

ไพโรไลซิสของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในท้องถิ่นจังหวัดนครปฐม

Pyrolysis of agricultural residues in the local area of Nakhon Pathom Province

อรทัย วงษาเวียง¹, มาลีวรรณ อุณพิพัฒน์¹, ชลธิชา เจริญเนตร¹ และเอกราชชัย ไชยชนะ^{1,*}

¹หน่วยวิจัยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพ สาขาวิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

บทคัดย่อ

เพื่อเป็นการลดปัญหาการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่นจังหวัดนครปฐมและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกส้มโอ ขานอ้อย และฝักราชพฤกษ์ ถูกนำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นประกอบด้วย น้ำมันชีวภาพ ถ่าน และแก๊สเชื้อเพลิง จากการทดลองพบว่าฝักราชพฤกษ์จะให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงที่สุด (33.16 wt%) ตามมาด้วยขานอ้อยและเปลือกส้มโอ (28.40 และ 20.10 wt%) เนื่องจากปริมาณความชื้นในฝักราชพฤกษ์ต่ำกว่าเปลือกส้มโอและขานอ้อยทำให้กระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้น้ำมันชีวภาพเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเกิดขึ้นได้น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำมันชีวภาพจากฝักราชพฤกษ์มีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุด (pH 3.0) ขณะที่น้ำมันชีวภาพจากเปลือกส้มโอมีค่าความร้อนสูงสุด เท่ากับ 22.39 MJ/kg สำหรับถ่านที่ได้จากวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีพื้นที่ผิวไม่สูงนักโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 13.19 ถึง 23.24 m²/g และพบว่าถ่านจากขานอ้อยมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด ตามมาด้วยฝักราชพฤกษ์และเปลือกส้มโอ

คำสำคัญ: การไพโรไลซิส, วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร, น้ำมันชีวภาพ

Abstract

To reduce problems of agricultural residues management in the local area of Nakhon Pathom Province and add value to it, 3 agricultural residues i.e. pomelo peel, bagasse and cassia pods were brought to a pyrolysis process to obtain the higher value products including bio-oil, char and fuel-gas. It can be found that the cassia pods provided the highest bio-oil yield (33.16 wt%) followed by the bagasse and pomelo peel (28.40 and 20.10 wt%). This is due to the lower moisture content in the cassia pods compared to the two others, leading to a steam reforming which is a process to convert bio-oil into fuelgas being less likely to occur. In addition, it was found that the bio-oil from the cassia pods also had the lowest acidity (pH 3.0) while the bio-oil from the pomelo peel had the highest heat content value (22.39 MJ/kg). For the chars obtained from the 3 materials, it was found that all of them had the relatively low surface area ranging from 13.19 to 23.24 m²/g and found that the char from the bagasse had the lowest ash content followed by the cassia pods and pomelo peel.

Keywords: pyrolysis, agricultural residues, bio-oil

Article history: Received 11 May 2016, Accepted 15 July 2016

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมเป็นจำนวนมาก ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการขนส่ง

ซึ่งกำลังการผลิตน้ำมันภายในประเทศไม่เพียงพอต่อความต้องการจึงต้องมีการนำเข้าเพิ่มเติมจากต่างประเทศ

*Corresponding author; e-mail: ekinchem@yahoo.com

ด้วยอีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำมันจากแหล่งผลิตตามธรรมชาติทั้งภายในและภายนอกประเทศลดน้อยลงมากจนทำให้ทั่วโลกหันมาให้ความสำคัญในการบริโภคน้ำมันอย่างรู้คุณค่า และแสวงหาพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทนเพื่อนำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงดังกล่าว น้ำมันชีวภาพที่สามารถผลิตโดยใช้วัสดุชีวภาพหรือชีวมวล เช่น วัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรต่าง ๆ ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน นอกจากนี้การใช้น้ำมันชีวภาพยังเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากวัสดุเหลือทิ้งโดยจะถูกนำมาแปรรูปให้เป็นวัสดุที่มีมูลค่า

จังหวัดนครปฐมจัดเป็นจังหวัดที่มีความสำคัญทางด้านเกษตรกรรมของประเทศไทย สามารถปลูกพืชได้หลากหลายชนิดเนื่องจากความอุดมสมบูรณ์ของพื้นดินและสภาพอากาศที่เหมาะสม โดยพืชที่นิยมปลูกกันมากและจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญได้แก่ ส้มโอ ซึ่งมีการปลูกกันอย่างแพร่หลายเกือบทุกท้องถิ่นในจังหวัด ปริมาณเปลือกส้มโอที่เหลือจากการบริโภคจึงมีปริมาณมากด้วยเช่นกัน โดยบางส่วนนำไปแปรรูปเป็นอาหารหรือปุ๋ยชีวภาพ อย่างไรก็ตามก็ยังคงเหลือเปลือกส้มโอจำนวนมากที่ไม่ได้นำไปใช้งาน และถูกทิ้งไว้เป็นขยะ ส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมในท้องถิ่นนั้น ๆ จากการศึกษาเปลือกส้มโอพบว่าภายในประกอบไปด้วยต่อมน้ำมันขนาดเล็กจำนวนมากอยู่บริเวณรอบ ๆ ผิว [1] ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้อาจส่งผลให้เปลือกส้มโอมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพได้ พืชอีกประเภทที่มีการปลูกกันมากในจังหวัดนครปฐม ได้แก่ อ้อย ซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาล ส่งผลให้ปริมาณขานอ้อยที่เหลือจากการคั้นเอาน้ำอ้อยออกไปมีอยู่ในปริมาณมาก ขานอ้อยบางส่วนถูกนำไปเผาโดยตรงเพื่อให้ความร้อนสำหรับการผลิตไฟฟ้าภายในโรงงาน ซึ่งปริมาณไฟฟ้าที่ได้ยังคงไม่สูงนักเมื่อเทียบกับปริมาณขานอ้อยที่ใช้ ดังนั้นการนำขานอ้อยมาผ่านการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้น้ำมันชีวภาพ แก๊ส และถ่าน เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ นอกจากนี้พืชเกษตรกรรมที่มีการเพาะปลูกเพื่อจำหน่ายสร้างรายได้แล้วในจังหวัดนครปฐมยังมีพืชที่ขึ้นตามธรรมชาติซึ่งมีความสวยงามและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ราชพฤกษ์ โดยประโยชน์ของราชพฤกษ์มีอยู่มากมาย เช่น ใบ ใช้ฆ่าเชื้อโรค แก้เส้นพิการ แก้โรคเกี่ยวกับสมองส่วนดอก แก้แผลเรื้อรัง ช่วยหล่อลื่นลำไส้ รักษาโรคกระเพาะอาหาร [2] สำหรับฝักราชพฤกษ์มีส่วนประกอบที่เมล็ดซึ่งมีน้ำมันในตัว มีการสกัดเพื่อใช้เป็นน้ำมันในการนวดผ่อนคลาย [3] จากลักษณะของฝักที่มีน้ำมันเป็นส่วนผสมนี้จึงน่าจะมีความเหมาะสมที่

นำไปใช้เพื่อการผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพได้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับฝักราชพฤกษ์ที่ร่วงหล่นเป็นขยะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการไพโรไลซิสของวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรในจังหวัดนครปฐมได้แก่ เปลือกส้มโอ ขานอ้อย และฝักราชพฤกษ์ โดยเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตที่ได้จากวัสดุทั้ง 3 ประเภท จากนั้นทดสอบสมบัติของผลผลิตจากการไพโรไลซิสทั้งหมดโดยน้ำมันชีวภาพที่ได้นำมาทดสอบค่าความร้อนและความเป็นกรดเบส สำหรับถ่านที่ได้นำมาทดสอบองค์ประกอบของธาตุและปริมาณธาตุภายในถ่าน

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการแตกตัวหรือสลายโมเลกุลของสารประกอบหรือวัสดุต่าง ๆ ในสภาวะปราศจากออกซิเจน ภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 400–800°C [4] ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1) ของแข็ง หรือ ถ่าน (char) 2) ของเหลวซึ่งมีลักษณะและสมบัติคล้ายน้ำมัน และ 3) แก๊ส โดยถ่านสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หรือสามารถนำไปกระตุ้นต่อเพื่อเป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ในการดูดซับสารอันตรายต่าง ๆ สำหรับน้ำมันอาจนำไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงได้ทันที หรือปรับปรุงสมบัติก่อนเพื่อการใช้งานที่เหมาะสมแก่เครื่องยนต์แต่ละชนิด และสำหรับแก๊สสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกับน้ำมันและถ่าน สำหรับสัดส่วนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในแต่ละชนิดไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น องค์ประกอบของวัตถุดิบเริ่มต้น อัตราเร็วในการให้ความร้อน อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรมีการศึกษาหลากหลายรูปแบบทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยเฉพาะในประเทศเกษตรกรรมที่วัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรจำนวนมากซึ่งก่อปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา

Montoya *et al.* [5] ดำเนินการไพโรไลซิสสำหรับขานอ้อยเหลือทิ้งในประเทศโคลัมเบียโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด พบว่าอุณหภูมิ อัตราการป้อนชีวมวล อัตราการไหลของแก๊สพา ขนาคิวสเบด ต่างส่งผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ โดยสภาวะที่ดีที่สุดของการไพโรไลซิสคือที่อุณหภูมิ 500°C อัตราการไหลของแก๊สพา 5 L/min วัสดุเบดควรมีขนาด 0.600 และ 0.425 mm และอัตราการป้อนชีวมวลเท่า 2 kg/h สภาวะดังกล่าวสามารถให้ผลผลิตของน้ำมัน 72.94 wt% ถ่าน 23.28 wt% และแก๊ส ตัวแปร

ที่ส่งผลสำคัญต่อการการไฟโรไลซิสได้แก่ อุณหภูมิ โดยเมื่อเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเพิ่มขึ้น และขนาดของวัสดุเบคโดยขนาดที่เล็กจะทำให้ปริมาณผลผลิตลดลง

Mullen *et al.* [6] ผลิตน้ำมันชีวภาพและถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและต้นข้าวโพด โดยใช้วิธีไฟโรไลซิสพบว่าปริมาณผลผลิตน้ำมันของวัสดุทั้ง 2 ชนิด อยู่ที่ประมาณ 60 wt% ค่าความร้อน 20 MJ/kg และความหนาแน่น มากกว่า 1.0 Mg/m³ จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นดังกล่าวนี้มีค่าสูงกว่าของซังข้าวโพดที่เหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยวประมาณ 20-32 เท่า ทำให้มีความสะดวกในการขนส่งมากกว่าปริมาณถ่านที่ผลิตได้สำหรับซังข้าวโพดเท่ากับ 18.9 wt% และต้นข้าวโพดเท่ากับ 17.0 wt% และพบว่าในถ่านเหล่านี้มีปริมาณแร่ธาตุอาหารสูงสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินได้ วรรณิศา เจริญพันธ์ และณัฐฤทธา อภิวงษ์งาม [7] ได้ศึกษาความเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพจากการไฟโรไลซิส เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไฟโรไลซิสจากเมล็ดงาขาว อุณหภูมิที่ใช้คือ 400 500 550 และ 600°C ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า โดยน้ำมันไฟโรไลซิสที่ได้จะถูกนำมาตรวจสอบลักษณะการสลายตัวทางความร้อน และสมบัติทางโครงสร้างด้วย FTIR จากผลการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่า ผลที่ได้ น้ำมันไฟโรไลซิสจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้และมีค่าสูงสุดคือ 24.59 wt%

Lee *et al.* [8] ศึกษาการไฟโรไลซิสของแกลบโดยทำให้ร้อนตัวกับสารประกอบแอมโมเนียมที่แตกต่างกันได้แก่ แอมโมเนียมอะซิเตท (ammonium acetate) ยูเรีย (urea) แอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulfate) และแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (ammonium dihydrogen phosphate) การเพิ่มแอมโมเนียมลงไปในระบบทำให้สารประกอบคาร์บอนกลายเป็นสารประกอบไนโตรเจนแบบเฮโทรไซคลิกและจะพบสารประกอบปริมาณมากในน้ำมันจากไฟโรไลซิส สำหรับแอมโมเนียมซัลเฟต และแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตทำให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันลดลงมากและแก๊สที่เกิดขึ้นมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนสูง สำหรับของแข็งจากกระบวนการไฟโรไลซิสเหมาะที่จะไปใช้เป็นปุ๋ยและถ่านกัมมันต์

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การเตรียมวัสดุ

นำเปลือกส้มโอ ขาน้อย และ ฝักราชพฤกษ์ มาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 10 mm สำหรับขาน้อยและฝักราชพฤกษ์หั่นตามแนวยาวโดยฝักราชพฤกษ์ที่มีความกว้างหรือหนาเกินกว่า 10 mm ทำการลดขนาดไม่ให้เกิน 10 mm สำหรับเปลือกส้มโอควบคุมด้านกว้าง ยาว และหนา ให้ไม่เกิน

10 mm จากนั้นนำมาตากให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 วันนำตัวอย่างวัสดุที่เตรียมไปได้หาความชื้นโดยเครื่องชั่งแบบให้ความร้อนของ Satorius รุ่น ID1000 และหาปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน ASTM D 3174-95

4.2 การไฟโรไลซิส

นำวัสดุที่เตรียมไว้ปริมาณ 5 กรัม ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบโลหะขนาด 0.4 L วางในแนวตั้งสำหรับแผนผังกระบวนการไฟโรไลซิสแสดงดังรูปภาพที่ 1 โดยกระบวนการเริ่มด้วยการผ่านแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตรา 30 mL/min เข้าไปเพื่อไล่อากาศเป็นเวลา 30 นาที เพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 10°C/min จนถึงอุณหภูมิ 400°C รักษาอุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ผ่านไปยังเครื่องควบแน่นเพื่อกลั่นเป็นน้ำมันชีวภาพส่วนที่ไม่ควบแน่นถูกลอยออกไป เมื่อครบเวลาปิดเครื่องให้ความร้อนแต่ยังคงผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไป เมื่อเครื่องปฏิกรณ์เย็นลงนำผลผลิตที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก

4.3 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์

4.3.1 ปริมาณผลผลิต

ผลผลิตจากการไฟโรไลซิสประกอบด้วยสาร 3 สถานะ ได้แก่ ของแข็ง (ถ่าน) ของเหลว (น้ำมัน) และแก๊ส การคำนวณปริมาณร้อยละของผลผลิตของสารแต่ละสถานะแสดงดังสมการที่ 1

$$\text{ปริมาณผลผลิต (wt\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของสารแต่ละสถานะ}}{\text{น้ำหนักผลผลิตรวม}} \times 100 \quad (1)$$

4.3.2 สมบัติของน้ำมันชีวภาพจากการไฟโรไลซิส

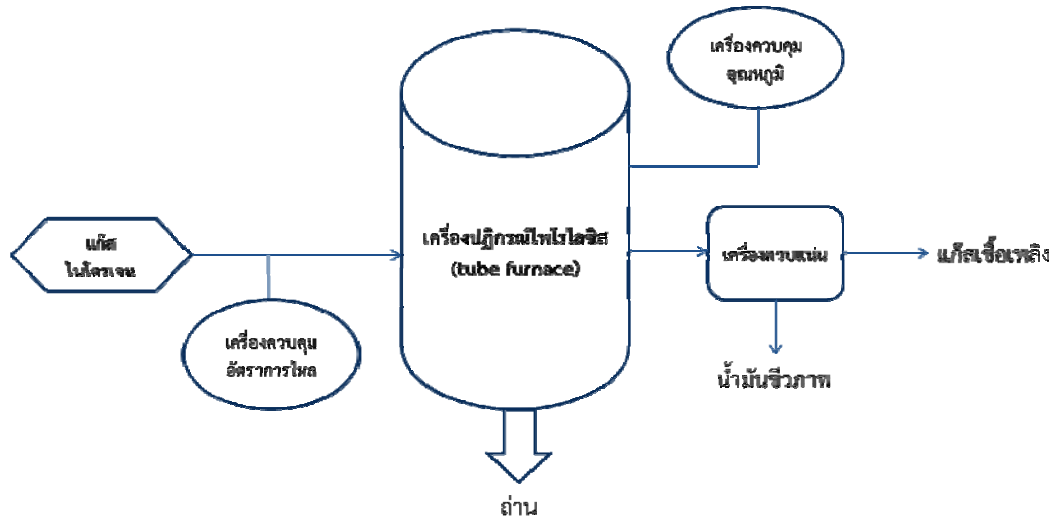
ค่าความเป็นกรด (pH) ตรวจวัดโดยใช้เครื่อง pH meter ของ Index รุ่น MA40 ค่าความร้อนของน้ำมันตรวจวัดด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter) ของ Parr Instrument รุ่น IL61265

4.3.3 สมบัติของถ่านจากการไฟโรไลซิส

ปริมาณเถ้า (ash) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3174-95 การหาปริมาณเถ้าแสดงดังสมการที่ 2

$$\text{ปริมาณเถ้า (wt\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของถ่านตัวอย่างก่อนเผา}}{\text{น้ำหนักของถ่านตัวอย่างหลังเผา}} \times 100 \quad (2)$$

ธาตุองค์ประกอบของถ่านตรวจวัดโดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence spectrometer ของ Pananalytical รุ่น MINIPAL4 ตัวอย่างของแข็งที่ตรวจวัดประมาณ 5 กรัม และพื้นที่ผิว (BET surface area) ตรวจวัดโดยใช้เครื่อง nitrogen adsorption ของ BEL (Japan) รุ่น BELSORP-mini



รูปภาพที่ 1 กระบวนการไพโรไลซิส

ตารางที่ 1 ปริมาณผลผลิตและสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัสดุ	ความชื้นของวัสดุ (wt%)	ปริมาณเถ้าของวัสดุ (wt%)	ปริมาณผลผลิต (wt%)			ค่าความร้อนของน้ำมัน (MJ/kg)	ความเป็นกรดของน้ำมัน (pH)
			น้ำมัน	ถ่าน	แก๊ส		
เปลือกส้มโอ	15.27	4.61	20.10	22.44	57.46	22.39	2.4
ชานอ้อย	11.93	6.27	28.40	22.85	48.75	18.45	2.2
ฝักราชพฤกษ์	8.32	6.30	33.16	26.20	40.64	21.36	3.0

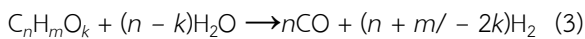
5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 ปริมาณผลผลิต

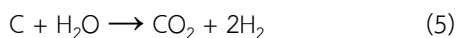
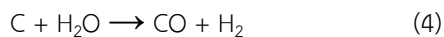
ปริมาณผลผลิตจากการไพโรไลซิสวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกส้มโอ ชานอ้อย และฝักราชพฤกษ์ และผลการวิเคราะห์หัตถุติบ (proximate analysis) ได้แก่ ความชื้นและปริมาณเถ้าแสดงในตารางที่ 1 จากตารางพบว่า ปริมาณผลผลิตน้ำมันชีวภาพจากฝักราชพฤกษ์จะมีปริมาณสูงสุด ตามมาด้วยชานอ้อยและเปลือกส้มโอน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสฝักราชพฤกษ์ในงานวิจัยชิ้นนี้ (33.16 wt%) มีปริมาณสูงกว่างานวิจัยของธนวัฒน์ เสนาพล และภรณันท์ แสงกล้า (19.80 – 24.96 wt%) [9] ที่ทำการไพโรไลซิสฝักราชพฤกษ์ที่อุณหภูมิ 300 – 600°C สำหรับน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสชานอ้อยเท่ากับ 28.40 wt% ซึ่งน้อยกว่างานวิจัยของ Montoya *et al.* (72.94 wt%) [5] และงานวิจัยของนิลวรรณ ไพรัชจรเดช และเสาวลักษณ์ สุโรจนกุล [10] (ประมาณ 40 wt%) จะเห็นได้ว่าแม้การ ไพโรไลซิสชานอ้อยเหมือนกันยังได้ผลผลิตน้ำมันแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจาก ระบบไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยชิ้นแรกใช้อ่างถึงใช้ระบบการไพโรไลซิสแบบเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไดเซชันเบด ชนิดพองอากาศ (bubbling fluidized-bed reactor) ซึ่งข้อดี

ของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ คือมีการกระจายความร้อนได้ทั่วถึง และมีผิวสัมผัสระหว่างวัสดุที่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสกับ แก๊สพาสูง ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีหรือสามารถ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิส เช่น น้ำมันชีวภาพหรือแก๊สเชื้อเพลิงถูกนำออกไปได้สะดวก ส่งผลให้ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของเหลวหรือน้ำมันเกิดได้ดีขึ้น ดังนั้นระบบฟลูอิดไดเซชันจึงให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดถาวร (fixed bed reactor) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ขณะที่งานวิจัยชิ้นที่ 2 ที่อ้างถึงได้ใช้อุณหภูมิ ในการไพโรไลซิสเท่ากับ 500°C และอัตราการให้ความร้อน 25°C/min ซึ่งพบว่ามีปริมาณผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงกว่า งานวิจัยนี้ โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณ ผลผลิตน้ำมันชีวภาพลดลง แต่อัตราการให้ความร้อนที่สูงขึ้น อาจให้ผลตรงข้ามกัน เนื่องจากอัตราการให้ความร้อนที่ต่ำจะ ส่งผลให้เกิดความต้านทานการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ทำให้วัสดุเกิดการสลายตัวเป็นน้ำมันได้น้อยลง และเมื่ออัตรา การให้ความร้อนสูงขึ้นจะลดความต้านทานดังกล่าวลงไป ทำให้ปริมาณผลิตน้ำมันสูงขึ้น นอกจากนี้สายพันธุ์ของอ้อยซึ่ง แตกต่างกันในแต่ละภูมิภาคอาจทำให้ที่องค์ประกอบทางเคมี ภายในชานอ้อยแตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตน้ำมัน

ที่ได้ไม่เท่ากัน สำหรับน้ำมันชีวภาพจากเปลือกส้มโอ ไม่พบว่ามีการดำเนินการในงานวิจัยใดที่ได้รับการเผยแพร่ จึงไม่มีข้อมูลเปรียบเทียบกัน แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเปลือกส้มโอสามารถนำไปผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพได้เช่นกัน แม้ว่าปริมาณผลผลิตน้ำมันจะลดลงเมื่อปริมาณความชื้นของวัสดุเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นหรือน้ำที่คงอยู่ในวัสดุระหว่างการไพโรไลซิสทำให้เกิดกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) ซึ่งจะเปลี่ยนให้น้ำมันชีวภาพในสถานะของเหลวกลายเป็นแก๊ส [11] ดังสมการที่ 3



จากการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณแก๊สจะเพิ่มขึ้นตามความชื้นของวัสดุที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกันเนื่องจากความชื้นที่อยู่ในวัสดุยังส่งเสริมให้เกิดกระบวนการกลายเป็นแก๊สด้วยไอน้ำ (steam gasification) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานชีวมวลซึ่งของแข็งให้เป็นแก๊ส โดยให้ความร้อนผ่านตัวกลางเป็นไอน้ำ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ 4 และสมการที่ 5 [12]



ดังนั้นจึงพบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณของถ่านจากการไพโรไลซิสลดลงจากผลการทดลองข้างต้นซึ่งพบว่าทั้งปริมาณผลผลิตน้ำมันและของแข็งลดลง ขณะที่ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีความชื้นมากขึ้น จะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xiong *et al.* [13] ที่ทำการศึกษาการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสีย (sewage sludge) ที่มีความชื้นแตกต่างกัน ซึ่งได้พบว่าเมื่อไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียที่มีความชื้นเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันและของแข็งลดลงขณะที่ปริมาณแก๊สเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน สำหรับปริมาณเถ้าของวัสดุอาจส่งผลต่อปริมาณผลผลิตได้ด้วยเช่นกัน โดยจากผลการทดลองพบว่าปริมาณเถ้าของขานอ้อยและฝักราชพฤกษ์มีปริมาณใกล้เคียงกัน (6.27 และ 6.30 wt%) ขณะที่เปลือกส้มโอมีค่าต่ำสุด (4.61 wt%) โดยจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Pradhan [14] พบว่าปริมาณเถ้าของวัสดุที่มากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันลดลงเนื่องจากเถ้าจะไปลดปริมาณสารระเหย คาร์บอน และไฮโดรเจนที่อยู่ในวัสดุ อย่างไรก็ตามผลการทดลองดังกล่าวไม่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ เพราะฉะนั้นผลกระทบจากปริมาณความชื้นของวัสดุน่าจะส่งผลต่อปริมาณผลผลิตมากกว่าปริมาณเถ้าสำหรับการทดลองนี้

5.2 สมบัติของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิส

เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของน้ำมันจากการไพโรไลซิสวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่า เปลือกส้มโอให้น้ำมันที่มีค่าความร้อน (heating value) สูงที่สุด (22.39 MJ/kg) รองลงมาเป็นฝักราชพฤกษ์และขานอ้อย (21.36 และ 18.45 MJ/kg) ซึ่งความร้อนของน้ำมันจากวัสดุทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสชีวมวลที่เคยมีการศึกษากันมา ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 16 – 23 MJ/kg [15] โดยค่าความร้อนของน้ำมันจะเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบที่อยู่ภายในน้ำมัน ปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าความร้อนของน้ำมันลดลง ได้แก่ ปริมาณน้ำและปริมาณออกซิเจน ซึ่งน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสโดยทั่วไปจะมีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันจากปิโตรเลียมเนื่องจากมีปริมาณของน้ำและออกซิเจนสูงกว่า จากงานวิจัยของ Islam *et al.* [16] ซึ่งทำการไพโรไลซิสขานอ้อยที่อุณหภูมิ 450°C พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากขานอ้อยมีค่า 19.185 MJ/Kg ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองนี้ แต่ต่ำกว่าค่าน้ำมันดีเซลทางการค้า (45.00-46.00 MJ/kg) ค่อนข้างมาก ค่าความร้อนที่ต่ำของน้ำมันชีวภาพจากขานอ้อยเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่สูง โดยมีค่าอยู่ที่ 48.47% สำหรับความแตกต่างทางความร้อนของน้ำมันจากวัสดุทั้ง 3 ชนิด น่าจะเกิดจากองค์ประกอบภายในน้ำมันที่แตกต่างกัน ซึ่งควรมีการตรวจวิเคราะห์เพิ่มเติมในการศึกษาครั้งต่อไป ลักษณะทางกายภาพของวัสดุก่อนผ่านการไพโรไลซิสก็อาจส่งผลได้เช่นกัน ทั้งนี้สังเกตได้ว่าวัสดุหรือพืชที่สารประเภทที่น้ำมันหรือน้ำมันหอมระเหยเป็นองค์ประกอบอย่างฝักราชพฤกษ์หรือเปลือกส้มโอ จะให้น้ำมันชีวภาพที่มีค่าความร้อนสูงกว่าวัสดุที่ไม่มีองค์ประกอบของน้ำมันภายในอย่างขานอ้อย

จากการทดสอบค่าความเป็นกรดพบว่าน้ำมันชีวภาพจากฝักราชพฤกษ์มีค่าความเป็นกรดต่ำสุด (pH 3) ตามมาด้วยเปลือกส้มโอและขานอ้อย (ประมาณ pH 2) ทั้งนี้ค่าความเป็นกรดที่สูงของน้ำมันจะส่งผลต่อการนำไปใช้โดยค่าความเป็นกรดสูงจะมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนทำให้เครื่องยนต์ที่ใช้ใช้น้ำมันดังกล่าวเกิดการสึกหรอและมีอายุการใช้งานต่ำลง น้ำมันชีวภาพจากชีวมวลมักจะมีค่าความเป็นกรดสูงกว่าน้ำมันจากปิโตรเลียมเนื่องจากมีสารประกอบอินทรีย์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก นอกจากนี้ยังมีความเป็นขี้สูงเนื่องจากมีองค์ประกอบของสารกลุ่มออกซิเจน (oxygenated compound) อยู่ในปริมาณสูง [15] สำหรับสาเหตุที่น้ำมันชีวภาพจากฝักราชพฤกษ์มีค่าความเป็นกรดต่ำกว่าวัสดุอีก 2 ชนิด เนื่องจากฝักราชพฤกษ์มีองค์ประกอบของโปรตีนอยู่สูง [17] ซึ่งโปรตีนที่มีสารประกอบหมู่ไนโตรเจนจะมีความเป็นเบสส่งผลให้ค่า pH

ตารางที่ 2 ปริมาณธาตุองค์ประกอบ พื้นผิว และปริมาณเถ้าของถ่านจากการไพโรไลซิสวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัสดุ	ปริมาณธาตุองค์ประกอบของถ่าน (at%)											พื้นที่ ผิว (m ² /g)	ปริมาณ เถ้า (wt%)
	CHO	Zn	Fe	Ca	K	P	S	Si	Mg	Mn	Cu		
เปลือกส้มโอ	94.170	0.001	0.006	1.125	4.662	0.036	-	-	-	-	-	13.52	15.02
ขานอ้อย	99.054	-	0.004	0.178	0.211	0.045	-	0.369	0.134	0.004	-	23.24	6.26
ฝักราชพฤกษ์	97.236	0.008	0.010	0.406	2.056	-	0.055	0.147	-	0.002	0.076	13.19	9.11

สูงขึ้น ทำให้น้ำมันที่ผลิตจากฝักราชพฤกษ์มีความเป็นกรดต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chueluecha & Duangchan [18] ซึ่งศึกษาการนำปุ๋ยคอกที่มีองค์ประกอบของโปรตีนมาทำการไพโรไลซิสและไพโรไลซิสร่วมกับขานอ้อย พบว่าน้ำมันชีวภาพจากปุ๋ยคอกมีความเป็นกรดต่ำ (pH 4.63) และเมื่อไพโรไลซิสร่วมกับขานอ้อยยังช่วยให้น้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสร่วมที่ได้มีความเป็นกรดต่ำกว่าน้ำมันจากการไพโรไลซิสขานอ้อยอย่างเดียว (จาก pH 1.95 เป็น 3.71)

5.3 สมบัติของถ่านจากการไพโรไลซิส

ถ่านที่ได้จากการไพโรไลซิสวัสดุทั้ง 3 ชนิด ถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติ ได้แก่ ธาตุองค์ประกอบโดยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (XRF) และปริมาณเถ้าผลการทดสอบสมบัติของถ่านทั้งหมดแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 พบว่าปริมาณเถ้าของถ่านจากวัสดุทั้ง 3 ชนิด มีความแตกต่างกันโดยถ่านจากเปลือกส้มโอมีปริมาณเถ้าสูงสุด (15.02 wt%) ตามด้วยฝักราชพฤกษ์และขานอ้อย (9.11 และ 6.26 wt% ตามลำดับ) จากผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยเครื่อง XRF จะเห็นได้ว่าปริมาณเถ้าของถ่านจะแปรผันตรงกับปริมาณสารอินทรีย์หรือปริมาณธาตุอื่น ๆ นอกเหนือจากธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน (CHO) ที่คงอยู่ในถ่านและจากตารางยังสังเกตเห็นได้ว่าในถ่านจากเปลือกส้มโอจะมีปริมาณธาตุโพแทสเซียม (K) อยู่สูงเนื่องจากในส้มโอมีปริมาณธาตุโพแทสเซียมอยู่สูงทั้งในเนื้อผลและเปลือก [19] สำหรับถ่านจากขานอ้อยจะพบว่ามีปริมาณซิลิกอน (Si) สูง เนื่องจากอ้อยเป็นพืชตระกูลหญ้าจึงมีความสามารถในการดูดซึมซิลิกา (SiO₂) ได้ดีสำหรับนำมาไว้ในผนังเซลล์เพื่อช่วยทำให้ลำต้นตั้งตรง [20] สำหรับปริมาณเถ้าจะส่งผลต่อคุณภาพของถ่าน โดยถ่านที่มีปริมาณเถ้าต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 4) จะจัดเป็นถ่านคุณภาพสูงสามารถให้ความร้อนได้ดีและยาวนาน [21] นอกจากนี้ ปริมาณเถ้าในถ่านยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารในกรณีที่จะนำถ่านไปใช้เป็นสารดูดซับ นอกเหนือจากค่าพื้นที่ผิว สำหรับค่าพื้นที่ผิวของถ่านทั้ง 3 ชนิด มีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khezami *et al.* [22] ที่กล่าวว่ากระบวนการไพโรไลซิสโดยทั่วไปมักจะให้ผลผลิตที่เป็นถ่าน

คุณภาพไม่ดีนักโดยถ่านที่ได้จะมีพื้นที่ผิวไม่เกิน 300 m²/g อย่างไรก็ตามถ่านเหล่านี้สามารถที่จะนำไปกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ได้ โดยผ่านวิธีการทางเคมีหรือกายภาพซึ่งจะทำให้พื้นที่ผิวของถ่านสูงขึ้นเหมาะสมกับการดูดซับมากขึ้น และเพื่อทดสอบการดูดซับของถ่านจากการไพโรไลซิสในการทดลองนี้ ได้นำตัวอย่างถ่านไปดูดซับสารละลายเบนซีนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เป็นพิษ และพบว่าความสามารถในการดูดซับเบนซีนของถ่านทั้ง 3 ชนิด เรียงลำดับจากมากไปน้อยเป็นดังนี้ ถ่านจากฝักราชพฤกษ์ ขานอ้อย และเปลือกส้มโอ โดยมีค่าเท่ากับ 55.83 45.83 และ 21.16 มิลลิกรัมของเบนซีน/กรัมของถ่าน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าการดูดซับเบนซีนของถ่านไม่สอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิว ซึ่งอาจเนื่องมาจากปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่าน เช่น หมู่ฟังก์ชันและความเป็นขั้วที่พื้นผิวของถ่าน

6. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกส้มโอ ขานอ้อย และฝักราชพฤกษ์ พบว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดสามารถนำมาผลิตน้ำมันชีวภาพได้ โดยฝักราชพฤกษ์จะให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงที่สุด ตามมาด้วยขานอ้อยและเปลือกส้มโอ ทั้งนี้เนื่องจากฝักราชพฤกษ์มีความชื้นในวัสดุต่ำที่สุด ส่งผลให้เกิดกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกลายเป็นแก๊สด้วยไอน้ำต่ำทำให้ปริมาณผลผลิตที่เป็นแก๊สต่ำและปริมาณผลผลิตน้ำมันชีวภาพรวมทั้งถ่านสูง น้ำมันชีวภาพจากฝักราชพฤกษ์ยังมีค่าความร้อนสูงที่สุดและมีความเป็นกรดต่ำสุด จึงน่าจะเหมาะนำไปพัฒนาเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงมากที่สุด สำหรับถ่านที่ได้จากวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่า ถ่านจากขานอ้อยมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด ตามมาด้วยถ่านจากฝักราชพฤกษ์และเปลือกส้มโอ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สำหรับความอนุเคราะห์ในการตรวจวัดปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง XRF

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณีภูสรัณย์ วีรพลพัฒน์กุล. (2550). **การยับยั้งเชื้อ *Vibrio harveyi* โดยใช้สารสกัดจากเปลือกส้มโอ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต โปรแกรมวิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา.
- [2] กานดา แสนมณี. (2557). **ชาดอกราชพฤกษ์หรือดอกคูน**. ค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2559 จาก <https://www.gotoknow.org/posts/566151>
- [3] Essential Oils Malaysia. (ม.ป.ป.). **Cassia Seed Essential Oils**. ค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2559 จาก <http://essentialoils.com.my/cassia-seed-essential-oil.htm>
- [4] กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (ม.ป.ป.). **เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก**. ค้นเมื่อ 1 มีนาคม 2559 จาก www.dpim.go.th/service/download?articleid=3499
- [5] Montoya, J. I., Valdes, C., Chejne, F., Gomez, C. A., Blanco, A., Marrugo, G., Osorio, J., Castillo, E., Aristobulo, J., & Acero, J. (2015). Bio-oil production from Colombian bagasse by fast pyrolysis in a fluidized bed: An experimental study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112, 379-387.
- [6] Mullen, C. A., Boateng, A. A., Goldberg, N. M., Lima, I. M., Laird, D. A. & Hicks, K. B. (2010). Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 34 (1), 67-74.
- [7] วรณิศา เจริญพันธ์ และณัฐฤตา อภิวงค์งาม. (2556). **ความเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสกากเมล็ดยางพาราร่วมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเตาปฏิกรณ์นอนแบบนิ่ง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [8] Li, K., Zhu, C., Zhang, L. & Zhu, X. (2010). Study on pyrolysis characteristics of lignocellulosic biomass impregnated with ammonia source. *Bioresource Technology*, 209, 142-147.
- [9] ธนวัฒน์ เสนาพล และภรณันท์ แสงกล้า. (2556). **การศึกษาการไพโรไลซิสฝักราชพฤกษ์**. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [10] นิลวรรณ ไพโรขจรเดช และเสาวลักษณ์ สุโรจนกุล. (ม.ป.ป.). **ถ่านชาร์และน้ำมันชีวภาพจากกะลามะพร้าวไม้ไผ่และกากชานอ้อย**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [11] Czernik, S., Evans, R. & French, R. (2007). Hydrogen from biomass-production by steam reforming of biomass pyrolysis oil. *Catalysis Today*, 129 (3-4), 265-268.
- [12] Karayildirim, T., Yanik, J., Yuksel, M. & Bockhorn, H. (2006). Characterisation of products from pyrolysis of waste sludges. *Fuel*, 85 (10-11), 1498-1508.
- [13] Xiong, S., Zhuo, J., Zhang, B. & Yao, Q. (2013). Effect of moisture content on the characterization of products from the pyrolysis of sewage sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 632-639.
- [14] Pradhan, U. (2015). **Physical treatments for reducing biomass ash and effect of ash content on pyrolysis products**. Master's Thesis, Department of Biosystems Engineering, Auburn University.
- [15] Gansekoele, E. (2016). **Pyrolysis oil properties**. ค้นเมื่อ 12 มกราคม 2559 จาก <https://www.btgbtl.com/en/applications/oilproperties>
- [16] Islam, M. R., Islam, M. N. & Islam, M. N. (2003). Fixed bed pyrolysis of sugarcane bagasse for liquid fuel production. *International Conference on Mechanical Engineering 2003 (ICME2003)*, Dhaka (Bangladesh).
- [17] Li, X., Yang, S. & Zhao, W. (2001). Extraction and separation of protein from cassia seed and determination of its partial primary structure. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 35 (7), 764-767.
- [18] Chueluecha, N. & Duangchan, A. (2012). Co-pyrolysis of biomass and cattle manure to produce upgraded bio-oil. *International Conference on Chemical, Environmental Science and Engineering (ICEES'2012)*, Pattaya, Thailand.

- [19] สมยศ มีทา, พงษ์ศักดิ์ ยิ่งยืน, สุภัทร์ อิศรางกูร ณ อยุธยา, พัชริน ส่งศรี และสังคม เตชะวงศ์เสถียร. (2557). คุณภาพของผลผลิตและปริมาณธาตุอาหารในผลส้มโอพันธุ์ทองดีจากสวนสามประเภท. *แก่นเกษตร*, 42 (3), 233-238.
- [20] ภัคภณ ศรีคล้าย. (2558). **นวัตกรรมการเกษตร (อ้อย)**. ค้นเมื่อ 1 พฤษภาคม 2559 จาก http://paccapon.blogspot.com/2015/03/blog-post_79.html
- [21] Green Power Co, Ltd. (2010-2013). **New-generation charcoal from “Greenpower”**. ค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2559 จาก <http://piroliz.org/products/2014-05-27-12-34-12/eng/>
- [22] Khezami, L., Ould-Dris, A. & Capart, R. (2007). Activated carbon from thermo-compressed wood and other lignocellulosic precursors. *BioResources*, 2 (2), 193-209.