ไลต์มีส่วนของถ่านที่ไปเคลือบอยู่ร้อยละ 0.12 1.8 และ 0.05 ตามลำดับ



(ก่อน)



(หลัง)

ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง



(ก่อน)



(หลัง)

ดินขาวเคโอลิน



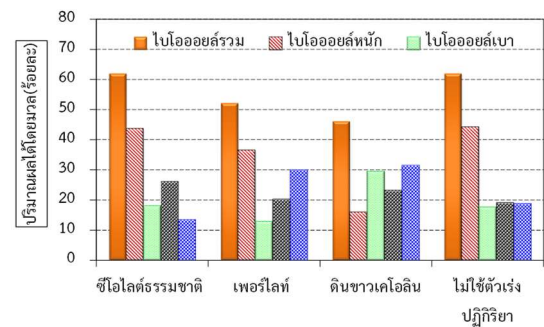
(ก่อน)



(หลัง)

เพอร์ไลต์

รูปที่ 4 ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยา



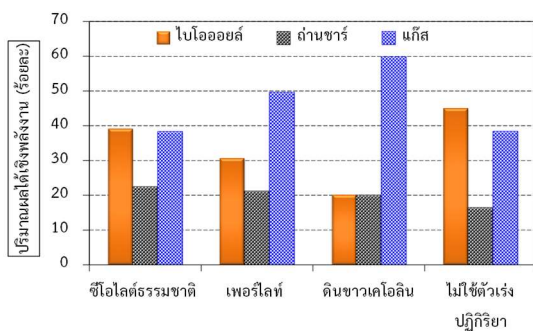
รูปที่ 5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลได้โดยมวลเมื่อใช้ตัวเร่ง

จากรูปที่ 5 แสดงผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลได้โดยมวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ไบโอออยล์รวมมีปริมาณผลได้ร้อยละ 62 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมมีค่าไม่แตกต่างจากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั้งไบโอออยล์หนักและไบโอออยล์เบาให้ปริมาณผลได้ใกล้เคียงกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์และแก๊ส ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 7 และสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณผลได้ของแก๊ส การเพิ่มขึ้นของปริมาณผลได้ของถ่านชาร์นี้มาจากถ่านชาร์ที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมลดลงถึงร้อยละ 10 ถึง 16 การลดลงของไบโอออยล์รวมนี้สอดคล้องกับการลดลงของไบโอออยล์หนักและไบโอออยล์เบากรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์ ขณะที่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์หนักลดลงแต่ปริมาณปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เบาเพิ่มขึ้นมาก แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดส่งผลต่อการแตกตัวของไอไพโรไลซิส เพื่อทำให้เกิดเป็นของเหลวที่ต่างชนิดกัน แต่สิ่งที่เหมือนกันของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองคือ การทำให้ปริมาณผลได้ของแก๊สเพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 11 ถึง 12 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ถ่านชาร์



เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยดินขาวเคโอลินให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมต่ำที่สุดและให้ปริมาณแก๊สสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าสามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking reactions) ได้มากที่สุด โดยตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินนี้ประกอบด้วยซิลิกอน และออกซิเจนเป็นหลัก และมีธาตุอื่นที่สามารถมีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็ก (Fe) ร้อยละ 7.1 โพแทสเซียม (K) ร้อยละ 0.8 และ ทองแดง (Cu) ร้อยละ 1.0

เมื่อพิจารณาปริมาณผลได้โดยมวลเทียบกับปริมาณผลได้เชิงพลังงานดังรูปที่ 6 พบว่าค่าพลังงานของไบโอออยล์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยค่าพลังงานส่วนหนึ่งถูกเลื่อนมาเป็นถ่านชาร์และอีกส่วนหนึ่งเลื่อนมาเป็นแก๊สในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน แต่กรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดงค่าพลังงานของแก๊สมีค่าเท่ากับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ไฮโฟโรไลซิสแตกตัวกลายเป็นแก๊สได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking reaction) ได้มากที่สุด



รูปที่ 6 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานเมื่อใช้ตัวเร่ง

อย่างไรก็ตามแม้ว่าปริมาณผลได้โดยมวลและเชิงพลังงานเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วมีปริมาณลดลง แต่เมื่อพิจารณาสมบัติแล้วพบว่า สมบัติที่สำคัญของการเร่งปฏิกิริยา คือ ค่าความร้อนสูง จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไบโอออยล์ที่ได้มีค่าความร้อนสูงเป็น 15.8 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดงและเพอร์ไลต์ส่งผลให้ค่าความร้อนลดลงแต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินกลับส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอออยล์ได้ [32]

เมื่อพิจารณาสมบัติประเภทอื่น เช่น ปริมาณของแข็งพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปริมาณของแข็งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนหนึ่งทำหน้าที่กรองของแข็งที่หลุดออกจากไซโคลน เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของเชื้อเพลิงพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดงและตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินสามารถเพิ่มค่าพีเอชจาก 2.6 เป็น 4.5 ได้ ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์ไม่ทำให้ค่าพีเอชของไบโอออยล์เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อพิจารณาค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของไบโอออยล์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ดินขาวเคโอลินให้ผลเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากความหนืดของไบโอออยล์ที่ได้มีค่าต่ำมากและค่าความหนาแน่นมีค่าสูง ซึ่งค่าความหนืดที่ต่ำที่ต่ำที่สุดนี้สอดคล้องกับปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสเบาที่สุดดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าดินขาวเคโอลินสามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวและอาจทำให้โมเลกุลของไบโอออยล์มีขนาดเล็กลง จึงมีความหนืดต่ำ นอกจากนี้ค่าความร้อนของไบโอออยล์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ยังมีค่าสูงถึง 19.5 เมกะจูลต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ปรับปรุงสมบัติของไบโอออยล์แม้ว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์จะมีค่าลดลงก็ตาม

ตารางที่ 3 สมบัติของไบโอออยล์หนักจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์สมบัติ	ตัวเร่งปฏิกิริยา			ไม่ใช่ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	มาตรฐาน ASTM D7544-12
	ซีโอไลต์ธรรมชาติ	ดินขาวเค โอลิน	พอร์ไลต์		
	ชนิดหินลาวาแดง				
ปริมาณของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.5	0.4	1.2	3.2	<0.5
ค่าพีเอช	4.5	4.5	2.4	2.6	2-3
ความหนืด (เซนติสโตกส์)	12.2	0.6	11.4	23.3	<125
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.2	1.7	1.5	1.3	1.1-1.3
ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	13.9	19.5	13.0	15.8	>15

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยต่อไป ควรศึกษาผลของการผสมกันของตัวเร่งปฏิกิริยาจากธรรมชาติ เพิ่มเติม เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอออยล์ที่มีสมบัติที่ดีขึ้น

#### 4. สรุปผลการทดลอง

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระที่อุณหภูมิ 350 400 และ 500 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ปริมาณผลได้โดยมวลประมาณร้อยละ 59 62 และ 53 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลได้โดยมวลสูงที่สุด ที่สภาวะนี้ยังให้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของไบโอออยล์สูงที่สุดประมาณร้อยละ 46 และยังพบว่าสมบัติของไบโอออยล์ ได้แก่ ค่าพีเอช ความหนืด ความหนาแน่น และค่าความร้อนสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM D7544-12

เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติทั้งสามชนิดทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ลดลง อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิด เช่น ดินขาวเคโอลิน ช่วยให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าประมาณ 15.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าความร้อนมีค่าเป็น 19.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดงทำให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์ลดลง และก็ทำให้ค่าความหนืดลดลงด้วย ซึ่งแสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดงนี้

อาจจะไม่ดีในแง่ของค่าความร้อนแต่ช่วยทางด้านค่าความหนืดเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน ทั้งค่าความหนืดก็ลดลงต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพอร์ไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ทั้งปริมาณของแข็งก็ต่ำกว่า ค่าพีเอชก็สูงที่สุดและสูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการไพโรไลซิสแบบเร็วของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Zanzi, K. Sjöström, and E. Björnbom, "Rapid high-temperature pyrolysis of biomass in a free-fall reactor," *Fuel*, vol. 75, no. 5, pp. 545-550, 1996.
- [2] R. Zanzi, K. Sjöström, and E. Björnbom, "Rapid pyrolysis of agricultural residues at high

- temperature," *Biomass and Bioenergy*, vol. 23, no. 5, pp. 357-366, 2002.
- [3] W. C. Xu, K. Matsuoka, H. Akiho, M. Kumagai, and A. Tomita, "High pressure hydrolysis of coals by using a continuous free-fall reactor," *Fuel*, vol. 82, no. 6, pp. 677-685, 2003.
- [4] O. Onay and O. M. Koçkar, "Pyrolysis of rapeseed in a free fall reactor for production of bio-oil," *Fuel*, vol. 85, no. 12-13, pp. 1921-1928, 2006.
- [5] C. Acikgoz and O. M. Kockar, "Flash pyrolysis of linseed ( *Linum usitatissimum* L. ) for production of liquid fuels," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 78, no. 2, pp. 406-412, 2007.
- [6] S. Li, S. Xu, S. Liu, C. Yang, and Q. Lu, "Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas," *Fuel Processing Technology*, vol. 85, no. 8-10, pp. 1201-1211, 2004.
- [7] L. Wei *et al.*, "Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor," *Fuel Processing Technology*, vol. 87, no. 10, pp. 863-871, 2006.
- [8] V. Visentin, F. Piva, and P. Canu, " Experimental Study of Cellulose Fast Pyrolysis in a Flow Reactor," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 41, no. 20, pp. 4965-4975, 2002.
- [9] A. Karaduman, E. H. Simsek, B. Çiçek, and A. Y. Bilgesü, "Flash pyrolysis of polystyrene wastes in a free-fall reactor under vacuum," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 60, no. 2, pp. 179-186, 2001.
- [10] L. Zhang, S. Xu, W. Zhao, and S. Liu, "Co-pyrolysis of biomass and coal in a free fall reactor," *Fuel*, vol. 86, no. 3, pp. 353-359, 2007.
- [11] A. V. Bridgwater and C. Peacocke, "Fast pyrolysis processes for biomass," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 4, no. 1, pp. 1-73, 2000.
- [12] W. N. R. W. Isahak, M. W. M. Hisham, M. A. Yarmo, and T.-y. Yun Hin, "A review on bio-oil production from biomass by using pyrolysis method," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 5910-5923, 10// 2012.
- [13] A. Bridgwater, "Progress in Thermochemical Biomass Conversion," vol. Volume 2. London: Blackwell Science, p. p.1744, 2001.
- [14] B. Pidtasang, P. Udomsap, S. Sukkasi, N. Chollacoop, and A. Pattiya, "Influence of alcohol addition on properties of bio-oil produced from fast pyrolysis of eucalyptus bark in a free-fall reactor," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 19, no. 6, pp. 1851-1857, 11/25/ 2013.
- [15] C. Dupont, J.-M. Commandré, P. Gauthier, G. Boissonnet, S. Salvador, and D. Schweich, " Biomass pyrolysis experiments in an analytical entrained flow reactor between 1073 K and 1273 K," *Fuel*, vol. 87, no. 7, pp. 1155-1164, 2008.
- [16] C. J. Ellens and R. C. Brown, "Optimization of a free-fall reactor for the production of fast pyrolysis bio-oil," *Bioresource Technology*, no. Accepted Manuscript.

- [17] A. Oasmaa and D. Meier, "Norms and standards for fast pyrolysis liquids: 1. Round robin test," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 73, no. 2, pp. 323-334, 6// 2005.
- [18] A. Pattiya, J. O. Titiloye, and A. V. Bridgwater, "Fast pyrolysis of cassava rhizome in the presence of catalysts," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 81, no. 1, pp. 72-79, 2008.
- [19] J. M. Encinar, J. F. González, G. Martínez, and S. Román, "Catalytic pyrolysis of exhausted olive oil waste," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 85, no. 1-2, pp. 197-203, 2009.
- [20] E. Pütün, B. B. Uzun, and A. E. Pütün, "Production of bio-fuels from cottonseed cake by catalytic pyrolysis under steam atmosphere," *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 6, pp. 592-598, 2006.
- [21] M. I. Nokkosmäki, E. T. Kuoppala, E. A. Leppämäki, and A. O. I. Krause, "Catalytic conversion of biomass pyrolysis vapours with zinc oxide," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 55, no. 1, pp. 119-131, 5// 2000.
- [22] O. D. Mante, F. A. Agblevor, and R. McClung, "Fluid catalytic cracking of biomass pyrolysis vapors," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 1, no. 4, pp. 189-201, 2011.
- [23] M. M. Barbooti, F. K. Matlub, and H. M. Hadi, "Catalytic pyrolysis of Phragmites (reed): Investigation of its potential as a biomass feedstock," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 98, no. 0, pp. 1-6, 11// 2012.
- [24] O. D. Mante, F. A. Agblevor, S. T. Oyama, and R. McClung, "The influence of recycling non-condensable gases in the fractional catalytic pyrolysis of biomass," *Bioresource Technology*, vol. 111, pp. 482-90, May 2012.
- [25] L. Qiang, L. Wen-Zhi, and Z. Xi-Feng, "Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 5, pp. 1376-1383, 2009.
- [26] H. Zhang, R. Xiao, H. Huang, and G. Xiao, "Comparison of non-catalytic and catalytic fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor," *Bioresour Technol*, vol. 100, no. 3, pp. 1428-34, Feb 2009.
- [27] H. Zhang *et al.*, "Hydrodynamics of a novel biomass autothermal fast pyrolysis reactor: Solid circulation rate and gas bypassing," *Chemical Engineering Journal*, vol. 181-182, pp. 685-693, 2/1/ 2012.
- [28] A. Pattiya, S. Sukkasi, and V. Goodwin, "Fast pyrolysis of sugarcane and cassava residues in a free-fall reactor," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 1067-1077, 8// 2012.
- [29] A. Pattiya and S. Suttibak, "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*, vol. 95, pp. 227-235, 2012.

- [30] C. Paenpong, S. Inthidech, and A. Pattiya, "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*, vol. 139, pp. 34-42, 7// 2013.
- [31] S. Czernik and A. V. Bridgwater, "Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil," (in English), *Energy & Fuels*, vol. 18, no. 2, pp. 590-598, Mar-Apr 2004.
- [32] H.-y. Li, Y.-j. Yan, and Z.-w. Ren, "Online upgrading of organic vapors from the fast pyrolysis of biomass," *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, vol. 36, no. 6, pp. 666-671, 12// 2008.