

การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสพลาสติกพอลิพรอพิลีนเป็นเชื้อเพลิงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐานที่ทำการสกัดได้จากแกลบข้าว

The Improvement in quality of fuel oil by pyrolysis of polypropylene using of an amorphous silica catalyst made from rice husk

จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร^{1*}, อมรรัตน์ ปิ่นชัยมูล² และกนกพงษ์ ศรีเที่ยง³

^{1*} สาขาวิทยาศาสตร์เคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120 โทร 053-723-971 ต่อ 3017 โทรสาร 053-723-978

E-mail:jirapatpong.amcet@gmail.com

² สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120 โทร 053-723-971 ต่อ 4600 โทรสาร 053-723-978

E-mail:nu_nan_ie@hotmail.com

³ สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120 โทร 053-723-971 ต่อ 3001 โทรสาร 053-723-978

E-mail:zercute46@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณผลได้ของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีนด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 - 450 องศาเซลเซียส ปรับปรุงคุณภาพน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐานจากแกลบข้าว การไพโรไลซิสจะใช้เครื่องเตาปฏิกรณ์แบบกึ่งกะภายใต้สภาวะสุญญากาศและทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ที่น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากผลการไพโรไลซิสได้ผลปริมาณของของเหลวสูงสุดที่ 450 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 48 ถ่านชาร์ ร้อยละ 1.3 และก๊าซ ร้อยละ 0.7 และของเหลวที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูง 45,459 กิโลจูลต่อกิโลกรัม จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน พบว่า ผลิตภัณฑ์ของของเหลวแสดงถึงกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลคีนและแอลเคน และจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีนพบว่า ค่าความหนืด และค่าความถ่วงจำเพาะ มีค่าเทียบเคียงมาตรฐานคุณภาพน้ำมันดีเซล

คำสำคัญ: พลาสติกพอลิพรอพิลีน, ไพโรไลซิส, ซิลิกา, ตัวเร่งปฏิกิริยา, การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไพโรไลซิส

Abstract

This research aims to investigate the improvement in quality of fuel oil from polypropylene by pyrolysis at 350° - 450 ° Celsius using an amorphous silica catalyst extracted from rice husk. Pyrolysis uses a semi-rotary reactor under vacuum conditions. At 5 percent by weight of pyrolysis results, the maximum volume of liquid at 450° Celsius was 48%, Charcoal 1.3%, and 0.7% gas and liquid produced. The highest heating value of the liquid product was 45,459 kilojoules per kilogram of oil. Furthermore,

analysis of the chemical structure of the polypropylene oil demonstrated that the liquid products were characterized by aliphatic hydrocarbons such as alkenes and alkanes. From the analysis of the physical properties of the polypropylene it was shown that viscosity and specific gravity were similar to that of diesel fuel.

Keywords: Polypropylene, Pyrolysis, Silica, Catalyst, Pyrolysis oil quality

1. บทนำ

พอลิพรอพิลีน (polypropylene; PP) จัดเป็นพลาสติกในกลุ่มที่มีปริมาณที่สูง เนื่องจากมีการประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.84-0.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีน้ำหนักเบา มีลักษณะขาวขุ่น ไม่ติดไฟ ไม่ไหม้ นิยมนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร และเครื่องใช้ เช่น ช้อน ส้อม แก้วน้ำ และขวดน้ำ เป็นต้น จึงทำให้พลาสติกประเภทนี้มีปริมาณการใช้ในชีวิตประจำวันที่สูงและมีราคาค่อนข้างถูกส่งผลให้เป็นปัญหาทางด้านขยะระดับประเทศที่รอการแก้ไข อีกทั้งยังสร้างปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากเนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ จึงต้องหาวิธีการกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การเผา และการฝังกลบ แต่กระบวนการกำจัดเหล่านี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจนไม่ว่าจะเป็นปัญหา คุณภาพอากาศ สารพิษปนเปื้อนในดิน และแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต และจากปัญหานี้มนุษย์เราจึงมีการรณรงค์การลดขยะพลาสติกด้วยการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้ขยะพลาสติกกลับมามีคุณค่า แต่ด้วยวิธีนี้ก็ยังไม่สามารถที่จะลดปริมาณขยะพลาสติกได้ตามความต้องการ เมื่อเทียบกับประชากรที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้คิดค้นเทคโนโลยีการกำจัดขยะพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้เป็นพลังงานหรือเชื้อเพลิงได้โดยวิธีหนึ่ง คือ วิธีการสลายตัวทางความร้อนหรือที่เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งจะทำให้การหลอมพลาสติกที่เหลือใช้มาเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนเนื่องจากพลาสติกมีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อให้อุณหภูมิแก่พลาสติกจนถึงจุดหลอมเหลวของพลาสติกไฮโดรคาร์บอน จะเกิดการแตกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่สั้นลง ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนและกลั่นตัวตามจำนวนคาร์บอนที่แตกต่างกันได้เป็นผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นของเหลว (น้ำมัน) ของแข็ง และ ก๊าซ ตามลำดับ จากการศึกษาของ ธีรภัฏพิชชา เอกบุศย์ และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกในประเทศไทยด้วยกระบวนการไพโรไลซิส พบว่า ผู้ประกอบการเอกชนและโครงการส่งเสริมการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันด้วยกระบวนการไพโรไลซิสขนาดกำลังการผลิตตั้งแต่ 0.8-16 ตันต่อวัน ได้ผลผลิตน้ำมันแปรรูป 200 - 10,400 ลิตรต่อวัน ชนิดของพลาสติกที่เข้าเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสคือพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีนถูกนำมาใช้ในการกลั่นน้ำมัน และทำการประเมินการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ จึงทำให้มีองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชน และอีกทั้งนักวิจัยที่เล็งเห็นถึงความสำคัญของการนำพลาสติกกลับมาเป็นพลังงานเชื้อเพลิง จากงานวิจัย Moinuddin Sarker et al. (2012) ได้ทำการกลั่นน้ำมันไฮโดรคาร์บอนแบบกลั่นลำดับส่วนที่อุณหภูมิต่ำจากพลาสติกประเภทพอลิสไตรีน โดยใช้อุณหภูมิในการกลั่นช่วงแรกในช่วง 100 - 400 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันพอลิสไตรีนที่มีความหนาแน่น 0.88 กรัมต่อมิลลิลิตร ช่วงที่สองอุณหภูมิ 40 - 60 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันไฮโดรคาร์บอน

ที่มีความหนาแน่น 0.84 กรัมต่อมิลลิเมตร ที่เบากว่าแต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ออกมา ยังมีคุณภาพไม่เป็นไปตามมาตรฐาน จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนการนำไปใช้งาน แนวทางของการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับวิธีหนึ่งคือการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้โดยจากงานวิจัยของ กรวิกา วงษ์ผาบ (2554) ได้ศึกษาการแตกตัวของพลาสติกที่ใช้แล้วชนิดพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่ความดัน 1 บาร์เกจ ด้วย USY ซีโอไลต์ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ 380 400 และ 420 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที อัตราส่วนของ USY ซีโอไลต์ต่อพลาสติกที่ใช้แล้วร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวประมาณ ร้อยละ 69.81 แก๊สไฮโดรคาร์บอน ร้อยละ 20.33 และของแข็ง ร้อยละ 9.86 ซึ่งผลิตภัณฑ์ของเหลวประกอบด้วยเนฟทาร้อยละ 47.59 แก๊สออยล์เบา และเคโรซีน มีแก๊สออยล์หนักและกากน้ำมันหนักในปริมาณน้อย จากการศึกษาของ Sonawane YB et al. (2015) ได้ทำการศึกษากาโรไลซิสของพลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีนด้วยอุณหภูมิ กาโรไลซิส 450 องศาเซลเซียส ด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์เบต้า (Zeolite beta) พบว่าได้ปริมาณของของเหลวมากที่สุดถึงร้อยละ 86.40 ที่น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก น้ำมันมีความใสมากขึ้นและมีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง $\text{C}_5\text{-C}_{20}$ และ Akalin et al. (2011) ได้ทำการ กาโรไลซิสก้านยาสูบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Al_2O_3 , Fe_2O_3 , AlCl_3 และ SnCl_4 ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดคือ Al_2O_3 ส่วน Van Kasteren J.M.N. et al. ได้ทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ลงไปในกระบวนการ กาโรไลซิสพลาสติกประเภท HDPE และขยะประเภท HDPE พบว่าปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นและลดปริมาณกากคาร์บอน น้ำมันมีความใสมากขึ้น และมีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง $\text{C}_5\text{-C}_{16}$

จากงานวิจัยเหล่านี้จึงมีความเป็นไปได้ว่าจะนำสารสกัดซิลิกาอสัณฐานจากแกลบข้าวมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถทดแทนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ราคาค่อนข้างสูง อีกทั้งยังหาได้ง่าย และราคาถูก อีกทั้งซิลิกาอสัณฐานมีลักษณะโครงสร้างและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าจึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการกลั่นน้ำมันจากพลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีนจากกิจกรรมการรณรงค์การแยกขยะภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ด้วยกระบวนการกาโรไลซิส และทำการออกแบบและสร้างเครื่องชุดเตาปฏิกรณ์แบบแบบกึ่งกะที่อุณหภูมิระหว่าง 350 - 450 องศาเซลเซียส โดยทำการควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อดูผลได้สูงสุดของผลิตภัณฑ์ของของเหลวที่ได้จากพลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีนและสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำมันจากพลาสติกให้มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพมีค่าเทียบเคียงคุณภาพน้ำมันดีเซลมาตรฐาน ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica; SiO_2)

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อทำการออกแบบและสร้างเครื่องกลั่นต้นแบบน้ำมันจากพลาสติกด้วยกระบวนการ กาโรไลซิส

2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยของ อุณหภูมิในการกลั่นสลาย และตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica; SiO_2) จากแอลบข้าวที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมัน จากพลาสติกพอลิพรอพิลีนให้มีคุณภาพเทียบเคียงน้ำมันดีเซลมาตรฐาน

3. ขั้นตอนการเตรียมและวิธีการทดลอง

3.1 พลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีน (Polypropylene)

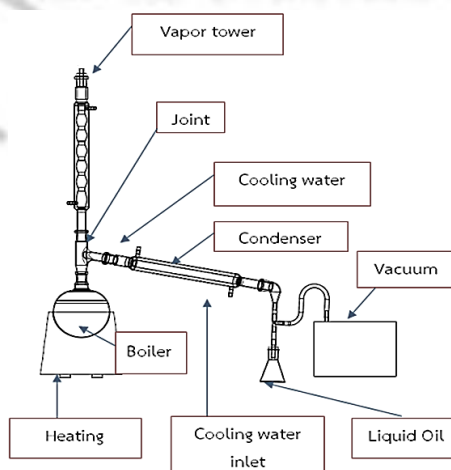
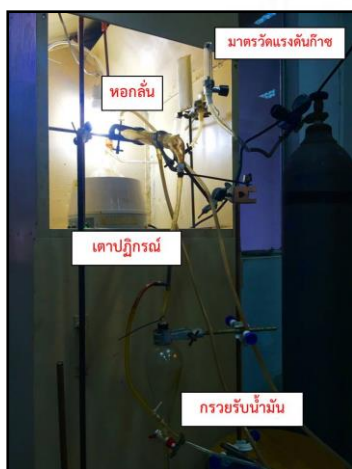
ทำการคัดแยกขยะพลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีน นำมาทำความสะอาดและตากให้แห้ง

3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐาน (SiO_2) ทำการเตรียมจากแอลบข้าวด้วยกระบวนการสกัดแบบ 2 ขั้นตอน คือ การสกัดสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ โดยการนำแอลบข้าวมาทำความสะอาด และทำการอบแห้ง และทำการเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากนั้นนำแอลบมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปอบ และทำการคำนวณร้อยละของสารอินทรีย์ นำแอลบข้าวที่ได้ไปเผา จนได้เถ้าแอลบข้าวสีขาว และทำการคำนวณร้อยละสารอินทรีย์

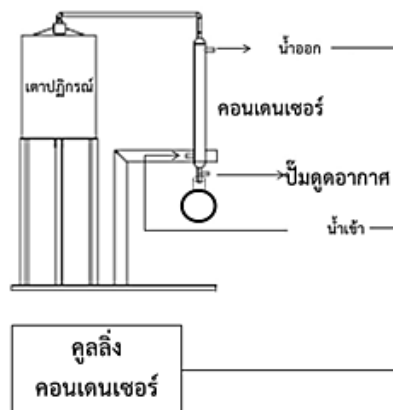
3.3 การออกแบบเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบกึ่งกะ (Semi batch reactor)

การออกแบบอุปกรณ์การทดลองปฏิกิริยาไพโรไลซิส และการสร้างเครื่องชุดเตาปฏิกรณ์ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้นแบบซึ่งเป็นปฏิกรณ์แบบกึ่งกะแสดงดังภาพที่ 1 (ก) และ (ข) เป็นชุดอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการและเครื่องกลั่นน้ำมันพลาสติกต้นแบบโดยการออกแบบตัวถังปฏิกรณ์สามารถจุปริมาณพลาสติกได้ไม่เกิน 2500 กรัม ใช้ชุดลดความร้อน 2400 วัตต์ ชุดควบแน่นสำหรับกลั่น โดยใช้ระบบหล่อเย็นแบบคูลลิ่งคอนเดนเซอร์ ควบคุมระบบอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์และระบบปั๊มสุญญากาศที่อัตราเร็ว 0.5 ลิตรต่อนาที ที่เวลา 5 นาที และใช้หลักการแบบกลั่นลำดับส่วนด้วยการกลั่นสลายด้วยความร้อนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน จากนั้นให้อุณหภูมิแก่พลาสติกเปลี่ยนจากสถานะของแข็งกลายเป็นไอแก๊สไฮโดรคาร์บอนผ่านกระบวนการควบแน่น (condensation) กลายเป็นของเหลวไฮโดรคาร์บอน ตามลำดับ



(ก) ห้องปฏิบัติการทางเคมี

ภาพที่ 1 อุปกรณ์การทดลองและชุดเตาปฏิกรณ์ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้นแบบ



(ข) เครื่องกลั่นน้ำมันพลาสติกต้นแบบ

ภาพที่ 1 อุปกรณ์การทดลองและชุดเตาปฏิกรณ์ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้นแบบ (ต่อ)

3.4 ขั้นตอนการไพโรไลซิส (Pyrolysis procedure)

นำพลาสติกที่ทำกรเตรียมในหัวข้อ 3.1 มาชั่งน้ำหนักจำนวน 50 กรัม ใส่ลงในถังเตาปฏิกรณ์โดยทำการกลั่นแบบไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นให้ความร้อนกับถังปฏิกรณ์ ที่อุณหภูมิ 350 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเกิดไอก๊าซไฮโดรคาร์บอนของพลาสติกให้ทำการเปิดระบบน้ำหล่อเย็นแบบคูลลิ่งคอนเดนเซอร์ จนไอก๊าซไฮโดรคาร์บอนกลั่นตัวเป็นของเหลว

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาและปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของซิลิกาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scan Electron Microscopy; SEM) และปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปี (Energy Dispersive X-ray; EDX)

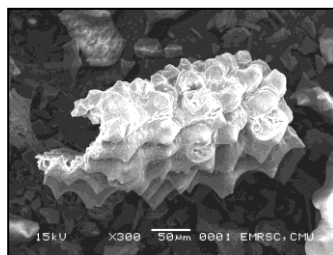
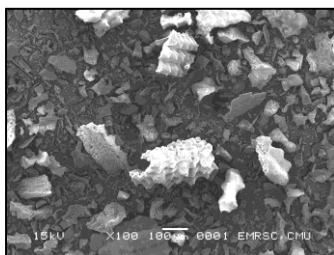
3.6 การวิเคราะห์ค่าทางความร้อน (Heating value) และหมู่ฟังก์ชันทางเคมี (Functional groups) และการวิเคราะห์จำนวนคาร์บอน (Carbon number) ของน้ำมันจากพลาสติก

น้ำมันจากพลาสติกจะทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) และวิเคราะห์จำนวนคาร์บอนด้วยเครื่องไฮโดรคาร์บอนอนาลิเซอร์ (Hydrocarbon Analysis) และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันจากพลาสติก

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาและปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อคำนวณร้อยละของซิลิกาที่ทำการสกัดได้มีค่าเท่ากับ 16.95 การวิเคราะห์พื้นผิวของซิลิกา พบว่า ลักษณะพื้นผิวของเถ้ากลบขาวมีพื้นผิวขรุขระ และอาจเกิดจากพื้นที่ที่เลือกวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่าง ๆ มีซิลิกาไม่สม่ำเสมอ เพราะโครงสร้างที่เป็นอนุฐานของซิลิกาเนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วง 600 - 800 องศาเซลเซียส



(ก) กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) กำลังขยาย 300 เท่า

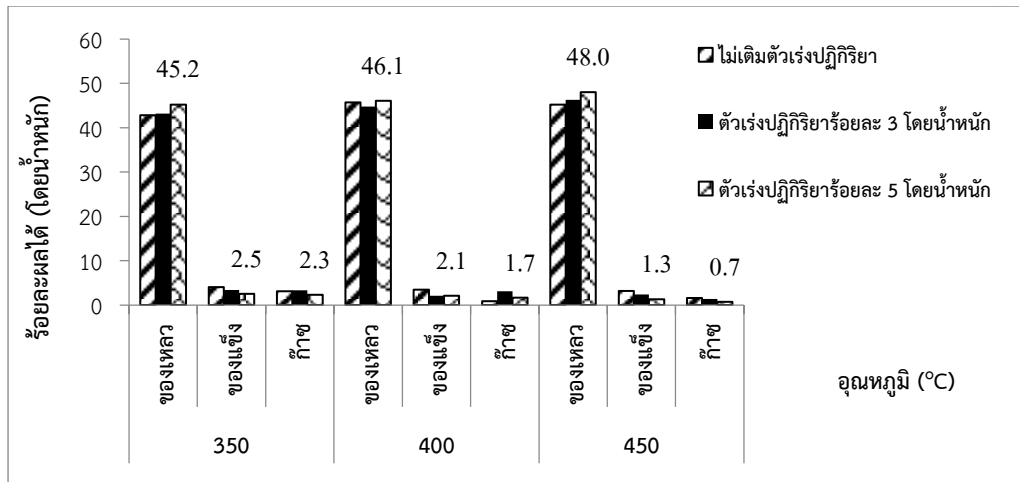
ภาพที่ 2 พื้นผิวของซิลิกาที่สกัดได้จากกลบข้าว

จากการวิเคราะห์ธาตุในซิลิกา พบว่า มีปริมาณของธาตุซิลิกอน แคลเซียม และแมกนีเซียม มีค่าเท่ากับ 30.83, 0.14 และ 0.19 %atom ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในรูปของออกไซด์โดยออกไซด์ในรูปของ SiO_2 มีคุณสมบัติรูพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงเพื่อเพิ่มโอกาสในการเลือกดูดซับสารที่มีโมเลกุลใหญ่และโอกาสในการทำปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดกลางถึงใหญ่ระดับน้ำมันดีเซลได้ (Kraokaw S. และ Kim D. J. et al.) ซึ่งแตกต่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น เช่น ซีโอไลต์ เนื่องจากมีความเป็นรูพรุนที่สูงและมีข้อจำกัด คือ สามารถดูดซับได้เฉพาะสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ได้ทำให้ปฏิกิริยามีโอกาสเกิดขึ้นในระดับจำกัด ส่วน CaO และ MgO เป็นโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth metal compound) ที่มีคุณสมบัติความเป็นเบสที่สูง สามารถที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) เนื่องจากเป็นออกไซด์ของสารอนวนไฟฟ้าที่สามารถดูดซับบนพื้นผิวของแข็งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เอง ดังนั้น พลังงานเสรีกิบส์ (ΔG) ของปฏิกิริยาจึงต้องมีค่าเป็นลบแต่ในการดูดซับนั้นโมเลกุลที่อยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบในเฟสแก๊สหรือของเหลวที่อยู่เหนือพื้นผิวของแข็งนั้น เมื่อมาเกาะบนพื้นผิวของแข็ง การเคลื่อนที่ของโมเลกุลนั้นจะลดลงโมเลกุลที่เกาะอยู่บนพื้นผิวจะมีความเป็นระเบียบมากกว่าโมเลกุลที่ลอยลอยอยู่เหนือพื้นผิวของแข็ง ดังนั้นการดูดซับจึงทำให้ค่าเอนโทรปี (entropy) ของระบบลดลงมีค่าเป็นลบ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การกลั่นน้ำมันจากพลาสติกมีคุณภาพมากขึ้น

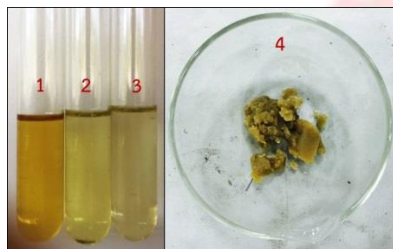
4.2 ผลของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันจากพลาสติกพอลิพรอฟิลีน

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันจากพลาสติกพอลิพรอฟิลีนที่ได้จากระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 350 - 450 องศาเซลเซียส และผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 3 พบว่า ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีปริมาณของเหลวสูงสุดคือร้อยละ 48.0 ถ่านชาร์ ร้อยละ 1.3 และก๊าซร้อยละ 0.7 แสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการแตกตัวด้วยความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้ดียิ่งขึ้นรวมถึงตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดช่วยแตกพันธะระหว่างคาร์บอนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้ขนาดของโมเลกุลเล็กลง โดยเกิดขึ้นผ่านจากปฏิกิริยาของคาร์โบเนียมไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาถ่ายโอนไฮโดรเจน (Hydrogen transfer) และปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน (Isomerization) และปฏิกิริยาจะหยุดลงก็ต่อเมื่อคาร์โบเนียมไอออนทำปฏิกิริยากับตัวเร่ง

ปฏิกิริยา และอาจเกิดการแตกตัวต่อไปได้อีกถ้าตัวเร่งปฏิกิริยานั้นยังคงมีความว่องไวอยู่ จากภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสีของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมีความใสและมีความสะอาดมากขึ้น และมีปริมาณถ่านชาร์ลดลงเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ

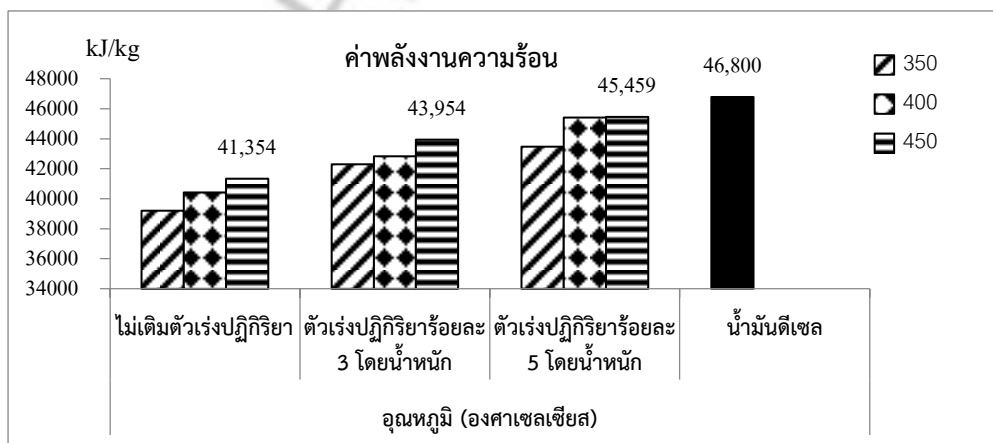


ภาพที่ 3 ร้อยละผลผลิตของกระบวนการกลั่นน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน



ภาพที่ 4 ผลผลิตน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (1) ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (2) เติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (3) เติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (4) ถ่านชาร์

4.3 ผลของค่าความร้อนของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

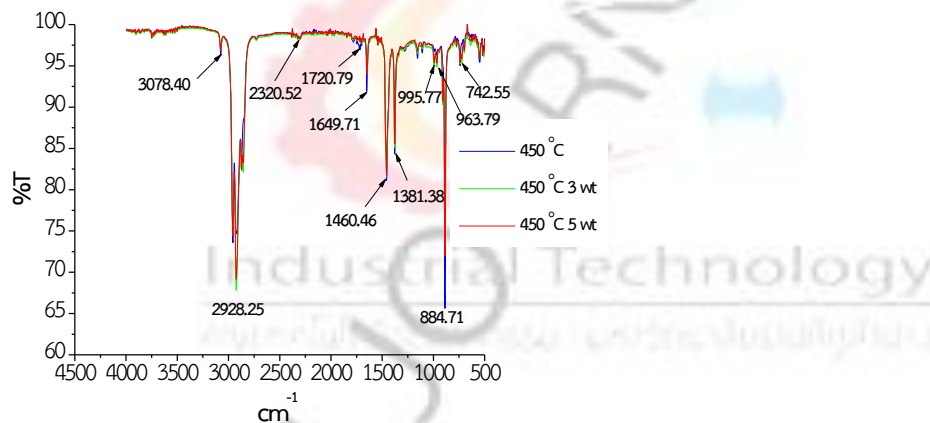


ภาพที่ 5 ค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

จากภาพที่ 5 แสดงผลของค่าความร้อนของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน พบว่า ค่าความร้อนของน้ำมันที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิโพโรไลซิส 450 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนเท่ากับ 41,354 กิโลจูลต่อกิโลกรัม, ค่าความร้อนของน้ำมันที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 43,954 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และ 45,459 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยแนวโน้มของค่าพลังงานความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิในการกลั่นแตกสลายและน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโดยโครงสร้างของพลาสติกพอลิพรอพิลีนมีไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ใหญ่มากนัก ไม่ซับซ้อนสามารถแตกตัวได้ง่าย มีส่วนทำให้โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนมีขนาดสั้นลงเกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติกและผลของตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนของพลาสติกพอลิพรอพิลีนมีขนาดเล็กลงและปรับโครงสร้างของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนให้เหมาะสมมีลักษณะและความเป็นอะโรมาติกเกิดขึ้นจากการถ่ายโอนไฮโดรเจนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของน้ำมันสูงขึ้น

4.4 การวิเคราะห์ฟังก์ชันแนลกรุปทางเคมีและจำนวนคาร์บอนของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

1) การวิเคราะห์ฟังก์ชันแนลกรุปทางเคมีด้วยเทคนิคฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี



ภาพที่ 6 ฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR) ของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

ตารางที่ 1 ฟังก์ชันแนลกรุปของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

จำนวนคลื่น	ความยาวคลื่น (cm ⁻¹)	ฟังก์ชันแนลกรุป	จำนวนคลื่น	ความยาวคลื่น (cm ⁻¹)	ฟังก์ชันแนลกรุป
1	742.55	-CH=CH-(cis)	6	1649.71	Non-Conjugated
2	884.71	C=CH ₂	7	1720.79	Non-conjugated
3	963.79	-CH=CH-(trans)	8	2320.52	C-C=, -C-C=, -CH
4	995.77	Acetate	9	2928.25	C-CH ₃
5	1460.46	CH ₃	10	3078.40	=C-H

จากผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันแนลกรุปทางเคมีของน้ำพลาสติกพอลิพรอพิลีนที่แสดงดังภาพที่ 6 และตารางที่ 1 พบว่า ที่เลขคลื่น 3078 cm^{-1} เป็นพีคการดูดกลืนแสงของ $=\text{C-H}$ เป็นการสั่นของกลุ่มเมทิลและเมทิลีน, เลขคลื่น 2928.25 และ 2320.52 cm^{-1} เป็นพีคการดูดกลืนแสงของ C-CH_3 และ C-C= , $-\text{C-C=}$, $-\text{CH}$, เลขคลื่น 1720.79 และ 1649.71 cm^{-1} เป็นการสั่นของกลุ่ม non-conjugated, เลขคลื่น 1460.46 cm^{-1} เป็นรูปแบบของการสั่นแบบ asymmetric and symmetric, เลขคลื่นที่ 995.77 cm^{-1} เป็นการสั่นของกลุ่ม acetate และในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ $963.79 - 742.55\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของกลุ่ม secondary cyclic alcohol และ olefins ตามลำดับ ซึ่งเลขคลื่นที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงถึงกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลคีนและแอลเคน

2) การวิเคราะห์จำนวนคาร์บอนของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

การวิเคราะห์จำนวนคาร์บอนและองค์ประกอบของน้ำมันพลาสติก แสดงดังตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ พบว่า น้ำมันพลาสติกทั้งที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีจำนวนคาร์บอน คือ $\text{C}_7\text{-C}_{13}$ มีองค์ประกอบของ normal alkanes, iso-alkanes and alkenes และไม่มีองค์ประกอบของ light alkanes, single ring aromatics ของจำนวนคาร์บอนในช่วง $\text{C}_4\text{-C}_6$ ที่จะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ gaseous fraction ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ แต่เมื่อทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น พบว่า น้ำหนักของจำนวนคาร์บอน $\text{C}_7\text{-C}_{13}$ มีองค์ประกอบของน้ำมันที่ลดลง ซึ่งเป็นไปได้ว่า น้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีนมีการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นลงและส่วนน้ำมันดีเซลมีจำนวนคาร์บอน คือ $\text{C}_4\text{-C}_7$ แสดงองค์ประกอบของ lighter alkenes ซึ่งไม่มีจำนวนคาร์บอนที่มากกว่า C_{12+} ที่แสดงถึง hydrocarbon และ waxes อ้างอิงงานวิจัยของ Itsaso Barbarias et al. (2015) และ Sivakumar P., Anbarasu K. (2012) ซึ่งองค์ประกอบที่หาได้ส่วนใหญ่เป็นพวก Parafins (alkane) ซึ่งจะคล้ายกับน้ำมันดีเซล ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาเป็นส่วนผสมกับน้ำมันดีเซลที่ใช้งานทั่วไปได้มากกว่า

ตารางที่ 2 จำนวนคาร์บอนและองค์ประกอบของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

จำนวนคาร์บอน	องค์ประกอบน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส (ร้อยละโดยปริมาตร)						องค์ประกอบ น้ำมันดีเซล (ร้อยละโดยปริมาตร)	
	ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา		เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก		เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก			
	n-paraffins	Isoparaffins	n-paraffins	Isoparaffins	n-paraffins	Isoparaffins	n-paraffins	Isoparaffins
C ₄	-	-	-	-	-	-	1.74	0.204
C ₅	-	-	-	-	-	-	8.44	32.6
C ₆	-	-	-	-	-	-	7.76	23.8
C ₇	-	10.9	-	6.75	-	5.40	2.02	9.44
C ₈	0.543	0.366	0.576	0.385	0.815	0.774	1.01	4.10
C ₉	1.94	31.4	2.00	32.6	1.94	40.6	0.34	4.54
C ₁₀	3.31	8.11	3.45	8.38	0.518	7.48	0.25	0.776
C ₁₁	0.151	9.50	0.156	10.4	0.149	11.8	0.13	0.654
C ₁₂	0.175	20.8	0.188	22.7	0.129	19.2	-	-
C ₁₃	0.144	2.76	0.150	2.93	0.325	2.56	-	-
รวม	6.26	83.8	6.52	84.1	3.88	87.8	21.7	76.1

4.5 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพลัสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันพลัสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 350 - 450 องศาเซลเซียส ด้วยการเปรียบเทียบน้ำมันมาตรฐานดีเซล แสดงดังตารางที่ 6 พบว่า ค่าของจุดวาบไฟอยู่ในช่วง 62.2 - 65.8 องศาเซลเซียส และค่าความหนืดอยู่ในช่วง 1.64 - 1.77 เซนติสโตก (Cst) การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์ของแข็งมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่สั้นขึ้น และสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนของของเหลวที่สังเคราะห์ได้ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ที่อุณหภูมิต่ำ จุดชุนที่มีค่าอยู่ในช่วง (-4.3) - (-7.2) องศาเซลเซียส ก็มีผลมาจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นพวกแอลคีนและแอลเคนซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว และค่าความถ่วงจำเพาะมีค่ามากกว่ามาตรฐานน้ำมันดีเซลซึ่งอยู่ในช่วง 0.90 - 0.93 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จึงมีผลทำให้ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 3 ผลคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพลัสติก

วิธีวิเคราะห์	ค่าการวิเคราะห์ (°C)			ดีเซล
	350	400	450	
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	65.8	64.3	62.2	41.3
จุดชุน (องศาเซลเซียส)	-4.3	-6.4	-7.2	-12.0
ความหนืด (เซนติสโตก)	1.64	1.75	1.77	1.40
ความถ่วงจำเพาะ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	0.93	0.91	0.90	0.84

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกลั่นน้ำมันพลัสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการกลั่นน้ำมันจากพลัสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิสการใช้การแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก และตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยแตกพันธะระหว่างคาร์บอนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้ขนาดของโมเลกุลเล็กลง พบว่า ที่อุณหภูมิในการกลั่นน้ำมันพลัสติก 450 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้ำหนักร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณของเหลวสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 48.0 โดยน้ำหนัก

5.2 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันจากพลัสติกพลัสติก

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันจากพลัสติก พบว่า ค่าผลทางความร้อนของน้ำมันที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 450 องศาเซลเซียส ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 45,459 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ค่าผลทางความร้อนของน้ำมันดีเซลมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 46,800 กิโลจูลต่อกิโลกรัม การวิเคราะห์ฟังก์ชันแนลกรุปทางเคมี พบว่า อยู่ในกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลคีนและแอลเคน เมื่อทำการวิเคราะห์จำนวนคาร์บอนของน้ำมันพลัสติกที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า มีจำนวนคาร์บอนในช่วง C₇-C₁₃ ส่วนน้ำมัน

ดีเซลมาตรฐานมีจำนวนคาร์บอนในช่วง C_4 - C_{11} ตามลำดับ และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ยังคงต้องมีการปรับปรุงให้ได้คุณภาพเทียบเคียงน้ำมันดีเซลมาตรฐาน ด้วยการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับโลหะบางตัวให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

จากงานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการเผยแพร่ให้ความรู้เกี่ยวกับพลังงานทดแทน แก่นักศึกษา องค์กรทั้งภาครัฐและเอกชน ให้ตระหนักถึงการนำพลาสติกกลับมาเป็นพลังงานให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา งบประมาณแผ่นดิน ปีการศึกษา 2558 ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

กรวิกา วงษ์ผาบ, กฤษณพล เล็กภูเขียว, กัญญาวิรุ อุ่นเสื่อ, ธราพงษ์ วิทิตศานต์ และอัญชลีพร วาริต สวัสดิ์ หล่อทองคำ. (2554). การแตกตัวของพลาสติกที่ใช้แล้วชนิดพอลิโพรพิลีนและ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงด้วย USY ซีโอไลต์. **การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรม เคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21**. อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

Kornvika wongpap, Kridsanapon Seakphukhew, Kanyawee Aunseua, Tharapong Vitidsant and Anchaleeporn Waritswat Lothongkum. (2011). Catalytic Cracking of Used Polypropylene and High-Density Polyethylene by USY Zeolite. The Twenty-one Chemical Engineering and Applied Chemistry of Thailand. Hat Yai Songkhla. (in thai)

ธัญญ์พิชา เอกบุศย์, ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และวลัยรัตน์ อุตตมะปรากรม. (2557). การศึกษา ศักยภาพการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกในประเทศไทย. **วารสารวิจัยพลังงาน สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปีที่ 11 ฉบับที่ 1**, หน้า 38-49.

Tanpitcha Ekabut, Prasert Reubroycharoen and Walairat Uttamaprakrom. (2014). A Study of Fuel Production Potential from Plastic Waste in Thailand. Journal of Energy Research, Energy Research Institute, Chulalongkorn. 12(1), 38-49. (in thai)

วิชชากร จารศิริ, สุพรทิพย์ ธนสินกิตติโชค และปฐมทัศน์ จิระเดชะ. (2554). การแตกตัวเชิงตัวเร่ง ตัวเร่งของพอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาฟลูออคตะไลติกแครกกิ้งใช้แล้ว. **การประชุมเชิงวิชาการ “ศรีนครินทร์วิโรฒวิชาการ” ครั้งที่ 5 (หน้า 4)**. นครนายก: มหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒ.

Witchakorn Charusiri, Supornthip Thanasinkitichot and Pathomthat Chiradeja. (2011). Catalytic Cracking of Polypropylene and Polystyrene over Spent Fluid Catalytic Cracking Catalyst. The fifth Srinakharinwirot Symposium (Page 4). Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok. (in thai)

- Akalın, M.K. and Karagoz, S. (2011). Tobacco residue pyrolysis. **BioResources**, Vol. 6(2), pp. 1773-805.
- Barbarias I., Artetxe M., Arregi A., Alvarez J., Lopez G., Amutio M. and Olazar M. (2015). Catalytic Cracking of HDPE Pyrolysis Volatiles over a Spent FCC Catalyst, **Chemical Engineering Transactions**. Vol 43, pp. 2029-2034.
- Bertero, M., Puente, G. and Sedran, U. (2012). Fuels from bio-oils: Bio-oil production from different residual sources, characterization and thermal conditioning. **Fuel**, Vol. 95, pp. 263-71.
- Bond, G.C. (1987), Heterogeneous Catalysis-Principles and Applications, 2nd ed., **Oxford Science Publications**.
- Kim, D. J., Dunn, B. C., Huggins, F., Huffman, G. P., Kang, M., Yie, J. E. and Eyring, E. M., (2006). SBA-15-Supported Iron Catalysts for Fischer-Tropsch Production of Diesel Fuel. **Energy&Fuels**. Vol. 20: pp. 2608-2611.
- Kraokaw, S., (2008). Selective production of higher hydrocarbons over cobalt support SBA-15 mesoporous silica catalysts, M.S. Thesis, Kasetsart University.
- Ma, C., Sun, L., Jin, L., Zhou, C., Xiang, J., Hu, S. and Su S. (2015). Effect of polypropylene on the pyrolysis of flame retarded high impact polystyrene. **Fuel Processing Technology**, Vol 135, pp. 150–156.
- Sarker, M. and Mamunor Rashid, M. (2014). Polypropylene waste plastic conversion into fuel oil by using thermal degradation with fractional process. **American Journal of Environment**, Vol 2, pp. 1-10.
- Sivakumar P., Anbarasu K. (2012). Catalytic pyrolysis of dairy industrial waste LDPE film into fuel. **International Journal of Chemistry Research**. Vol 3, Issue 1, pp. 52-55.
- Sonawane YB, Shindikar MR and Khaladkar MY. (2015). Use of catalyst in pyrolysis of polypropylene waste into liquid fuel. **International Research Journal of Environment Sciences**, Vol 4(7), pp. 24-28.
- Van Kasteren, J.M.N., Zhou Q. and Verberne A.H.A. (2009). Comparing pyrolysis behavior of virgin and waste plastics. **The 5th International Symposium on Feedstock Recycling (ISFR)**, October 11-14 2009, Chengdu, China.
- Xie, C., Liu, F., Yu, S., Xie F., Li, L, Zhang S. and Yang, J. (2008). Catalytic cracking of polypropylene into liquid hydrocarbons over Zr and Mo modified MCM-41 mesoporous molecular sieve, **Catalysis Communications**, Vol. 10, pp. 79–82.