

น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับใบอ้อยภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา DCC ที่ใช้แล้ว

Bio-oil Production From Co-Pyrolysis of Plastic Wastes and Sugarcane Leaves Under Spent DCC Catalyst

จันทวรรณ แสงจำปา (Jantaravan Sangjumpa)* ดร.วรินทร์ไพ เศรษฐ์ธนาบุตร (Dr.Varinrumpai Seithtanabutara)^{1**}

(Received: June 7, 2018; Revised: July 26, 2018; Accepted: July 31, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับใบอ้อย โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบแนวนอนที่ให้ความร้อนด้วยเตาเผาไฟฟ้า สภาวะที่ใช้ คือ อัตราส่วนขยะพลาสติกต่อใบอ้อย (P:B) เป็น 0:1 1:0 1:1 3:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาอุตสาหกรรม DCC ที่ใช้แล้ว 0-20% โดยน้ำหนัก และทำการไพโรไลซิสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ 400-600 °C พบว่า การสลายตัวเชิงความร้อนในระหว่างการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของวัตถุดิบและอุณหภูมิ การไพโรไลซิสร่วม P:B ที่อัตราส่วน 3:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ 600 °C จะให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว 47.67% โดยน้ำหนัก และเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้ผลได้ลดลง อย่างไรก็ตาม เส้นโค้ง FTIR แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมจะมีโครงสร้างใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและน้ำมันแก๊สโซลีนเชิงการค้า เมื่อทำการไพโรไลซิสร่วม P:B ที่อัตราส่วน 3:1 ที่ 600 °C ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เหลวสูงขึ้นเป็น 78.23 และ 85.97 MJ/kg ตามลำดับ จากการตรวจสอบด้วย GC-MS ทำให้ทราบว่าผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสร่วม P:B ที่อัตราส่วน 1:1 และ 3:1 ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ที่ 600 °C จะมีการกระจายตัวขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนอะลิฟาติกที่มากขึ้น ในช่วง C₉-C₂₁

ABSTRACT

This research aims to study the co-pyrolysis of plastic waste and sugarcane leaves by operating in a horizontal fixed bed reactor heated by an electrical furnace. The pyrolysis conditions were the weight ratio of plastic waste to sugarcane leaves (P:B) of 0:1 1:0 1:1 3:1 and 1:3, spent DCC catalyst amount of 0-20wt% and maintaining for 3 h at a pyrolysis temperature of 400-600 °C. It was found that thermal degradation depended on the material ratio and the pyrolysis temperature. The noncatalytic co-pyrolysis of 3:1 (P:B) gave high liquid product yield of 47.67wt%. Addition of catalyst in co-pyrolysis decreased the liquid product yield. However, FTIR curves of liquid product from co-pyrolysis showed similarities with those of commercial diesel and gasoline. Liquid products with high heating values of 78.23 and 85.97 MJ/kg were obtained from the co-pyrolysis of 3:1 (P:B) at 600 °C with catalyst amount of 5 and 10wt%, respectively. GC-MS analysis showed that the liquid product obtained from the co-pyrolysis at 600 °C for the 1:1 (P:B) and 3:1 (P:B) with the 5 and 10wt% catalyst, respectively, increased the light aliphatic hydrocarbon distribution of the range C₉-C₂₁.

คำสำคัญ: การไพโรไลซิสร่วม น้ำมันชีวภาพ ตัวเร่งปฏิกิริยา DCC ที่ใช้แล้ว

Keywords: Co-pyrolysis, Bio-oil, Spent deep catalytic cracking

¹ Correspondent author: tmallika@kku.ac.th

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



บทนำ

ในปัจจุบัน อัตราการใช้พลังงานสูงขึ้นตามจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แหล่งพลังงานหลักของโลก คือพลังงานปิโตรเลียมและฟอสซิลมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง ก่อให้เกิดปัญหาความยั่งยืนทางด้านพลังงานและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามไปด้วย ดังนั้นแหล่งพลังงานทดแทน (renewable energy) และพลังงานทางเลือก (alternative energy) จึงได้รับความสนใจมากขึ้น [1] พลังงานชีวมวลเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจอย่างยิ่งเนื่องจากหาง่าย ราคาถูก มีปริมาณคาร์บอนคงตัว ไม่ส่งผลให้เกิดสภาวะโลกร้อน จึงเป็นพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ขยะพลาสติกยังเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจเช่นกัน เนื่องจากเป็นขยะปิโตรเคมีขั้นสุดท้ายที่สามารถแปลงผันกลับให้เป็นพลังงานได้ ขยะพลาสติกส่วนใหญ่จะมาจากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน ซึ่งมีปริมาณสูงขึ้นทั่วโลกตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ขยะที่ทิ้งตามบ้านเรือนเหล่านี้จึงเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพ เพราะมีองค์ประกอบเป็นสารไฮโดรคาร์บอนถึงเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากขยะพลาสติกถูกย่อยสลายทางธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ได้ยาก จึงก่อให้เกิดปัญหาด้านการกำจัด และด้านสิ่งแวดล้อมตามมา [2] ดังนั้น เทคโนโลยีการเปลี่ยนขยะชีวมวลและขยะพลาสติกให้เป็นพลังงานจึงได้รับความสนใจอย่างมาก เทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการแปลงผันพลังงานจากขยะเหล่านี้ คือกระบวนการทางเคมีความร้อน (thermochemical process) [3] โดยพลังงานที่ได้จะอยู่ในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ แก๊ส ของแข็ง และของเหลว ในปัจจุบันได้มีความพยายามในการผลิตเชื้อเพลิงจากขยะชีวมวลและขยะพลาสติก โดยใช้กระบวนการทางเคมีความร้อนที่เรียกรวมกันว่า กระบวนการพีจีแอล (PGL Process) ซึ่งย่อมาจากกระบวนการย่อย 3 กระบวนการ คือ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และลิกวิแฟกชัน (Liquefaction) โดยทั้งสามกระบวนการนี้มีความคล้ายคลึงกันคือ เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่สสารเพื่อสลายโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลง แต่ด้วยเงื่อนไขของแต่ละกระบวนการแตกต่างกัน จึงทำให้การกระจายผลผลิตแต่ละชนิดแตกต่างกันไปด้วย การไพโรไลซิสจะดำเนินการในบรรยากาศปกติที่ปราศจากออกซิเจน โดยให้ผลผลิตหลักที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว (liquid fuel) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะทำในสภาวะที่จำกัดออกซิเจน โดยให้ผลผลิตหลักเป็นแก๊สสังเคราะห์ (Syn gas หรือ producer gas) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนการทำลิกวิแฟกชันนั้นจะดำเนินการในสภาวะความดันไว้ออกซิเจน โดยอาจจะมีการเติมตัวทำละลายเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ความดัน (autoclave reactor) ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวเป็นผลิตภัณฑ์หลัก [4]

น้ำมันชีวภาพชีวมวล (Bio-oil) และน้ำมันพลาสติก (Plastic oil) จากการแปลงผันขยะด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวทดแทน พบว่าจะเกิดการแยกตัวกันระหว่างน้ำมันทั้ง 2 ชนิด หลังการจัดเก็บระยะเวลาสั้นๆ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูง ดังนั้นการไพโรไลซิสร่วม (co-pyrolysis techniques) จึงได้รับความสนใจ เพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำมันไพโรไลซิสที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) มากขึ้น และมีคุณภาพความเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้นกว่าน้ำมันชีวภาพชีวมวล [5-6] เนื่องจากขยะพลาสติกเป็นแหล่งไฮโดรคาร์บอนที่มีปริมาณสูง เมื่อนำมาทำการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกและขยะชีวมวลจะเกิดการสลายตัวทางความร้อน โดยโมเลกุลของพลาสติกจะทำหน้าที่เติมไฮโดรเจน (H-donor) ให้แก่วัสดุ ทำให้ได้ผลผลิตน้ำมันชีวภาพที่มีความเป็นไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย เพื่อให้เกิดการแตกสลายโครงสร้างชีวมวลและพลาสติกได้ดีขึ้น โครงสร้างทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของชีวมวลและพลาสติก และเงื่อนไขต่างๆ ของกระบวนการ เช่น คุณลักษณะของกระบวนการ ความต้องการด้านผลผลิต และหลักเศรษฐศาสตร์ ตามลำดับ [2,7-9]

เนื่องจากไบโอดีเป็นกากเกษตรกรรมจากไร่ไผ่ที่มีปริมาณมาก มีค่าความร้อน และปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูง จึงเหมาะสำหรับการนำมาแปลงผันเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการไพโรไลซิส แต่ยังไม่พบงานวิจัยเกี่ยวกับการไพโรไลซิสร่วมระหว่างไบโอดีและขยะพลาสติก ดังนั้น การศึกษานี้ จึงสนใจลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมระหว่างขยะพลาสติกกับไบโอดี ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาอุตสาหกรรม DCC ที่ใช้แล้ว (Spent Deep Catalytic Cracking) โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสร่วมจะถูกประเมิน ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จะถูกนำมาตรวจสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง โครงสร้าง และองค์ประกอบ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและสัดส่วนการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับไบโอดี บนตัวเร่งปฏิกิริยา
2. เพื่อวิเคราะห์สมบัติความเป็นเชื้อเพลิง โครงสร้าง และองค์ประกอบของน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับไบโอดี บนตัวเร่งปฏิกิริยา

วัสดุ/วิธีการวิจัย

1. วัสดุและการเตรียมวัตถุดิบ

ไบโอดี ได้รับความอนุเคราะห์มาจากชาวไร่ อำเภอนองเรือ จังหวัดขอนแก่น การเตรียมไบโอดี นำไบโอดีมาตากแดด 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดเพื่อให้มีขนาดเล็ก และแยกขนาดให้มีขนาดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร นำไปบดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ก่อนที่จะทำการไพโรไลซิสร่วมกับขยะพลาสติก ซึ่งเม็ดขยะพลาสติก ได้รับความอนุเคราะห์มาจากบริษัท ขอนแก่นพลาสติกประชาสโมสร จำกัด (จังหวัดขอนแก่น) ประเทศไทย เม็ดขยะพลาสติกรวบรวมมาจากพลาสติกที่ตกหล่นระหว่างการผลิตของแต่ละกระบวนการ มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเม็ดพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ และที่เหลือเป็นเม็ดพลาสติกประเภทพอลิโพรพิลีน (PP) และเม็ดขยะพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) เม็ดขยะแต่ละชนิดมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 มิลลิเมตร ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาอุตสาหกรรม Deep Catalytic Cracking (DCC) ที่ใช้แล้ว ได้รับความอนุเคราะห์มาจากโรงกลั่นน้ำมันแห่งหนึ่งที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง โดยจะถูกนำมาฟื้นฟูประสิทธิภาพการเผาด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์แบบปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง) และค่าความร้อนของเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดี แสดงไว้ในตารางที่ 1 การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value) ของเม็ดขยะพลาสติก ไบโอดี และผลิตภัณฑ์เหลวจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bomb calorimeter (Gallenkamp, ประเทศอังกฤษ) ตัวอย่างที่ใช้ 1 มิลลิกรัม เผาในที่ที่มีแก๊สออกซิเจน 20 บาร์ เพื่อหาค่าความร้อนสูง (Higher heating value) ตามมาตรฐาน ASTM D240

วัตถุดิบผสมระหว่างขยะพลาสติกกับไบโอดีที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนัก (0:1 1:0 1:1 3:1 และ 1:3) จะถูกนำไปตรวจสอบพฤติกรรมการสลายตัวเชิงความร้อน เพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสร่วม โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) (รุ่น TGA 50, Shimadzu, ประเทศญี่ปุ่น) ตัวอย่างที่ใช้ประมาณ 15-20 มิลลิกรัม เบ้าที่ใช้ตัวอย่างเป็นแพลตตินัม (Platinum) อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิห้องถึง 700 องศาเซลเซียส คงที่ 20 นาที



ตัวเร่งปฏิกิริยา DCC ที่ใช้แล้ว (Spent Deep catalytic cracking) จะถูกนำมาวิเคราะห์หาโครงสร้างความเป็นรูพรุน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Pore size diameter) พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Surface area) และปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) เทคนิค N_2 Adsorption-Desorption โดยใช้เครื่อง The BrunauerEmmett-Telle (BET) (รุ่น ASAP2460, Micromeritics, ประเทศสหรัฐอเมริกา) และวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิว (Morphology) และธาตุเชิงปริมาณ จะถูกตรวจสอบโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-ray Techniques (SEM/EDX) (รุ่น S-3000N, Hitachi, ประเทศญี่ปุ่น) แสดงไว้ในตารางที่ 2

2. การไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสจะดำเนินการในท่อปฏิกรณ์ชนิดเหล็กสแตนเลส (stainless steel) ดังรูปที่ 1 มีความยาว 50 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.5 เซนติเมตร วัสดุดิบจะถูกบรรจุลงในท่อด้วยปริมาณ 100 กรัม โดยทำการไพโรไลซิสภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน 300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเป้าหมายเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แก๊สในไนโตรเจนจะไหลผ่านทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์และอัตราการไหลจะถูกปรับด้วยโรตารี่เมตร ส่วนอุณหภูมิจะถูกควบคุมด้วย PID controller ให้อ่อนจากการไพโรไลซิสจะถูกควบคุมด้วยถังน้ำแข็งได้เป็นผลิตภัณฑ์เหลว ส่วนไอที่ไม่ควบแน่นไม่ได้จะถูกดักด้วยอ่างน้ำ ในการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน เพื่อหาอุณหภูมิ และอัตราส่วนของขยะพลาสติกต่อไบโอดีที่ที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสร่วม

เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับไบโอดี โดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุดิบที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนัก (ขยะพลาสติกต่อไบโอดี 0:1 1:0 1:1 3:1 และ 1:3) จะถูกดำเนินการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส หลังจากทำการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์เหลว จะทำการประเมินหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับไบโอดี จากนั้นวัสดุดิบขยะพลาสติกต่อไบโอดีที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนัก (ขยะพลาสติกต่อไบโอดี 1:0 0:1 1:1 3:1 และ 1:3) จะถูกนำมาไพโรไลซิสที่อุณหภูมิเหมาะสมดังกล่าวภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา DCC ที่ใช้แล้ว (Spent Deep catalytic cracking) โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุดิบ ทำการวิเคราะห์หาการกระจายผลผลิตที่ได้จากแต่ละสภาวะการทดลอง โดยผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็งหลังการไพโรไลซิสจะถูกรวบรวมและชั่งน้ำหนัก ซึ่งผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดแสดงในสมการที่ 1 ผลิตภัณฑ์ของเหลวจะถูกนำไปเก็บไว้เพื่อวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะในลำดับต่อไป

$$\begin{aligned} \% \text{ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว} (y_l) &= \frac{W_l}{W_o} \times 100 \\ \% \text{ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง} (y_s) &= \frac{W_s}{W_o} \times 100 \end{aligned} \quad (1)$$

$\% \text{ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแก๊ส} (y_g) = W_o - (\% \text{ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว} + \% \text{ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง})$
โดยที่ W_o = วัสดุดิบ หน่วยเป็น กรัม

W_l = ผลิตภัณฑ์ของเหลว หน่วยเป็น กรัม

W_s = ผลิตภัณฑ์ของแข็ง หน่วยเป็น กรัม

W_g = ผลิตภัณฑ์แก๊ส หน่วยเป็น กรัม

3. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลว

ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่รวบรวมได้จากแต่ละสภาวะของการไพโรไลซิสจะถูกนำมาตรวจสอบหาความร้อน (Heating value) ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ของเหลวจะถูกนำมาผสมกับตัวทำละลาย n-pentane เพื่อแยกส่วนของแก๊สที่ไม่ละลายออกไป จากนั้นน้ำมันที่ละลายใน n-pentane จะถูกนำมาแยกเอาส่วนที่เป็นน้ำมันอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic

hydrocarbon fraction) ด้วยตัวทำละลาย n-pentane โดยวิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟีผ่านชั้นอนุภาคซิลิกาที่มีขนาด 70-230 เมช ซึ่งซิลิกาจะถูกนำไปอบกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนนำไปบรรจุในคอลัมน์น้ำมันอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่แยกได้จะถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของสารอินทรีย์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) (รุ่น TENSOR27, Bruker, ประเทศเยอรมนี) และวิเคราะห์หาสารประกอบอินทรีย์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometer (GC-MS) (รุ่น GCMS-QP2010, Shimadzu, ประเทศญี่ปุ่น)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. การสลายตัวเชิงความร้อนของเม็ดขยะพลาสติกกับไบอ้อย

จากการวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อนของขยะพลาสติกกับไบอ้อยที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงด้วยเส้นโค้ง TGA ดังรูปที่ 2 พบว่า ไบอ้อยจะมีการสลายตัวทางความร้อนอยู่ 4 ช่วง คือ ช่วงแรกจะเป็นการสูญเสีย น้ำ (Dehydration) ในช่วงอุณหภูมิ 32-200 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่มีการสูญเสียความชื้นออกจากไบอ้อย ช่วงที่ 2 เป็นช่วงของการเกิดคาร์บอนในเซชัน (Carbonization) ในช่วงอุณหภูมิ 200-320 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่มีการสูญเสียสารระเหยเป็นส่วนใหญ่ ช่วงที่ 3 เป็นช่วงของคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ในช่วงอุณหภูมิ 320-500 องศาเซลเซียส เป็นช่วงของการสลายตัวของลิกนินและคาร์บอนคงตัว และช่วงสุดท้าย เป็นช่วงที่มีการเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ มีปริมาณเชื้อเพลิงประมาณ 6% โดยน้ำหนัก [10] ส่วนขยะพลาสติกจะเริ่มมีการสลายตัวทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 250-520 องศาเซลเซียส จะเห็นว่า เม็ดขยะพลาสติกจะมีการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าไบอ้อย เนื่องจากไบอ้อยจะมีการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นเมื่อสัดส่วนของไบอ้อยมีปริมาณเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการควบแน่นและสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ หากสัดส่วนของขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นจะทำให้กากของแข็งมีน้อยลงหลังจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสุดท้าย ในกระบวนการสลายตัวเชิงความร้อนนี้จะเกิดการแตกตัวของอนุมูลอิสระเริ่มต้นแล้วมีการจัดเรียงสายโซ่ของอนุมูลอิสระเหล่านี้จนสิ้นสุด องค์ประกอบหลักเซลล์ulos ของไบอ้อยจะถูกไพโรไลซิสทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ประกอบด้วยการรวมตัวของอนุมูลอิสระ ซึ่งมีพันธะทางเคมีประกอบด้วยออกซิเจน ปฏิกิริยาการคายน้ำออกจากเซลล์ulos จะทำให้เกิดถ่านชาร์ ซึ่งจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการไพโรไลซิส ขณะเดียวกันขยะพลาสติกจะมีการสลายตัวพอลิเมอร์ เกิดการถ่ายเทไฮโดรเจนจากสายโซ่พอลิโอลิฟินไปยังอนุมูลของชีวมวลทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักที่มากขึ้นและได้ถ่านชาร์ที่น้อยลง [11] ในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้เลือกศึกษาอุณหภูมิการไพโรไลซิสร่วมในช่วงระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ของขยะพลาสติกและไบอ้อยเพื่อทำการรวบรวมผลิตภัณฑ์เหลวและตรวจสอบสมบัติในขั้นตอนต่อไป

2. ผลของการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบอ้อยต่อการกระจายผลผลิต

การกระจายผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับไบอ้อยที่อุณหภูมิต่าง ๆ (รูปที่ 3) แสดงให้เห็นว่า การไพโรไลซิสไบอ้อยอย่างเดียว ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสจะให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดถึง 35.42% แต่จะลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิการไพโรไลซิสที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการสลายตัวขั้นที่สองของผลิตภัณฑ์ของเหลวร่วมกับปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ในการไพโรไลซิสขยะพลาสติกอย่างเดียวจะเห็นว่า ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส จะให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ใกล้เคียงกันคือ 47.58 และ 48.78% ตามลำดับ เนื่องจากพลาสติกจะมีการสลายตัวสร้างสสารที่อุณหภูมิ

สูงกว่าการสลายตัวของไบอ้อย เมื่อทำการไพโรไลซิสร่วม ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนวัตถุดิบและอุณหภูมิของการไพโรไลซิส เมื่อสัดส่วนพลาสติกเพิ่มขึ้นจะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการแตกสลายให้



เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดถึง 47.67% เมื่อทำการไพโรไลซิสที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นผลเนื่องจาก ปฏิกิริยาข้ามกัน (cross reaction) ระหว่างขะพลาสติกกับไบออย โดยการสลายตัวทางความร้อนของขะพลาสติกจะเกิดการถ่ายเทอะตอมไฮโดรเจนและการสร้างอนุมูลอิสระ พร้อม ๆ กับ การสลายตัวของกลุ่มฟังก์ชันที่เชื่อมต่อกันในโครงสร้างเซลลูโลสของไบออย จึงมีการสอดแทรกหรือถ่ายเทอะตอมไฮโดรเจน ทำให้ช่วยยับยั้งการปลดปล่อยแก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และก่อให้เกิดสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในรูปของน้ำมันนั่นเอง [12]

ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส สำหรับการไพโรไลซิสร่วมขะพลาสติกกับไบออยภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา DCC ที่ใช้แล้ว เพื่อหาอัตราส่วนวัตถุดิบที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ของเหลวในการกระบวนการไพโรไลซิส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดซีโอไลต์ [13] พบว่า การไพโรไลซิสร่วม ที่ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา DCC ที่ใช้แล้ว จะทำให้ผลได้ผลิตภัณฑ์เหลวที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสัดส่วนวัตถุดิบและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ดังรูปที่ 4 ทั้งนี้ เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมในการไพโรไลซิส จะเกิดการแตกสลายตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนได้มากขึ้น ส่งผลให้ได้น้ำมันที่มีคุณภาพดีขึ้นถึงแม้ผลได้น้ำมันจะลดลงก็ตาม จากการไพโรไลซิสร่วมสำหรับการศึกษานี้ เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ร่วมการไพโรไลซิสขะพลาสติกต่อไบออยที่สัดส่วน 3:1 จะให้ผลได้ผลิตภัณฑ์เหลวสูงกว่าการใช้สัดส่วนอื่น ๆ และการไพโรไลซิสขะพลาสติกต่อไบออยที่สัดส่วน 1:1 ร่วมตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณดังกล่าว จะให้ผลได้ผลิตภัณฑ์เหลวที่ใกล้เคียงกับการไพโรไลซิสร่วมโดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงจะทำการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากเงื่อนไข เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสเดี่ยวและการไพโรไลซิสร่วมของขะพลาสติกและไบออยทั้งที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมและปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา

3. ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขะพลาสติกกับไบออย

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขะพลาสติกกับไบออย

น้ำมันชีวภาพจากชีวมวลโดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มและมีปริมาณน้ำ 10-25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [14] ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสร่วมขะพลาสติกกับไบออยในการศึกษานี้ จะมีสีน้ำตาลอ่อนมากขึ้นหากใช้สัดส่วนขะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น และมีปริมาณไขมันน้ำตาลปรากฏอยู่เนื่องจากการสลายตัวของขะพลาสติกนั่นเอง ซึ่งปริมาณไขมันจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนพลาสติกเช่นกัน จากการไพโรไลซิสที่ 600 องศาเซลเซียส โดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไบออยอย่างเดียวจะมีความเป็นกรดสูง จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง อีกทั้ง ยังมีค่าความร้อนที่ต่ำ (12.50 MJ/kg) กว่า ค่าความร้อนของของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสขะพลาสติกอย่างเดียว (46.85 MJ/kg) เมื่อนำขะทั้งสองชนิดมาทำการไพโรไลซิสร่วม จะให้ผลิตภัณฑ์เหลวที่มีค่าความร้อนสูงกว่าของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไบออยอย่าง จากการไพโรไลซิสร่วมภายใต้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 5 และ 10% โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เหลวสูงขึ้น เช่นเดียวกัน เมื่อใช้สัดส่วนขะพลาสติกและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เหลวเพิ่มขึ้นตามไปด้วยทั้งการไพโรไลซิสที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมขะพลาสติกกับไบออยที่สัดส่วน 1:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 และ 10% โดยน้ำหนัก จะมีค่าความร้อนเป็น 42.90 และ 58.55 MJ/kg ตามลำดับ เมื่อใช้ขะพลาสติกกับไบออยที่สัดส่วน 3:1 ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 และ 10% โดยน้ำหนัก จะให้ผลิตภัณฑ์เหลวที่มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 78.23 และ 85.97 MJ/kg ตามลำดับ ถึงแม้ ค่าความร้อนที่วิเคราะห์ได้นี้สามารถยืนยันความเป็นเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสร่วมภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม ใน

การศึกษานี้ได้มีการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนส่วนอะลิฟาติกของผลิตภัณฑ์เหลวดังกล่าว เปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงทางการค้า เพื่อให้เป็นผลสนับสนุนคุณสมบัติเชื้อเพลิงนี้

3.2 การวิเคราะห์กลุ่มฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซล

จาก FTIR spectra ของผลิตภัณฑ์ของเหลวส่วนอะลิฟาติกที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซลอัตราส่วนต่างๆ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นว่า ส่วนอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการไพโรไลซิสไบโอดีเซลอย่างเดียว จะไม่ปรากฏกลุ่มฟังก์ชันประเภทสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยจะมีโครงสร้างที่แตกต่างอย่างชัดเจนกับส่วนอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการไพโรไลซิสขยะพลาสติกอย่างเดียวและที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซล ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีอะโรมาติกน้อย [15] จากการเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกันของโครงสร้างผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้กับน้ำมันเชิงการค้า พบว่า ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสไบโอดีเซลอย่างเดียวไม่มีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับน้ำมันเชิงการค้า ซึ่งแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสขยะพลาสติกอย่างเดียวที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล (97.79%) มากกว่าน้ำมันแก๊สโซลีน (56.51%) ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซลอัตราส่วน 1:1 และ 3:1 จะยังคงมีโครงสร้างใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสขยะพลาสติกอย่างเดียว โดยมีความใกล้เคียงน้ำมันดีเซลเป็น 96.08 และ 97.76% ตามลำดับ เมื่อนำส่วนอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนของที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซลภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 5 และ 10% โดยน้ำหนัก มาตรวจสอบโครงสร้าง จะได้ FTIR spectra ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่า โครงสร้างประกอบด้วยกลุ่มฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซลอัตราส่วน 1:1 และ 3:1 จะมีโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากขึ้น อยู่ในช่วงระหว่าง 97-99%

เมื่อทำการจำแนกผลการวิเคราะห์ FTIR spectra ของผลิตภัณฑ์อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนเหลวจากกระบวนการไพโรไลซิส (ตารางที่ 3) พบว่า ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไบโอดีเซลอย่างเดียว จะปรากฏกลุ่มฟังก์ชันของ O-H stretch อยู่ในช่วง $3500-3200\text{ cm}^{-1}$ เป็นแอลกอฮอล์และฟีนอล กลุ่มฟังก์ชันของ C=O stretch อยู่ในช่วง $1760-1665\text{ cm}^{-1}$ เป็นกรดคาร์บอกซิลิก และกลุ่มฟังก์ชันของ C-O stretch อยู่ในช่วง $1320-1000\text{ cm}^{-1}$ เป็นแอลกอฮอล์ กรดคาร์บอกซิลิก และเอสเทอร์ ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้ จะไม่ปรากฏในช่วงสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสขยะพลาสติกและที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซล แต่สเปกตรัมทั้งหมดจะประกอบด้วยพีคของแอลเคนและแอลคีน ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันของ C-H อยู่ในช่วง $3000-2850\text{ cm}^{-1}$ และ $1470-1450\text{ cm}^{-1}$ เป็นแอลเคน ส่วนกลุ่มฟังก์ชันของ C=C อยู่ในช่วง $1680-1640\text{ cm}^{-1}$ เป็นแอลคีน

3.3 การวิเคราะห์ GC-MS ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซล

วิเคราะห์ GC-MS ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซล และปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลว แสดงดังตารางที่ 4 โดยวิธีการหาพื้นที่ (เปอร์เซ็นต์) เป็นแบบเชิงกึ่งปริมาณ พบว่า โครมาโตแกรมแสดงการกระจายตัวของคาร์บอนตั้งแต่ C_6 ถึง C_{27} ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสไบโอดีเซลมีของฟีนอลสูงถึง 89.48% และกลีโคล (10.52%) ซึ่งแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสขยะพลาสติกและผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซลจะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนและแอลคีน โดยไม่พบสารประกอบฟีนอล (ดังรูปที่ 7) จะเห็นว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะมีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลต่ำชนิดแอลเคนและแอลคีนมากขึ้น เนื่องจากการแตกสลายไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักได้ดีขึ้น และเมื่ออัตราส่วนของขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นในการไพโรไลซิสร่วมภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มากขึ้นในส่วนอะลิฟาติกนี้ จากการไพโรไลซิสร่วมเม็ดขยะพลาสติกกับไบโอดีเซลอัตราส่วน 3:1 ด้วยการ



แตกสลายภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา DCC ที่ใช้แล้ว ปริมาณ 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก จะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีการกระจายตัวของคาร์บอนมากขึ้น ในช่วง C_9-C_{21} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้นี้จะมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวมากขึ้น และสนับสนุนการก่อตัวของไฮโดรคาร์บอนอิมัลชันได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [15]

สรุปผลการวิจัย

จากการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับไบโอดีเซล พบว่า การสลายตัวเชิงความร้อนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของวัตถุดิบและอุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จะมีโครงสร้างใกล้เคียงกับน้ำมันเชิงการค้า เมื่อทำการไพโรไลซิสร่วมระหว่างขยะพลาสติกและไบโอดีเซลที่อัตราส่วน 3:1 ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ที่ 600 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เหลวสูงขึ้นไปเป็น 78.23 และ 85.97 MJ/kg ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกและไบโอดีเซลที่อัตราส่วน 1:1 และ 3:1 ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ที่ 600 องศาเซลเซียส จะมีการกระจายตัวขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนอะลิฟาติกชนิดแอลเคนและแอลคีนที่มากขึ้นในช่วง C_9-C_{21}

เอกสารอ้างอิง

1. Oh SY, Seo YD. Polymer/biomass-derived biochar for use as a sorbent and electron transfer mediator in environmental applications. *Bioresour Technol.* 2016; 218: 77-83.
2. Anuar Sharuddin SD, Abnisa F, Wan Daud WMA, Aroua MK. A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management.* Pergamon. 2016; 115: 308-326.
3. Gollakota ARK, Reddy M, Subramanyam MD, Kishore N. A review on the upgradation techniques of pyrolysis oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* Pergamon. 2016; 58: 1543-1568.
4. Jitkarnka S. Bio-oil from plastic waste and tire old. *Petroleum and Petrochemical College.* 2010; 1-8. Thai.
5. Kim H, Choi SJ, Kim JM, Jeon JK, Park SH, Jung SC, et al. Catalytic copyrolysis of particle board and polypropylene over Al-MCM-48. *Mater Res Bull.* 2016; 82: 61-66.
6. Bhattacharya P, Steele PH, Hassan EBM, Mitchell B, Ingram L, Pittman CU. Wood/plastic copyrolysis in an auger reactor: Chemical and physical analysis of the products. *Fuel.* 2009; 88(7): 1251-1260.
7. Chen GB, Li YH, Chen GL, Wu WT. Effects of catalysts on pyrolysis of castor meal. *Energy.* 2017; 119: 1-9.
8. Cordero-Lanzac T, Palos R, Arandes JM, Castaño P, Rodríguez-Mirasol J, Cordero T, et al. Stability of an acid activated carbon based bifunctional catalyst for the raw bio-oil hydrodeoxygenation. *Appl Catal B Environ.* 2017; 203: 389-399.
9. Naqvi SR, Uemura Y, Yusup SB. Catalytic pyrolysis of paddy husk in a drop type pyrolyzer for bio-oil production: The role of temperature and catalyst. *J Anal Appl Pyrolysis.* 2014; 106: 57-62.
10. Jutakradsada P, Sriprasoeed R, Patikarnmonthon N, Kamwilaisak K. Comparison Study of Sugarcane Leaves and Corn Stover as a Potential Energy Source in Pyrolysis Process. *Energy Procedia.* 2016; 100: 26-29.
11. Chattopadhyay J, Pathak TS, Srivastava R, Singh AC. Catalytic co-pyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET (polyethylene terephthalate)) and product analysis. *Energy.* 2016; 103: 513-521.

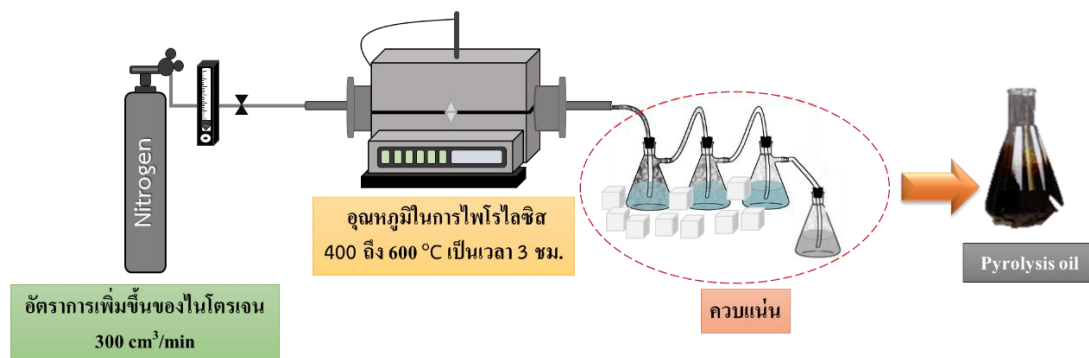
12. Chen W, Shi S, Zhang J, Chen M, Zhou X. Co-pyrolysis of waste newspaper with high-density polyethylene: Synergistic effect and oil characterization. *Energy Convers Manag.* 2016; 112: 41-48.
13. Zhou P. Deep catalytic cracking (DCC) technology. *Petrochemical Technol.* 1997; 26(8).
14. Uzun BB, Apaydin-Varol E, Ateş F, Özbay N, Pütün AE. Synthetic fuel production from tea waste: Characterisation of bio-oil and bio-char. *Fuel.* 2010; 89(1): 176-184.
15. Dewangan A, Pradhan D, Singh RK. Co-pyrolysis of sugarcane bagasse and low-density polyethylene: Influence of plastic on pyrolysis product yield. *Fuel.* 2016; 185: 508-516.

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์แบบปริมาณ (%น้ำหนักแห้ง) และค่าความร้อนของเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและไบโอยล์

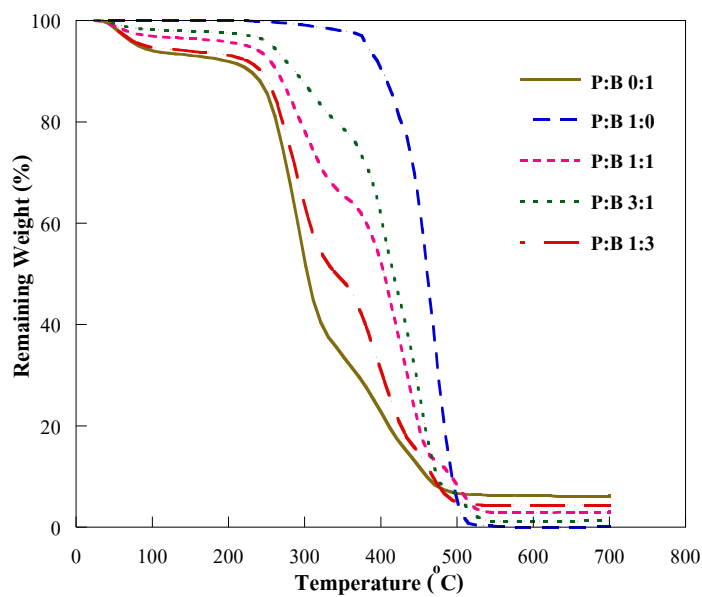
ตัวอย่าง	การวิเคราะห์แบบปริมาณ (%น้ำหนักแห้ง)				ค่าความร้อน (MJ/kg)
	ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอนคงที่	จีเส้า	
เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	-	99.95	-	0.05	47.43
ไบโอยล์	6.31	58.18	29.41	6.10	15.80

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา DCC ที่ใช้แล้ว

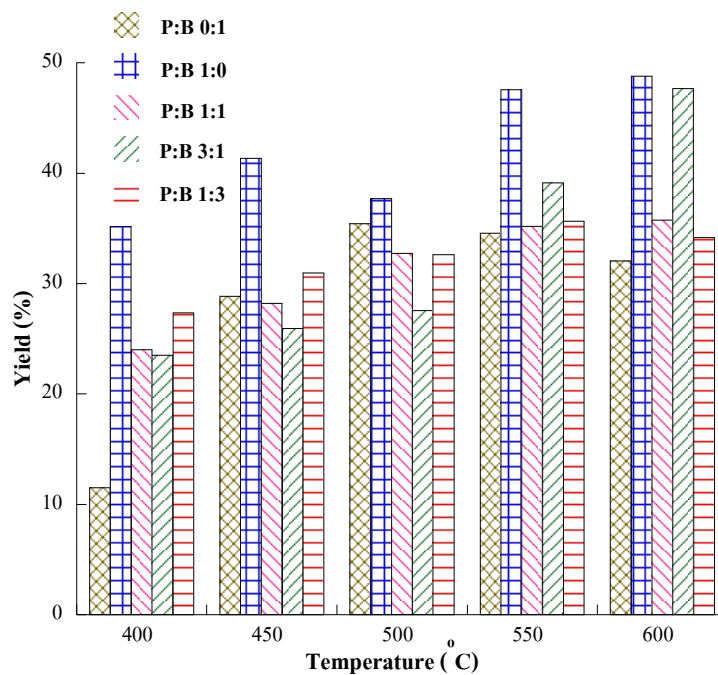
โครงสร้างรูพรุน			องค์ประกอบของธาตุ (wt%)					
พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุน (nm)	C	O	Al	Si	Fe	Ni
122.0119	0.122214	4.0707	31.21	48.57	11.64	7.69	0.58	0.31



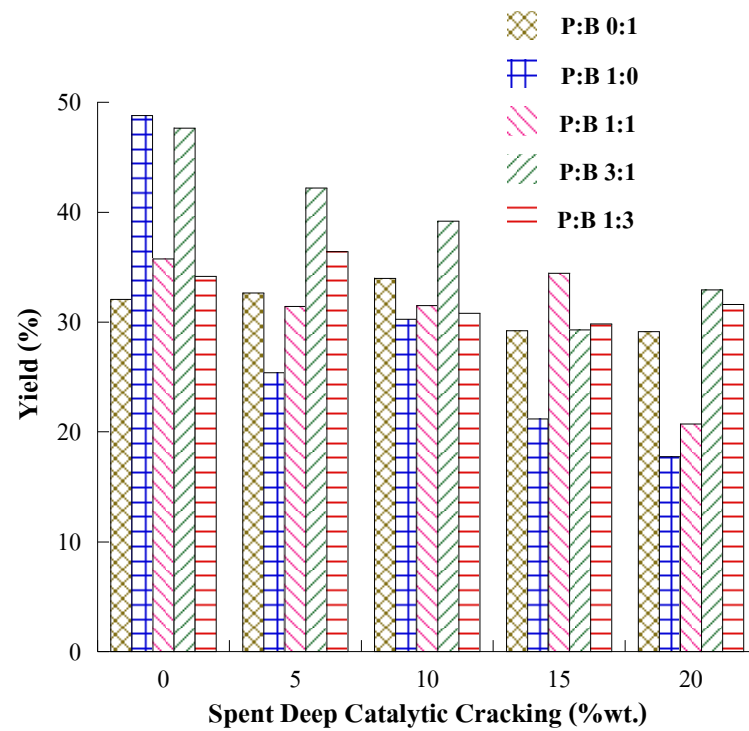
ภาพที่ 1 แผนภาพการดำเนินการไพโรไลซิส



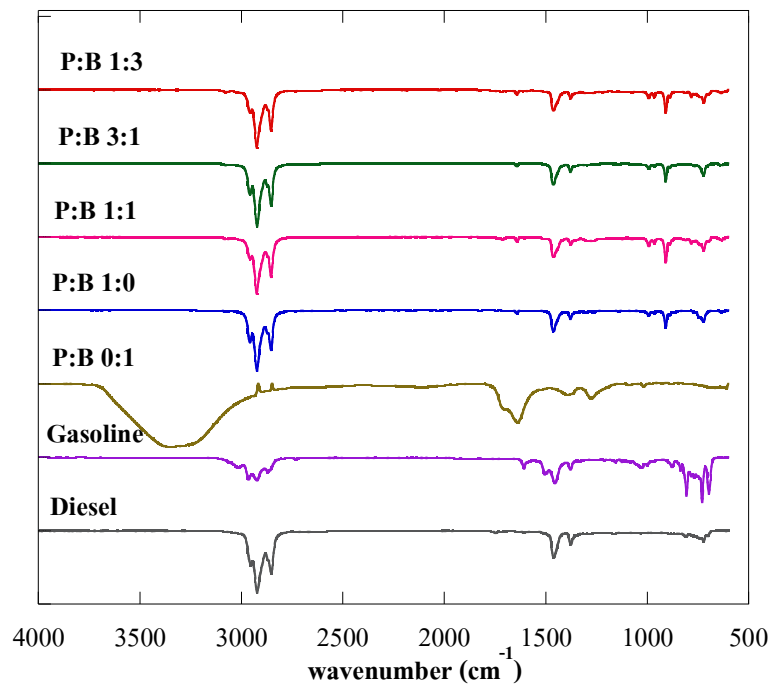
ภาพที่ 2 การสลายตัวทางความร้อนของเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงต่อไบออยที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักแตกต่างกันด้วยเครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer (TGA)



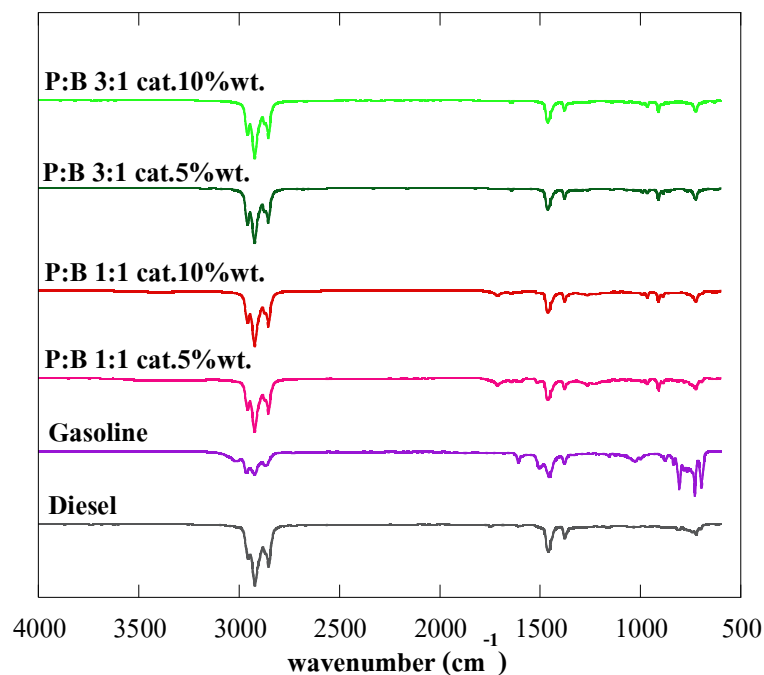
ภาพที่ 3 ผลได้ผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับไบออยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 4 ผลได้ผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับไบโอดีเซลที่ 600°C ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 5 FTIR spectra ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส (ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา) ร่วมขยะพลาสติกกับไบโอดีเซลที่อัตราส่วนต่างๆ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 6 FTIR spectra ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส (ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา) รวมขยะพลาสติกกับไบโอดีเซล อัตราส่วน 1:1 และ 3:1 อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

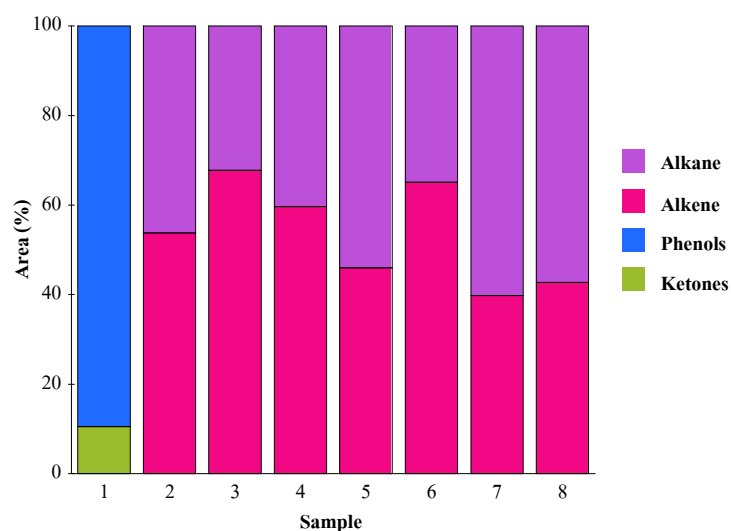
ตารางที่ 3 วิเคราะห์ FTIR ของของเหลวจากการไพโรไลซิส

Wavelength (cm ⁻¹)	Functional group	Die sel	Gaso line	P:B (No. cat.)					P:B (%Cat.)			
				0:1	1:0	1:1	3:1	1:3	1:1 5%	1:1 10%	3:1 5%	3:1 10%
3500 - 3200	O-H stretch alcohols , phenols	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
3000 - 2850	C-H stretch alkanes	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
1760 - 1665	C=O stretch carbonyls , carboxylic acids	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
1680 - 1640	-C=C- stretch alkenes	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
1470 - 1450	C-H bend alkanes	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
1320 - 1000	C-O stretch alcohols , carboxylic acids , esters	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 3 วิเคราะห์ FTIR ของของเหลวจากการไพโรไลซิส (ต่อ)

Wavelength (cm ⁻¹)	Functional group	Diesel	Gasoline	P:B (No. cat.)					P:B (%Cat.)			
				0:1	1:0	1:1	3:1	1:3	1:1	1:1	3:1	3:1
									5%	10%	5%	10%
900 - 675	C-H oop aromatics	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
725 - 720	C-H rock alkanes , rocking band , long chain hydrocarbons	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+

หมายเหตุ + มีสารประกอบอยู่, - ไม่มีสารประกอบอยู่, P ขยะพลาสติก, B ไบโอดี



ภาพที่ 7 GC-MS ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสร่วมขยะพลาสติกกับไบโอดี

หมายเหตุ ตัวอย่าง 1 คือ ไบโอดี, 2 คือ ขยะพลาสติก, 3 คือ P:B 1:1 (No. cat.), 4 คือ P:B 1:1 (5wt%),

5 คือ P:B 1:1 (10wt%), 6 คือ P:B 3:1 (No. cat.), 7 คือ P:B 3:1 (5wt%) และ 8 คือ P:B 3:1 (10wt%)

ตามลำดับ



ตารางที่ 4 วิเคราะห์ GC-MS ของผลิตภัณฑ์ของเหลว

Compound	Formula	Area (%)							
		Raw materials		P:B 1:1			P:B 3:1		
		SCL	Plastic	no. cat.	cat.5%	cat.10%	no. cat.	cat.5%	cat.10%
Alkanes		0	46.18	32.24	40.38	54.01	34.92	60.25	57.25
Nonane	C ₉ H ₂₀	-	-	-	-	-	-	4.63	7.36
Decane	C ₁₀ H ₂₂	-	-	-	-	-	-	3.90	5.53
Undecane	C ₁₁ H ₂₄	-	3.78	-	-	-	-	5.13	7.15
Dodecane	C ₁₂ H ₂₆	-	3.04	-	-	-	-	5.08	6.81
1-Tridecane	C ₁₃ H ₂₆	-	4.56	11.95	-	18.68	6.59	6.32	6.33
Tridecane	C ₁₃ H ₂₈	-	3.83	-	-	28.05	-	-	-
Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	-	7.33	-	-	3.39	-	-	-
Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	-	3.65	-	-	3.89	6.87	4.44	4.90
Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	-	3.39	-	-	-	8.49	3.49	4.30
Octadecane	C ₁₈ H ₃₈	-	3.08	10.41	31.09	-	4.65	8.80	4.78
Nonadecane	C ₁₉ H ₄₀	-	-	0.57	-	-	2.56	9.14	2.81
Eicosane	C ₂₀ H ₄₂	-	-	6.03	3.23	-	-	9.32	-
Heneicosane	C ₂₁ H ₄₄	-	7.26	3.28	6.06	-	5.76	-	7.28
Heptacosane	C ₂₇ H ₅₆	-	6.26	-	-	-	-	-	-
Alkenes		0	53.81	67.77	59.62	46	65.09	39.76	42.75
1-Nonene	C ₉ H ₁₈	-	6.87	-	-	-	3.49	2.59	2.72
1-Decene	C ₁₀ H ₂₀	-	6.87	2.92	43.91	10.94	5.59	5.76	7.52
1-Undecene	C ₁₁ H ₂₂	-	5.34	-	-	-	6.55	0.83	8.24
1,11-Dodecadiene	C ₁₂ H ₂₂	-	0.79	2.82	-	3.96	-	0.71	-
1-Dodecene	C ₁₂ H ₂₄	-	4.64	-	-	-	6.56	5.27	6.86
1,12-Tridecadiene	C ₁₃ H ₂₄	-	0.77	-	4.95	2.56	-	-	-
1,13-Tetradecadiene	C ₁₄ H ₂₆	-	1.24	-	-	7.22	-	0.72	-
1-Tetradecene	C ₁₄ H ₂₈	-	4.56	29.72	1.74	-	9.07	-	2.46
1-Pentadecene	C ₁₅ H ₃₀	-	4.71	-	9.02	12.49	9.21	10.62	5.59
1,15-Hexadecadiene	C ₁₆ H ₃₀	-	0.84	-	-	-	-	-	-
1-Hexadecene	C ₁₆ H ₃₂	-	5.02	-	-	8.83	-	4.81	-
1-Heptadecene	C ₁₇ H ₃₄	-	3.66	15.99	-	-	-	3.48	4.52
1-Octadecene	C ₁₈ H ₃₆	-	4.20	7.02	-	-	9.04	4.17	2.17
1-Nonadecene	C ₁₉ H ₃₈	-	3.71	9.30	-	-	7.39	-	2.67
1,19-Eicosadiene	C ₂₀ H ₃₈	-	0.59	-	-	-	-	0.80	-
(E)-3-Eicosene	C ₂₀ H ₄₀	-	-	-	-	-	8.19	-	-