



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การไพโรไลซิสแบบเร็วไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นชนิดท่อทรงกระบอก Fast pyrolysis of leucaena leucocephala wood in a cylindrical vibrating reactor

ฟ้าใหม่ ศรีสุราษฎร์ อติศักดิ์ ปัตติยะ*

กลุ่มวิจัยขั้นแนวหน้าด้านการแยกสลายชีวมวลด้วยความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Famai Srisurat Adisak Pattiya*

Biomass Pyrolysis Frontier Research Group, Faculty of Engineering, Mahasarakham University Mahasarakham 44150

* Corresponding author.

E-mail: adisak_pattiya@yahoo.com ; Telephone: 086 375 9302

วันที่รับบทความ 3 สิงหาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 2 มีนาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 24 พฤษภาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 13 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นในท่อทรงกระบอกโดยใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นวัตถุดิบมี **วัตถุประสงค์** เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดอนุภาคชีวมวล โซนให้ความร้อน อัตราป้อนชีวมวล อัตราการไหลไนโตรเจน เวลาคงอยู่ของไอน้ำ และศึกษาการนำไบโอออยล์ที่ผลิตได้มาปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ได้แก่ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และ เพอร์ไลต์ ผลการทดลองพบว่าขนาดชีวมวล 0.6-1.0 มม. โซนให้ความร้อน 55 ซม. อัตราการป้อนชีวมวล 1 กก./ชม. อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที ให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมร้อยละ 61.4 และค่าความร้อนไบโอออยล์ 17.0 เมกะจูล/กก. ในงานวิจัยนี้ได้ค้นพบสิ่งใหม่ คือ นอกจากได้ไบโอออยล์หนักและน้ำแล้วยังได้ไบโอออยล์เฟสเบาที่มีค่าความร้อนสูงถึง 26.6 เมกะจูล/กก. การปรับปรุงไบโอออยล์ทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำลดลงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และ เพอร์ไลต์ พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสหนักมีค่าเป็นร้อยละ 6.04 และ 6.76 และค่าความร้อนสูงมีค่าเป็น 29.5 และ 28.9 เมกะจูล/กก. และปริมาณน้ำลดลงจากร้อยละ 46.3 เป็นร้อยละ 11.7 และ 12.2 ตามลำดับ

คำสำคัญ

ไพโรไลซิส ตัวเร่งปฏิกิริยา ไบโอออยล์ ไม้กระถินยักษ์ เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น

Abstract

This paper is a study of fast pyrolysis of Leucaena leucocephala wood in a cylindrical vibrating reactor in order to investigate several parameters including biomass particle size, reaction heated zone length, biomass feed rate, nitrogen flow rate and vapour residence time. Also investigated is the catalytic upgrading of the produced bio-oils applying titanium dioxide (TiO₂) and Perlite. The results showed that optimum conditions were biomass particle size of 0.6-1.0 mm, heated zone length of 55 cm, biomass feed rate of 1 kg/h, nitrogen flow rate of 5 L/min, which gave a maximum bio-oil yield of 61.4% and the bio-oil had a heating value of 17.0 MJ/kg. In this paper a new discovery was made in addition to bio-oil and water, oily was obtained with a heating value of 26.6 MJ/kg. The upgrading step led to the increase of bio-oil heating value and the reduction of water content. By applying TiO₂ and perlite, the bio-oil yields were 6.04 and 6.76% with heating values of 29.5 and 28.9 MJ/kg and the water content was reduced from 46.3% (non-catalytic bio-oil) to 11.7 and 12.2%, respectively.

Keywords

Pyrolysis; catalyst; bio-oil; *Leucaena leucocephala*; vibrating reactor

1. บทนำ

ในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกมุ่งเน้นเกี่ยวกับการพัฒนาทางเทคโนโลยีและระบบเศรษฐกิจกันอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการใช้พลังงานมีความจำเป็นอย่างยิ่งส่งผลให้หาเชื้อเพลิงฟอสซิลมาใช้เป็นจำนวนมาก ผลจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนและสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหา คือ การสนับสนุนการใช้ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทน เพราะสามารถแปลงสภาพเป็นพลังงานได้หลายรูปแบบ เช่น เชื้อเพลิงอัดแท่ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊สด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis process)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ การให้ความร้อนกับชีวมวลที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอน์ประมาณ 2-3 วินาที [1] อุปกรณ์ระบบปิดทำให้ชีวมวลสลายตัวเป็นไอไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วและควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลัก คือ ของเหลวที่เรียกว่า ไบโอยล์ (bio-oil) ร้อยละ 50-70 [2, 3] ไบโอยล์สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์กังหันแก๊สเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและสามารถนำไปสกัดเป็นสารเคมีได้

ในปัจจุบันมีเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิดที่ถูกนำมาใช้ ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบฟอง [4-6] เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวน [7, 8] เครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยหมุน [9] เครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดสลาย [10, 11] เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู [12] และเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ [13-15] เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดถูกนำมาใช้ในระดับห้องทดลองและอุตสาหกรรมแล้ว โดยมีหลักการทำงานไม่ซับซ้อนสามารถพัฒนาเพิ่มขนาดได้ง่าย มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกแนวตั้งภายในบรรจุตัวกลางถ่ายโอนความร้อนที่มีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายฟองสำหรับทำปฏิกิริยากับชีวมวล ให้ปริมาณผลได้ของไบโอยล์สูงถึงร้อยละ 70-75 [2, 16] แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้แก๊สพามากในการยกทรายขึ้นทำให้ต้องใช้อุปกรณ์สร้างแรงดันแก๊สขนาดใหญ่และยังส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นจึงได้ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ [14] โดยใช้

ท่อตรงในแนวดิ่งที่มีการป้อนชีวมวลจากด้านบน ชีวมวลรับความร้อนในระหว่างที่ตกลงมาและเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส การถ่ายโอนความร้อนส่วนใหญ่ได้จากการพาความร้อนจากผนังของท่อปฏิกรณ์ผ่านมายังแก๊สพาและแก๊สพาส่งต่อให้ชีวมวล ขณะที่อนุภาคบางส่วนรับความร้อนจากผนังผ่านการนำความร้อน แม้ว่าใช้แก๊สพาน้อยแต่ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนยังคงต่ำอยู่เพราะชีวมวลสัมผัสผนังเตาเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นที่เป็นท่อตรงวางในแนวนอนใช้แรงสั่นสะเทือนจากมอเตอร์ ทำให้อนุภาคชีวมวลเคลื่อนที่และรับความร้อนจากผนังท่อปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีการนำมาใช้ในกระบวนการทอรีแฟกชันแล้ว เพื่อมุ่งเน้นผลิตถ่านทอรีไฟต์สำหรับใช้เป็นเชื้อทดแทนถ่านหิน [17] แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทดสอบการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว นอกจากเครื่องปฏิกรณ์แล้วยังมีตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งมีการศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวถึงแล้วแต่ยังไม่มีการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของขนาดอนุภาคชีวมวล โชนให้ความร้อน อัตราป้อนชีวมวล อัตราการไหลไนโตรเจน และเวลาคงอยู่ของไอน์ นอกจากนี้ไบโอยล์ที่ผลิตได้ถูกนำมาปรับปรุงสมบัติ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ให้ไบโอยล์มีค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นและลดปริมาณออกซิเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต้นทุนต่ำและพร้อมใช้งาน ได้แก่ TiO_2 และ Perlite โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยาแบบเบดนิ่งและศึกษาตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิกระตุ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยา

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมชีวมวล

งานวิจัยนี้ใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นวัตถุดิบ ได้จากโรงงานไฟฟ้าชีวมวล บริษัท กมลไสย ไบโอ เพาเวอร์ 2010 จำกัด จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยนำชีวมวลมาตากแดดเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบและเครื่องบดละเอียด

แล้วนำไปคัดแยกขนาดให้ได้ 0.2 0.6 และ 1.0 มม. นำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 105 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเก็บบรรจุในภาชนะที่ปิดสนิทเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นหรือฝุ่นเข้าสู่ชีวมวล ชีวมวลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1

2.2 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

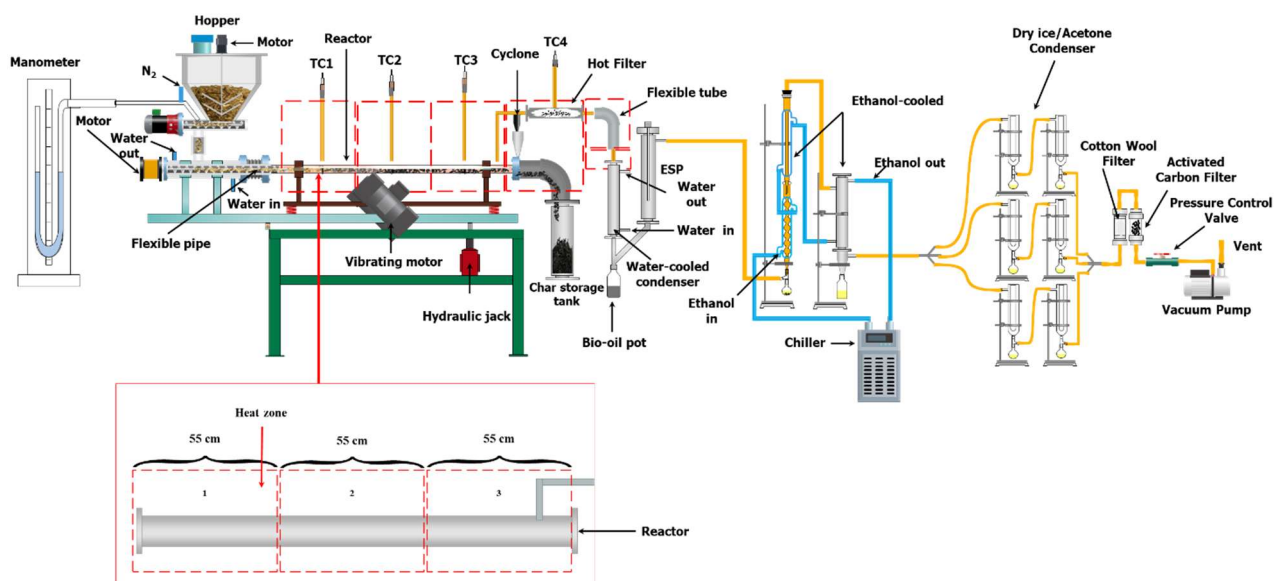
งานวิจัยนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น แสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยถังบรรจุชีวมวล เครื่องป้อนสกรู 2 ตัว ท่อปฏิกรณ์หลัก ชุดเก็บถ่านและชุดรวบรวมของเหลว ตัวถังชีวมวลทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และฝาปิดด้านบนทำจากแผ่นอะคริลิกใสเพื่อการสังเกต รองรับชีวมวลได้ 21 ลิตร หรือประมาณ 3 กิโลกรัม ภายในถังมีแท่งกวนที่ออกแบบมาเพื่อช่วยในการป้อนชีวมวลและป้องกันการอุดตันหรือโพรงที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการกวน ได้ถังมีตัวป้อนสกรูหลักติดตั้งเพื่อลำเลียงชีวมวลออกจากถัง สามารถปรับความเร็วมอเตอร์ได้ ตัวป้อนสกรูหลักเชื่อมต่อกับสกรูตัวรองโดยใช้ท่อ PVC ใส สกรูรองถูกใช้เพื่อป้อนชีวมวลเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส สกรูรองนี้หุ้มด้วยระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเพื่อหลีกเลี่ยงการนำความร้อน สกรูรองถูกเชื่อมเข้ากับท่อยึดหุ่นซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่ปลายอีกด้านหนึ่ง เพื่อใช้สำหรับดูดซับการสั่นของท่อปฏิกรณ์ ท่อปฏิกรณ์หลักทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 304 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.32 ซม. หนา 0.15 ซม. และยาว 165 ซม. ถูกติดตั้งในแนวนอนภายในเตาเผาที่มีโซนทำความร้อนแยกกัน 3 โซน ซึ่งแต่ละโซนมีความยาว 55 ซม. ดังนั้นอุณหภูมิของโซนไพโรไลซิส TC1, TC2 และ TC3 สามารถควบคุมได้โดยตัวควบคุมอุณหภูมิ PID ปลายเทอร์โมคัปเปิลไม่ได้สัมผัสกับพื้นผิวของท่อปฏิกรณ์ ดังนั้นอุณหภูมิที่ได้จึงเป็นของชีวมวล ส่วนท้ายของเครื่องปฏิกรณ์เชื่อมต่อกับถังเก็บถ่านชาร์และตัวแยกไซโคลนซึ่งถูกดักจับและจัดเก็บถ่านชาร์ ไอไพโรไลซิสที่ผลิตถูกกรองผ่านตัวกรองร้อนมีเยื่อแก้วซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ประมาณ 420°C จากนั้นไอไพโรไลซิสที่ได้ถูกควบแน่น ซึ่งประกอบไปด้วยชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุด

ดักจับไฟฟ้าสถิต (ESP) ชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น (เอทานอลควบแน่นที่ $-10 \pm 5^{\circ}\text{C}$) และชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอซีโตน ทั้งหมด 6 ชุด แต่ละชุดอุณหภูมิ -70°C และผ่านไปยังชุดกรองด้วยสาลีและชุดกรองถ่านกัมมันต์และในตอนท้ายติดตั้งปั๊มสุญญากาศเพื่อช่วยดูดไอมาควบแน่นให้เร็วขึ้นช่วยลดความดันในระบบเครื่องปฏิกรณ์ แรงดันหรือกำลังดูดของปั๊มนี้ถูกควบคุมโดยใช้วาล์วควบคุมความดันโดยการใช้ความดันของแก๊สไนโตรเจนทางเข้าที่ตัวป้อนชีวมวลหลักผ่านเครื่องวัดปริมาณน้ำแบบท่อ U การทดลองไพโรไลซิสเริ่มต้นด้วยการให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ 500°C แล้วเปิดระบบทำความเย็น แก๊สไนโตรเจนปั๊มสุญญากาศ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่มอเตอร์สั่นและตัวป้อนถูกเปิดขึ้นเพื่อให้ชีวมวลจากถังป้อนลำเลียงไปยังเครื่องปฏิกรณ์ อนุภาคชีวมวลถูกไพโรไลซิสพร้อมกันและลำเลียงไปตามท่อเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ 1 สมบัติชีวมวล

Analysis	This work	Ref [4, 18]
Particle size (mm)	0.2-1.0	0.212-1.5
Moisture (wt%, db)	8.6	3.7-9.5
Proximate (wt%, db)		
Volatile matter	80.6	77.-79.4
Fixed carbon ¹	17.6	8.77-13.2
Ash	1.7	1.7-2.06
Ultimate (wt%, db)		
Carbon	50.48	47.4-49.9
Hydrogen	6.2	6.19-6.6
Nitrogen	0.2	0.3-0.8
Oxygen	41.6	43.0-41.1
Heating value (MJ/kg)		
Higher heating value	20.6	18-19.5
Low heating value	19.3	18.1
Density (kg/m ³)		
Bulk	261.6	197.7
Particle	786.2	682

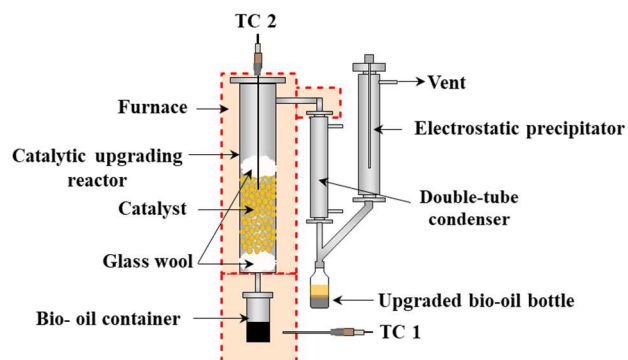
¹คำนวณจากความแตกต่าง = 100-Volatile-Ash



รูปที่ 1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น

2.3 เครื่องเร่งปฏิกิริยา

การปรับปรุงไบโอออยล์ด้วยเครื่องเร่งปฏิกิริยา แสดงในรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยภาชนะใส่ไบโอออยล์ 450 มล. และท่อปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยาเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.3 ซม. สูง 42 ซม. การให้ความร้อนให้โดยใช้ชุดลดความร้อน อุณหภูมิควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ PID และเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (TC1 สำหรับไบโอออยล์และ TC2 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา) ไออออกจากท่อปฏิกรณ์ที่ด้านบนไปยังชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับไฟฟ้าสถิตและชุดควบแน่นชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น ($-10 \pm 5^{\circ}\text{C}$) สำหรับการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดใช้ไบโอออยล์ 50 กรัม ลงในภาชนะและให้ความร้อนตามขั้นตอน เริ่มแรกใช้อุณหภูมิถึง 105°C และค้างไว้ 10 นาที หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้ร้อนถึง 200°C , 250°C และ 300°C โดยใช้เวลาในการค้างไว้ 5 นาที ในแต่ละระดับและเพิ่มขึ้นถึง 400°C เป็นเวลา 10 นาที ในการศึกษานี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ได้แก่ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และเพอร์ไลต์ โดยมีการศึกษา TiO_2 3 ชนิด ได้แก่ Anatase (A-TiO_2), Rutile (R-TiO_2) และ P25 และหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนไบโอออยล์/ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2 แผนภาพชุดเร่งปฏิกิริยา

2.4 การวิเคราะห์สมบัติไบโอออยล์

2.4.1 วิเคราะห์ค่าความหนืด

การวิเคราะห์หาค่าความหนืดของไบโอออยล์ตามมาตรฐาน ASTM D445 ด้วยเครื่อง Cannon-Fenske Opaque Viscometer เบอร์ 200

2.4.2 วิเคราะห์ปริมาณน้ำ

ใช้วิธีการไทเทรตของคาลฟิเชอร์ (Karl Fisher Titration) ใช้เครื่องมือมาตรฐานยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น V20 ซึ่งใช้หลักการตรวจวัดด้วยสาร Hydranal Composite 5 k ยี่ห้อ (Honeywell Fluka) เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Hydranal Medium K ยี่ห้อ Honeywell Fluka ตามมาตรฐาน ASTM E203

2.4.3 วิเคราะห์ค่าพีเอช

ใช้เครื่อง HI 2211 pH/ORP Meter วัดของเหลวมาตรฐาน ที่มีค่ามาตรฐาน 4 และ 7 แล้วจึงนำมาวัดกับไบโอบีโอยล์

2.4.4 วิเคราะห์ปริมาณเถ้า

วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D7579 โดยใช้กระดาษกรองยี่ห้อ Whatman เบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 6 ไมโครเมตร ใส่ไบโอบีโอยล์ 1-2 กรัม ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย

2.4.5 วิเคราะห์จุดวาบไฟ

นำไบโอบีโอยล์ใส่ในถ้วยตัวอย่างแล้วจุ่มเทอร์โมคัปเปิลลงไปในถ้วยและให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ใช้เปลวไฟเคลื่อนที่ผ่านถ้วยตัวอย่างทุกครั้งที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 2-3 °C แสงสว่างที่วาบขึ้นคือ จุดวาบไฟ

2.4.6 วิเคราะห์จุดไหลเท

จุดไหลเทคือ อุณหภูมิต่ำสุดของไบโอบีโอยล์ที่สามารถไหลได้ โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลจุ่มลง จากนั้นนำไบโอบีโอยล์ไปแช่ในตู้แช่แข็งที่ -20 °C สังเกตอุณหภูมิทุก ๆ -2 °C เพื่อดูว่าไบโอบีโอยล์แข็งตัวหรือยังไหลอีกหรือไม่

2.4.7 วิเคราะห์ค่าความร้อน

ค่าความร้อนสูงหาได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 โดยใช้เครื่องบอมม์คาโลริมิเตอร์ รุ่น CAL3K-AP และแบบที่ 2 คำนวณได้จากปริมาณธาตุพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ โดยวิเคราะห์จากศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ค่าความร้อนสูงคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} HHV(MJ/kg) = & 0.3491(C) + 1.1783(H) \\ & + 0.1005(S) - 0.1034(O) \\ & - 0.015(N) - 0.0211(A) \end{aligned} \quad (1)$$

โดยที่ C H S O N และ A คือ ร้อยละโดยมวลของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ ไนโตรเจนและเถ้า

2.4.8 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

ใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุพื้นฐาน Truspec CHN/CHNS ที่ศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

2.4.9 สมดุลมวล

ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์หาได้จากการทำสมดุลมวล (mass yield) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)-(4)

$$Yield_L (wt\%) = \frac{Mass_{Liquid} (g)}{Biomass (g)} \times 100 \quad (2)$$

$$Yield_S (wt\%) = \frac{Mass_{Solid} (g)}{Biomass (g)} \times 100 \quad (3)$$

$$Yield_{Gas} (wt\%) = 100 - Yield_L - Yield_S \quad (4)$$

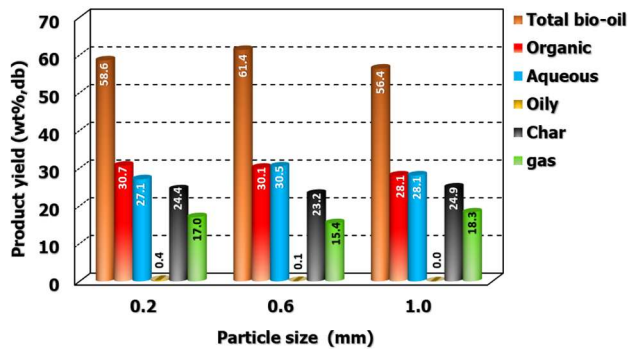
2.4.10 ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน

ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\text{ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน (\%)} = \text{ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์} \times \frac{HHV_{ผลิตภัณฑ์}}{HHV_{ชีวมวล}} \quad (5)$$

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลิตภัณฑ์ที่ได้กรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามี 3 ส่วนได้แก่ ไบโอบีโอยล์ ถ่านชาร์ และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้โดย ไบโอบีโอยล์แบ่งออกเป็น 3 เฟส ได้แก่ ไบโอบีโอยล์เฟสหนัก (heavy) ไบโอบีโอยล์เฟสน้ำ (aqueous) และส่วนที่น่าสนใจคือ ไบโอบีโอยล์เฟสเบา (oily) ดังแสดงในรูปที่ 3 ไบโอบีโอยล์เฟสหนักได้จากการควบแน่นด้วยชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับไฟฟ้าสถิตมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำไบโอบีโอยล์เฟสน้ำได้จากการควบแน่นด้วยชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นมีลักษณะเป็นของเหลวใสถึงสีน้ำตาลอ่อนและมีตะกอนเล็กน้อย ไบโอบีโอยล์เฟสเบาได้จากการควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอมโมเนีย มีลักษณะเป็นของเหลวใสมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาลอ่อนไม่รวมตัวกับไบโอบีโอยล์เฟสน้ำ แต่ลอยตัวอยู่ด้านบนของไบโอบีโอยล์เฟสน้ำ ติดไฟได้และมีกลิ่นฉุนมากทำให้แสบตาได้



รูปที่ 3 ผลของอนุภาคชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

3.1 ผลของตัวแปรต่าง ๆ

3.1.1 ผลของขนาดอนุภาคชีวมวล

พบว่าอนุภาคชีวมวล 1.0 มม. ผลิตไบโอออยล์รวมน้อยสุดได้ร้อยละ 56.4 ดังแสดงในรูปที่ 4 เพราะอนุภาคชีวมวลที่ใหญ่รับความร้อนไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการสลายตัวกลายเป็นไอไพโรไลซิสได้น้อย ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของสารอินทรีย์ลดลงเป็นร้อยละ 28.1 เมื่อเทียบกับอนุภาคชีวมวล 0.2 และ 0.6 มม. ที่ผลิตไบโอออยล์รวมได้สูงกว่าร้อยละ 58.6 และ 61.3 เพราะอนุภาคชีวมวลที่มีขนาดเล็ก ทำให้รับความร้อนเพียงพอและสลายตัวได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Luo, Chandler et al. 2017 [11] ที่ศึกษาการไพโรไลซิสแบบเร็วที่อนุภาคชีว

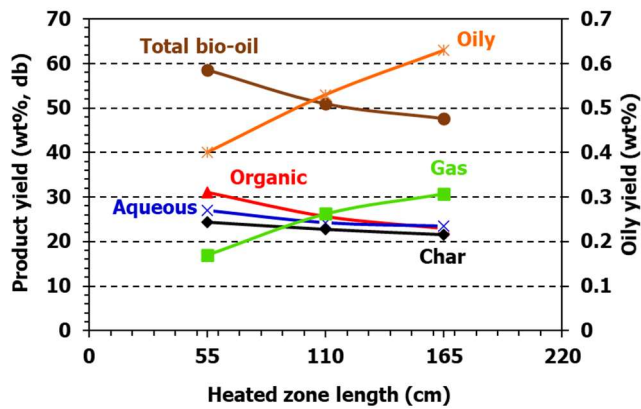
มวล 0.3 0.75 และ 1.5 พบว่าได้ไบโอออยล์รวมร้อยละ 67.65 และ 62 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าชีวมวลที่มีขนาดเล็กสามารถสลายตัวได้ดี ดังนั้นขนาดอนุภาคที่เหมาะสมคือ 0.2 และ 0.6 มม.

3.1.2 ผลของโซนให้ความร้อน

ท่อปฏิกรณ์แบ่งโซนร้อนออกเป็น 3 โซน ได้แก่ 55 110 และ 165 ซม. พบว่าโซนร้อน 165 ซม. ให้ไบโอออยล์รวมน้อยสุดร้อยละ 47.6 ดังแสดงในรูปที่ 5 เพราะท่อปฏิกรณ์มีปริมาตรภายในท่อบาน ทำให้ไออยู่ในท่อนานที่เวลา 29.3 วินาที ซึ่งมีโอกาสที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขึ้นที่สองตามบริเวณร้อนต่าง ๆ ในระบบได้ ทำให้ปริมาณผลได้ของสารอินทรีย์ลดลงเป็นร้อยละ 23.0 และมีผลทำให้ปริมาณผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30.8 เมื่อลดโซนร้อนเป็น 110 ซม. พบว่าได้ไบโอออยล์รวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นร้อยละ 50.9 เนื่องจากไอไพโรไลซิสยังอยู่ในระบบเป็นเวลานานที่เวลา 21.8 วินาที ดังนั้นเมื่อลดโซนร้อนเหลือ 55 ซม. พบว่าได้ไบโอออยล์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 59.6 เพราะเวลาของไอไพโรไลซิสอยู่น้อยลงเหลือเพียง 19.9 วินาที ส่งผลให้น้ำไอไพโรไลซิสไปควบแน่นได้เร็วขึ้นและทำให้ปริมาณผลได้ของสารอินทรีย์เพิ่มจากร้อยละ 23.0 เป็นร้อยละ 31.1 และแก๊สลดลงจากร้อยละ 30.8 เป็นร้อยละ 17.0



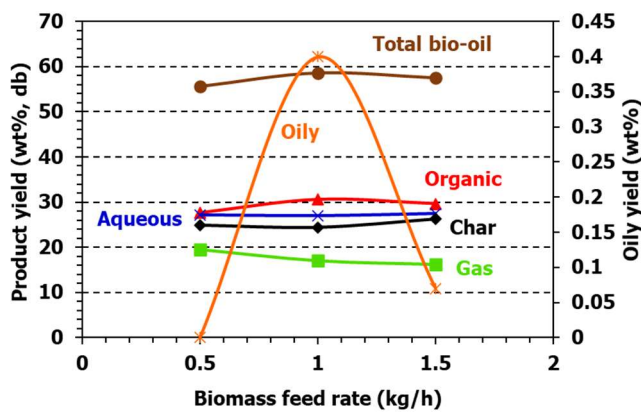
รูปที่ 4 ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 5 ผลของโซนร้อนต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

3.1.3 ผลของอัตราป้อนชีวมวล

พบว่าที่อัตราป้อน 0.5 กก./ชม. ผลิตภัณฑ์รวมได้น้อยสุด ร้อยละ 55.7 เนื่องจากไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นมีน้อย เมื่อผสมกับแก๊สพาในระบบทำให้ไอถูกเจือจางลงส่งผลให้โอกาสในการควบแน่นมีน้อยลง ทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นร้อยละ 19.5 ดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อเพิ่มอัตราป้อนเป็น 1 กก./ชม. ทำให้ได้ไบโอออยล์รวมเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 58.6 เนื่องจากมีอัตราส่วนของไฮโดรไลซิสต่อแก๊สพาในระบบที่พอเหมาะจึงทำให้ไฮโดรไลซิสเกิดการควบแน่นได้ดี



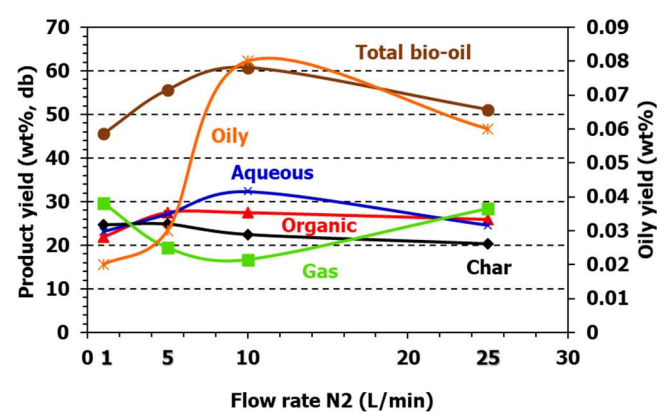
รูปที่ 6 ผลของอัตราป้อนต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Ellens and Brown 2012 [19] ที่ศึกษาอัตราการป้อนชีวมวล 1 1.5 และ 2 กก./ชม. พบว่าได้ไบโอออยล์รวมร้อยละ 51 55 และ 58 จากงานวิจัยนี้เมื่อเพิ่มอัตราป้อนจาก 1 เป็น 1.5 กก./ชม. พบว่าได้ไบโอออยล์

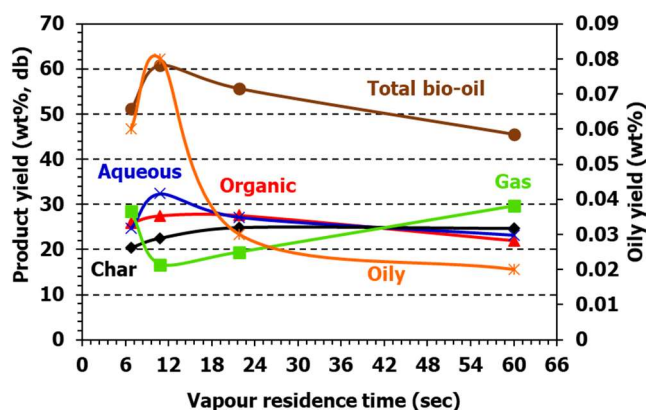
รวมลดลงจากร้อยละ 58.6 เป็นร้อยละ 57.5 เนื่องจากอัตราการป้อนชีวมวลสูงทำให้ชีวมวลส่วนหนึ่งได้รับความร้อนไม่เพียงพอต่อการสลายตัว ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 24.9 เป็นร้อยละ 26.3 ดังนั้นอัตราป้อนที่เหมาะสมคือ 1 กก./ชม.

3.1.4 ผลของอัตราการไหลไนโตรเจนและเวลาคงอยู่ของไฮโดรไลซิส

พบว่าเมื่อใช้ไนโตรเจน 1 ลิตร/นาที่ ได้ไบโอออยล์รวมลดลงเป็นร้อยละ 45.5 ดังแสดงในรูปที่ 7 เนื่องจากไฮโดรไลซิสที่อยู่ในระบบนานที่เวลา 60 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 8 มีโอกาสที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวรอบที่สองได้ ทำให้สารอินทรีย์ลดลงเป็นร้อยละ 21.9 และปริมาณผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 29.7 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลไนโตรเจนเป็น 5 ลิตร/นาที่ ได้ไบโอออยล์รวมเพิ่มจากร้อยละ 45.5 เป็นร้อยละ 55.6 แต่เวลาคงอยู่ของไอยังอยู่ยาวนานที่เวลา 21.8 วินาที ส่งผลให้แก๊สลดลงจากร้อยละ 19.4 เป็นร้อยละ 16.75 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลไนโตรเจนเป็น 10 ลิตร/นาที่ พบว่าไบโอออยล์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 55.6 เป็นร้อยละ 60.7 และ ทำให้ระยะเวลาคงอยู่ของไอน้อยลงจากเวลา 21.8 เป็น 10.8 จึงทำให้น้ำไปควบแน่นได้เร็วขึ้น



รูปที่ 7 ผลของอัตราการไหลไนโตรเจนต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 8 ผลของเวลาคงอยู่ของไอน้ำต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลไนโตรเจนเป็น 25 ลิตร/นาที่ พบว่า เวลาคงอยู่ของไอน้ำลดลงมากจากเวลา 10.8 วินาทีเหลือเพียงแค่ 6.8 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 8 แต่ได้ไบโอออยล์รวมลดลงจากร้อยละ 60.7 เป็นร้อยละ 51.1 เพราะไนโตรเจนไปเจือจางไอน้ำทำให้สารอินทรีย์ลดลงจากร้อยละ 27.5 เป็นร้อยละ 25.9 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Papari, Hawboldt et al. 2015

ตารางที่ 2 สมบัติของไบโอออยล์เฟสหนัก

Analysis	This work		Ref [4]	ASTM D7544-12 [20]	
	Heavy	Oily	Heavy	Grade G	Grade D
Properties					
Water content (wt%)	46.3	1.58	23.4	< 30	< 30
Solid content (wt%)	0.18	<0.1	0.1	2.5	0.25
Viscosity 40 (°C) (cSt)	132.4	-	-	125	125
Density 20 (°C) (kg/dm ³)	1.1	1	1.1	1.1-1.3	1.1-1.3
Ash content (wt%)	0.12	<0.1	<0.1	0.25	0.15
pH	2.4	-	3.6	Report	Report
Flash point (°C)	108.2	-	-	> 45	> 45
Pour point (°C)	-18.2	-	-	-9	-9
Heating value (MJ/kg)					
Higher heating value	17.0	26.6	22.2	>15	>15
Energy yield (%)	43.7	0.6	34.5	-	-

อีกทั้งถ่านชาร์ก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจเพราะมีปริมาณคาร์บอนที่สูงประมาณร้อยละ 79.6 และค่าความร้อนสูงเท่ากับ 29.8 เมกะจูล/กก. ซึ่งประโยชน์ของถ่านชาร์นั้นสามารถทำเป็นถ่านอัดแท่งหรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินได้ดังแสดงในตารางที่ 3

[10] ที่ศึกษาการไพโรไลซิสโดยใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 2.5 และ 8 ลิตร/นาที่ พบว่าได้ไบโอออยล์รวมร้อยละ 61.67 และ 63 และแก๊สลดลงร้อยละ 31.21 และ 29 ดังนั้นในงานวิจัยนี้อัตราการไหลไนโตรเจนที่เหมาะสม คือ 10 ลิตร/นาที่

3.2 สมบัติไบโอออยล์และถ่านชาร์

ผลการวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์เทียบมาตรฐาน ASTM-D7544-12 [20] แสดงในตารางที่ 2 พบว่าปริมาณน้ำสูงกว่ามาตรฐาน เพราะชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตมีประสิทธิภาพดักจับไอน้ำไพโรไลซิสและน้ำได้มากทำให้น้ำผสมในไบโอออยล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดเกินมาตรฐาน นอกจากไบโอออยล์หลักที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ไบโอออยล์เฟสเบาก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจไม่แพ้กัน เนื่องจากมีค่าความร้อนสูงถึง 26.6 MJ/kg แต่ด้วยปริมาณที่ได้นั้นน้อยมาก อีกทั้งยังต้องใช้อุณหภูมิ -70 °C ในการควบแน่นถึงสามารถดักจับได้ ดังนั้นในการต่อยอดงานวิจัยควรศึกษากระบวนการที่เน้นผลิตไบโอออยล์เบาให้มากขึ้น

3.3 การปรับปรุงไบโอออยล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามี 3 ส่วน ได้แก่ ไบโอออยล์รวม ถ่านชาร์ และแก๊ส โดยไบโอออยล์รวมที่ผลิตได้แบ่งออกเป็น 2 เฟส ได้แก่ เฟสหนัก (heavy) และเฟสน้ำ (aqueous) ดังแสดงในรูปที่ 9 ไบโอออยล์รวมได้จากการควบแน่นด้วยชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับไฟฟ้าสถิต

จากนั้นจึงคัดแยกไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสน้ำออกจากกันโดยใช้ไซริงดูดเฟสน้ำออก เมื่อเหลือเฟสน้ำในปริมาณที่น้อยจึงนำไปแยกโดยใช้กระดาษ Whatman เบอร์ 1 ไบโอออยล์เฟสหนักที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำ ส่วนไบโอออยล์เฟสน้ำมีลักษณะเป็นของเหลวน้ำตาลอ่อนถึงสีเข้มมีตะกอนเล็กน้อย มีกลิ่นฉุนและแยกชั้นกับไบโอออยล์เฟสหนักชัดเจนและถ่านชาร์มีลักษณะเป็นคราบสีดำ

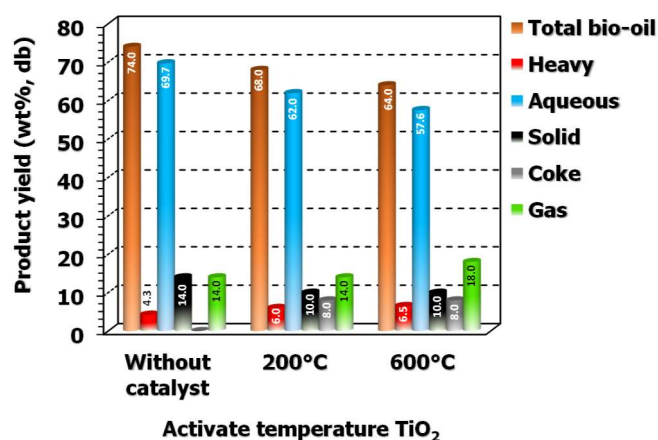
ตารางที่ 3 สมบัติของถ่านชาร์

Analysis	This work
Proximate (wt%, db)	
Moisture	0.6
Volatile matter	31.5
Fixed carbon	64.2
Ash content (wt%)	4.3
Elemental (wt%, db)	
Carbon	79.6
Hydrogen	4.2
Nitrogen	0.34
Oxygen	11.6
Heating value (MJ/kg)	
Higher heating value	29.8
Density (kg/m ³)	
Bulk	188
Particle	813
Energy yield (%)	32.9

3.4 ผลการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.4.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ถูกกระตุ้นด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 200 °C และที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 6 ชม. พบว่าที่อุณหภูมิ 200 °C ได้ไบโอออยล์รวมร้อยละ 68.0 และอุณหภูมิที่ 600 °C ได้ไบโอออยล์รวมร้อยละ 64.0 ดังแสดงในรูปที่ 10 แต่การกระตุ้นอุณหภูมิที่ 600 °C ได้ไบโอออยล์เฟสหนักที่มีค่าสูงกว่ากรณีอุณหภูมิ 200 °C จากร้อยละ 6.04 เป็นร้อยละ 6.54 อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสองนี้ไม่มาก ดังนั้นเพื่อลดการใช้พลังงานจึงเลือกใช้การกระตุ้นอุณหภูมิที่ 200 °C เป็นเวลา 6 ชม.



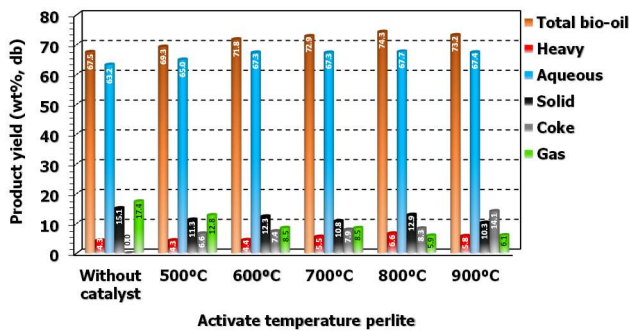
รูปที่ 10 ผลการกระตุ้น TiO₂ ต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

3.4.2 เพอร์ไลต์ (Perlite)

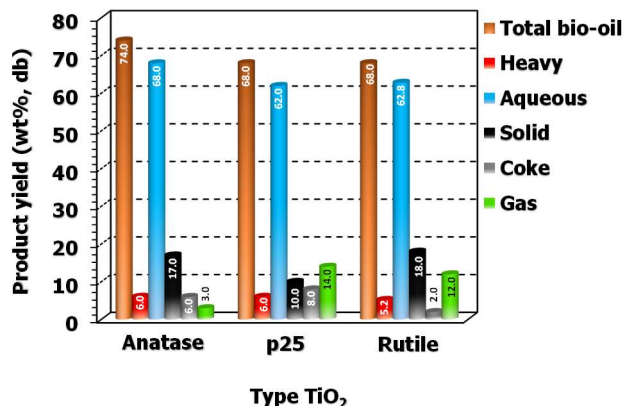
ผลการทดลองการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์ที่อุณหภูมิ 800 °C ให้ไบโอออยล์รวมสูงสุดร้อยละ 74.3 และไบโอออยล์เฟสหนักร้อยละ 6.64 ดังแสดงในรูปที่ 11 ส่วนกรณีที่มิใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าให้เฟสหนักลดลงจากร้อยละ 6.64 เป็นร้อยละ 4.28 อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 800 °C และ 900 °C ได้ไบโอออยล์เฟสหนักที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 °C จึงเหมาะสมที่สุดและประหยัดพลังงานมากกว่าที่จะไปใช้อุณหภูมิ 900 °C



รูปที่ 9 ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 11 ผลการกระตุ้นเพอร์ไลต์ต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 12 ผลของชนิด TiO₂ ต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

3.5 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (Anatase) ได้ไบโอออยล์รวมสูงสุดร้อยละ 74.0 ในขณะที่ตัวเร่ง TiO₂ (Rutile) และ TiO₂ (P25) ได้ไบโอออยล์รวมร้อยละ 68.0 ดังแสดงในรูปที่ 12 แต่ปริมาณผลได้ของแก๊สของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (Anatase) มีน้อยกว่า TiO₂ (Rutile) และ TiO₂ (P25) จากร้อยละ 12 และ 14 เป็นร้อยละ 3 ตามลำดับ นอกจากนี้ไบโอออยล์เฟสหนักจากตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (Anatase) และ TiO₂ (P25) ได้ร้อยละ 6.04 ในขณะที่ TiO₂ (Rutile) ได้ไบโอออยล์เฟสหนักร้อยละ

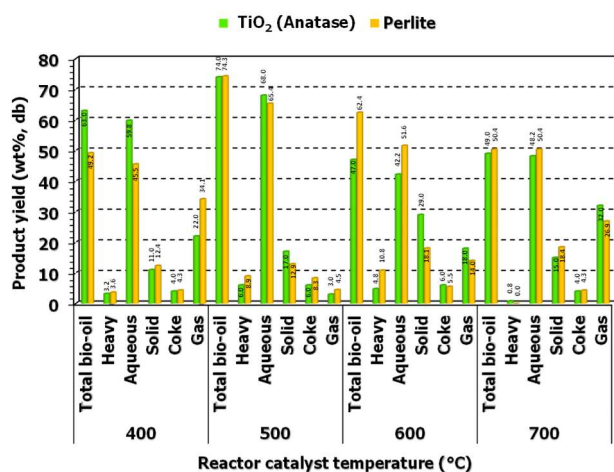
ละ 5.2 ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (Anatase) จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการศึกษานี้เพราะให้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์สูงสุดและปริมาณผลได้ของแก๊สน้อยสุด

3.6 ผลของอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา

ผลอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา TiO₂ พบว่าที่อุณหภูมิ 400 °C ได้ไบโอออยล์รวมลดลงเป็นร้อยละ 63.0 ดังแสดงในรูปที่ 13 และลดลงเหลือร้อยละ 49.0 ที่อุณหภูมิ 700 °C ส่งผลให้แก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 22.0 เป็นร้อยละ 32.0 เพราะจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Pattiya and Suttibak 2017 [2] ได้ศึกษาผลอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอาจเกิดการแตกตัวครั้งที่ 2 ของไฮโดรไลซิส ทำให้ไบโอออยล์ลดลงและแก๊สเพิ่มขึ้นและที่อุณหภูมิ 500 °C ให้ไบโอออยล์รวมสูงสุทธ้อยู่ที่ 74.0 และแก๊สลดลงเหลือร้อยละ 3 ดังนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือต่ำกว่า 500 °C ส่งผลไบโอออยล์เฟสหนักลดลงจากร้อยละ 6.2 เป็นร้อยละ 3.2 ที่ 400 °C ร้อยละ 4.8 ที่ 600 °C และร้อยละ 0.84 ที่ 700 °C ดังนั้นอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมของ TiO₂ คือ 500 °C ตัวเร่งปฏิกิริยา Perlite พบว่าอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาที่ 500 °C ได้ไบโอออยล์รวมสูงสุทธ้อยู่ที่ 74.3 เมื่อเพิ่มเป็น 600 °C และ 700 °C พบว่าปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวมลดลง เนื่องจากเกิดการแตกตัวครั้งที่ 2 ของไฮโดรไลซิส ทำให้ได้แก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.8 เป็นร้อยละ 14.0 และ ร้อยละ 26.0 ตามลำดับเมื่อใช้อุณหภูมิที่ 400 °C ให้ปริมาณผลได้ของแก๊สสูงสุทธ้อยู่ที่ 34.1 อาจเป็นเพราะว่าอุณหภูมินั้นน้อยเกินไป ทำให้การทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 600 °C ได้ไบโอออยล์เฟสหนักสูงสุทธ้อยู่ที่ 10.8 แม้ว่าการใช้อุณหภูมิที่ 500 °C จะได้ไบโอออยล์รวมสูงสุทธที่สุดแต่ส่วนใหญ่จะอยู่ในไบโอออยล์เฟสหนัก ดังนั้นอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาของ Perlite ที่เหมาะสมคือ 600 °C

ตารางที่ 4 สมบัติไบโอออยล์ที่ผ่านการอัพเกรดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

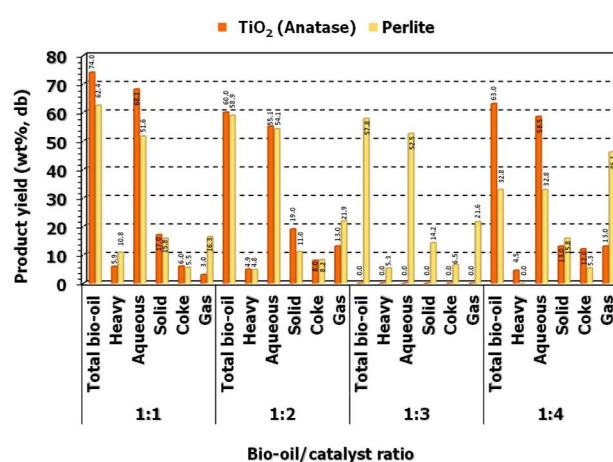
Analysis	TiO ₂ (Anatase)				Perlite			
	Without catalyst		Catalytic		Without catalyst		Catalytic	
	Heavy	Aqueous	Heavy	Aqueous	Heavy	Aqueous	Heavy	Aqueous
Properties								
Water content (wt%)	15.5	98.8	11.7	99.8	14.8	98.3	12.2	98.4
Solid content (wt%)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Density 20 (°C) (kg/m ³)	1071.6	1024.7	1023.5	1013.4	1024.3	1024.2	1043.6	1024.5
Ash content (wt%)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Flash point (°C)	76.5	-	64.2	-	82.4	-	66.5	-
Pour point (°C)	-8	-18.9	-7.8	-18.6	-8.3	-18.8	-8.1	-18.5
Heating value (MJ/kg)								
Higher heating value	-	-	29.47	-	-	-	28.28	-
Energy yield (%)	-	-	10.4	-	-	-	11.1	-



รูปที่ 13 ผลของอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

3.7 ผลของอัตราส่วนไบโอออยล์ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลของอัตราส่วนต่อตัวเร่งปฏิกิริยาของ TiO₂ แสดงในรูปที่ 14 พบว่าอัตราส่วนที่ 1:1 ได้ไบโอออยล์รวมร้อยละ 74 และไบโอออยล์เฟสหนักร้อยละ 5.9 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 1:2 และ 1:4 ส่งผลให้ไบโอออยล์ลดลงจากร้อยละ 74.0 เป็นร้อยละ 60.0 และ 63.0 ตามลำดับ ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของแก๊สเพิ่มจากร้อยละ 3 เป็นร้อยละ 13 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ มีลักษณะเป็นผงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนขึ้น ทำให้ไพอีโรไลซิสทำปฏิกิริยานานขึ้นและอาจเกิดการแตกตัวครั้งที่ 2 ได้ อีกทั้งการนำไพอีโรไลซิสไปควบแน่นเป็นไพบไดยากเช่นกัน ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1



รูปที่ 14 ผลของอัตราส่วนต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

ผลของอัตราส่วนต่อตัวเร่งปฏิกิริยา Perlite พบว่าอัตราส่วน 1:1 ได้ไบโอออยล์เฟสหนักสูงสุดร้อยละ 10.8 ตามด้วยอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ร้อยละ 4.76 และ 5.26 และอัตราส่วน 1:4 ร้อยละ 0 แสดงในรูปที่ 14 อัตราส่วน 1:4 ไม่ได้ไบโอออยล์เฟสหนัก เพราะตัวเร่งปฏิกิริยา Perlite มีน้ำหนักเบา เมื่อเพิ่มอัตราส่วนขึ้นและใส่ในชุดเร่งปฏิกิริยาทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาอัดแน่น ส่งผลให้ไบโอออยล์เฟสหนักลดลงจากร้อยละ 10.8 เป็นร้อยละ 0 และปริมาณผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 16.3 เป็นร้อยละ 46.0 ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1

3.8 การวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์

สมบัติของไบโอออยล์จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 4 พบว่าไบโอออยล์ตั้งต้นเทียบกับไบโอออยล์กรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด ส่งผลให้ปริมาณน้ำลดลงจาก ร้อยละ 46.3 เป็นร้อยละ 15.5 ของ TiO_2 (Anatase) และ ร้อยละ 14.8 ของ Perlite เมื่อนำมาอัปเกรดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด พบว่าปริมาณน้ำลดลงจากร้อยละ 15.5 และ 14.8 เป็นร้อยละ 11.7 และ ร้อยละ 12.2 เพราะเกิดจากการทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ออกซิเจนลดลง อีกทั้งทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นจาก 17.0 เป็น 29.47 และ 28.28 เมกะจูล/กก. แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำมาอัปเกรดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นเมื่อใช้ท่อทรงกระบอก พบว่าขนาดอนุภาคชีวมวล 0.6-1.0 มม. โชนให้ความร้อน 55 ซม. อัตราการป้อนชีวมวล 1 กก./ชม. อัตราการไหลไนโตรเจน 5 ลิตร/นาทีก่อนป้อนไบโอออยล์รวมร้อยละ 61.4 แต่ในงานวิจัยนี้ได้ค้นพบสิ่งที่น่าสนใจคือนอกจากได้ไบโอออยล์หนักและเฟสน้ำแล้วยังได้ไบโอออยล์เฟสเบาที่มีค่าความร้อนสูงถึง 26.6 เมกะจูล/กก. และถ่านชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงร้อยละ 79.6 และค่าความร้อนสูงเท่ากับ 29.8 MJ/kg ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อทำเป็นถ่านอัดแท่งหรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินได้

ไบโอออยล์ที่ผลิตได้ถูกนำมาอัปเกรดในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ Perlite พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (Anatase) อุณหภูมิกระตุ้น 200 °C อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 600 °C อัตราส่วน 1:1 ได้ไบโอออยล์เฟสหนักร้อยละ 6.04 และค่าความร้อนสูง 29.5 เมกะจูล/กก. ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Perlite พบว่าอุณหภูมิกระตุ้น 800 °C อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 °C อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 600 °C และอัตราส่วน 1:1 ได้ไบโอออยล์เฟสหนักร้อยละ 6.76 และค่าความร้อนสูง 28.9 เมกะจูล/กก.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และโรงงานไฟฟ้าชีวมวล บริษัทกมลลาไสย ไบโอ เพาเวอร์ 2010 จำกัด ตำบลกมลลาไสย อำเภอกมลลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 2012;38: 68-94.
- [2] Pattiya A, Suttibak S. Fast pyrolysis of sugarcane residues in a fluidised bed reactor with a hot vapour filter. *Journal of the Energy Institute*. 2017; 90(1): 110-119.
- [3] Raja SA, Kennedy ZR, Pillai BC, Lee CLR. Flash pyrolysis of jatropha oil cake in electrically heated fluidized bed reactor. *Energy*. 2010; 35(7): 2819-2823.
- [4] นันทปรีชา สิงห์ทอง, นวนต์ ชลคุป, อติศักดิ์ ปัตติยะ. การไพโรไลซิสแบบเร็วของถ่านทอรรีไฟต์จากไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพอง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2020; 15(2): 81-97.
- [5] กฤษฎา ลำพองชาติ, นวนต์ ชลคุป, อติศักดิ์ ปัตติยะ. ผลของตัวทำละลายที่ใช้เตรียมเหง้ามันสำหรับผลิตถ่านจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2018; 13(2): 106-117.
- [6] Ly HV, Lim DH, Sim JW, Kim SS, Kim J. Catalytic pyrolysis of tulip tree (Liriodendron) in bubbling fluidized-bed reactor for upgrading bio-oil using dolomite catalyst. *Energy*. 2018;162: 564-575.
- [7] Park JY, Kim JK, Oh CH, Park JW, Kwon EE. Production of bio-oil from fast pyrolysis of biomass using a pilot-scale circulating fluidized bed reactor and its characterization. *Journal of Environmental Management*. 2019;234: 138-144.
- [8] Suntivarakorn R, Treedet W, Singbua P, Teeramaetawat N. Fast pyrolysis from Napier

- grass for pyrolysis oil production by using circulating Fluidized Bed Reactor: Improvement of pyrolysis system and production cost. *Energy Reports*. 2018;4: 565-575.
- [9] Guoxin H, Xiwu G, Hao H, Haojie F, Zheng W. Experimental studies on flow and pyrolysis of coal with solid heat carrier in a modified rotating cone reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2008;47(9-10): 1777-1785.
- [10] Papari S, Hawboldt K, Helleur R. Pyrolysis: a theoretical and experimental study on the conversion of softwood sawmill residues to bio-oil. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2015;54(2): 605-611.
- [11] Luo G, Chandler DS, Anjos LCA, Eng RJ, Jia P, Resende FLP. Pyrolysis of whole wood chips and rods in a novel ablative reactor. *Fuel*. 2017; 194: 229-238.
- [12] Papari S, Hawboldt K, Helleur R. Production and characterization of pyrolysis oil from sawmill residues in an auger reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017;56(8) : 1920-1925.
- [13] Pattiya A, Sukkasi S, Goodwin V. Fast pyrolysis of sugarcane and cassava residues in a free- fall reactor. *Energy*. 2012; 44(1): 1067-1077.
- [14] นิกรศิลป์ บุญสมบัติ, อติศักดิ์ ปัตติยะ. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2017;12: 1-11.
- [15] Shoaib AM, El-Adly RA. Hassanean MHM, Youssry A, Bhran AA. Developing a free-fall reactor for rice straw fast pyrolysis to produce bio-products. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018;27(4): 1305-1311.
- [16] ณัฐพันธ์ พรหมสาภา, นุชิตา สุวแพทย์ อติศักดิ์ ปัตติยะ. การผลิตไบโอออยล์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของกาก/เปลือกเมล็ดมะเขือเทศและกากเมล็ดปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบฟอง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2014; 9(2): 23-32.
- [17] สถาพร สอนสุภาพ, อติศักดิ์ ปัตติยะ. การปรับปรุงสมบัติของไบออยล์ด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2019;14(1): 106-115.
- [18] Klaigaw K, Wattanapaphawong P, Khuhaudomlap N, Hinchiranan N, Kuchontara, P, Kangwansaichol K, Reubroycharoen P. Liquid phase pyrolysis of giant leucaena wood to bio-oil over NiMo/Al₂O₃ catalyst. *Energy Procedia*. 2015; 79:492-499.
- [19] Ellens CJ, Brown RC. Optimization of a free-fall reactor for the production of fast pyrolysis bio-oil. *Bioresour Technol*. 2012;103(1): 374-80.
- [20] ASTM standards. ASTM D7544 – 12. *Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel*. Washington; 2014.