SWU Engineering Journal (2018) 13(2), 106-117 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

ผลของตัวทำละลายที่ใช้เตรียมเหง้ามันสำปะหลังต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว

Influence of Solvents Used for Cassava Rhizome Pretreatment on Fast Pyrolysis Products

กฤษฎา ลำพองชาติ[1] นุวงศ์ ชลคุป[2] อดิศักดิ์ ปัตติยะ[3*]
[1]นักศึกษาปริญญาโท, [3]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
[2]นักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย
ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
Gridsada Lampongchat[1] Nuwong Chollacoop[2] Adisak Pattiya[3]
[1]Student, [3]Assistant Professor Bio-Energy and Renewable Resources Research Unit
Faculty of Engineering Mahasarakham Unversity, Khamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150
[2]Researcher, National Metal and Materials Technology Center (MTEC), 114 Paholyotin Rd, Klong 1
Klong Luang, Pathumthani, 12120
*Corresponding author: Email: adisak_pattiya@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้แสดงผลการศึกษาผลของตัวทำละลาย 3 ชนิด ได้แก่ น้ำ อะซีโตน และเฮกเซน ที่ใช้เตรียมเหง้ามันสำปะหลังเพื่อลดสัดส่วนของสารสกัดก่อนนำชีวมวลไปผ่านกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านการสกัดด้วยน้ำ เฮกเซน และอะซีโตน ให้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวม ไบโอออยล์หนัก และแก๊สเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณผลได้ไบโอออยล์เบา และถ่านชาร์มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับชีวมวลตั้งต้น ปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวมสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 54 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้จากการใช้น้ำในการสกัดเหง้ามันสำปะหลัง จากการวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์ ค่าพีเอช ความหนาแน่น ปริมาณของแข็ง และปริมาณเถ้าของไบโอออยล์ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด แต่การสกัดด้วย เฮกเซนและอะซีโตนส่งผลให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ตัวทำละลายยังทำให้จุดวาบไฟ จุดติดไฟ ปริมาณไฮโดรเจน และปริมาณออกซิเจนของไบโอออยล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณคาร์บอนในไบโอออยล์มีแนวโน้มลดลงยกเว้นเมื่อสกัดด้วยอะซีโตน

คำสำคัญ: ไพโรไลซีสแบบเร็ว ผลของตัวทำละลาย สารสกัด ไบโอออยล์

ABSTRACT

Three solvents including water, hexane and acetone were used to pretreat cassava rhizome. The pretreated biomass samples had lower extractives content compared to the non-extracted one. The pretreated samples together with the original biomass were fast pyrolysed in a fluidised bed reactor

producing bio-oil, char and gas. The results showed that after extraction with water, hexane and acetone, the yields of total bio-oil, heavy bio-oil and gas increased at the expense of light bio-oil and char yields. A maximum total bio-oil yield of 54 wt% was achieved when using water as solvent. Based on the property analyses, all solvents hardly affect the pH, solids content, ash content and density of bio-oils. However, hexane and acetone could increase the bio-oil heating value. In addition, the flash point, fire point, hydrogen and oxygen contents were increased by the solvent extraction, whereas the carbon content of bio-oil reduced except when using acetone.

Keyword: Fast pyrolysis, solvent effect, extractives, bio-oil.

1. บทนำ

ไพโรไลซีสแบบเร็วคือการแยกสลายทางความร้อนอย่างรวดเร็ว โดยใช้อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ในสภาวะไร้ออกซิเจน เวลาคงอยู่ของไอสั้น สามารถแปลงสภาพเชื้อเพลิงของแข็ง เช่น ชีวมวล ให้กลายเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งเรียกว่า “ไบโอออยล์ (Bio-oil)” ในประมาณร้อยละ 40-70 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์รอง ได้แก่ ถ่านชาร์ (Char) ประมาณร้อยละ 17-27 โดยน้ำหนัก และแก๊ส (Gas) ประมาณร้อยละ 9-38 โดยน้ำหนัก [1-8] ผลิตภัณฑ์ที่ได้เหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นถ่านชาร์ที่สามารถนำมาทำเป็นถ่านอัดแท่ง แก๊สสามารถนำมาเผาไหม้ร่วมกับแก๊สธรรมชาติ และไบโอออยล์ที่ได้มีลักษณะและสมบัติเทียบเคียงกับน้ำมันเตา ซึ่งสามารถนำไปเผาไหม้ให้ความร้อนแก่หม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และยังสามารถนำไปสกัดเป็นสารเคมี ข้อดีเหล่านี้ทำให้นักวิจัยและหน่วยงานต่าง ๆ หันมาสนใจในกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็วที่สามารถผลิตพลังงานทดแทนที่เป็นพลังงานสะอาดและใช้แล้วไม่มีวันหมดไป วัตถุดิบส่วนใหญ่ที่นำมาใช้คือ ชีวมวลซึ่งหาได้จากกากเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น ใบและยอดอ้อย กากเมล็ดสบู่ดำ และเหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว เมื่อนำมาใช้งานยังคงมีข้อด้อยเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เนื่องจากปริมาณน้ำ จุดวาบไฟ จุดติดไฟ และปริมาณออกซิเจนมีค่าค่อนข้างสูง ส่งผลให้ความสามารถในการเผาไหม้และค่าความร้อนมีค่าต่ำ สมบัติของไบโอออยล์เหล่านี้สัมพันธ์กับตัวแปรของกระบวนการ และโครงสร้างของชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ตัวแปรในกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็วส่งผลต่อปริมาณผลได้ไบโอออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊สเป็นส่วนใหญ่ เช่น เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ไบโอออยล์มีปริมาณลดลงสูงถึงประมาณร้อยละ 20 และได้ถ่านชาร์เพิ่มขึ้นสูงถึงประมาณร้อยละ 60 [7] และที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ไบโอออยล์มีปริมาณลดลงสูงถึงประมาณร้อยละ 11 และได้แก๊สเพิ่มขึ้นสูงถึงประมาณร้อยละ 58 [7] ส่วนค่าความร้อน ปริมาณออกซิเจน และปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในไบโอออยล์ มีค่าไม่แตกต่างกันที่ช่วงอุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส [7, 9] นอกจากนี้อัตราการป้อน ชีวมวลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไบโอออยล์มีปริมาณลดลง ถ่านชาร์ และความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น [10] ความเหมาะสมของอัตราการป้อนยังขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซีสขึ้น เครื่องปฏิกรณ์แบ่งออกเป็นหลายชนิดและชนิดที่นิยมใช้กันมากคือ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟอง ที่มีตัวกลางถ่ายโอนความร้อนอยู่ภายในเครื่อง ทำให้สามารถถ่ายโอนความร้อนได้อย่าง

รวดเร็ว จึงส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงถึงร้อยละ 70-75 โดยน้ำหนัก [2]

โครงสร้างชีวมวลประกอบไปด้วยเซลลูโลสร้อยละ 12-42 โดยน้ำหนัก [8, 11-13] เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 37-59 โดยน้ำหนัก [8, 11-13] ลิกนินร้อยละ 19-31 โดยน้ำหนัก และสารสกัด (อินทรีย์+อนินทรีย์หรือเถ้า) ร้อยละ 2-32 โดยน้ำหนัก [8, 11-14] เมื่อนำมาไพโรไลซีสพบว่าเซลลูโลสให้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุดประมาณร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก และมีการก่อตัวของถ่านชาร์น้อยที่สุด ส่วนเฮมิเซลลูโลสให้ปริมาณแก๊สสูงสุดประมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และลิกนินให้ปริมาณถ่านชาร์สูงสุดประมาณร้อยละ 47 โดยน้ำหนัก ไบโอออยล์ที่ได้จากลิกนินอุดมไปด้วยสารฟีนอล ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม [15] ส่วนการศึกษาสารสกัดอนินทรีย์หรือเถ้าพบว่า การลดเถ้าในชีวมวลลงส่งผลให้ปริมาณไบโอออยล์เพิ่มขึ้นโดยถ่านชาร์และแก๊สมีปริมาณลดลง [16] เมื่อพิจารณาสมบัติของไบโอออยล์พบว่า เถ้าในชีวมวลที่ลดลงช่วยลดความเป็นกรดในไบโอออยล์ และยังไปช่วยเร่งให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบฟีนอล [16] การศึกษาผลของสารสกัดในชีวมวลต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสทั่วไป มุ่งเน้นไปที่สารสกัดส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ที่สามารถแยกออกโดยการล้างด้วยน้ำ ขณะที่งานวิจัยที่ใช้ตัวทำละลายชนิดอื่นสำหรับศึกษาสารสกัดในส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ด้วยมีอยู่อย่างจำกัด และส่วนใหญ่มุ่งไปที่การใช้ชีวมวลประเภทพืชน้ำมัน สารสกัดจากพืชที่ไม่ใช่พืชน้ำมันมีลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับพืชน้ำมัน คือ เป็นสารไตรกลีเซอร์ไรด์ของกรดไขมันหรืออาจเป็นสารเคมีชนิดอื่นขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ ตัวอย่างงานวิจัย เช่น งานวิจัยของ Melzer M. และคณะ [3] ที่ศึกษากากเมล็ดสบู่ดำ กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และกากเชียนัท โดยพบว่าการลดลงของสารสกัดอินทรีย์ในชีวมวลเหล่านี้ส่งผลให้ไบโอออยล์มีปริมาณลดลง ถ่านชาร์และแก๊สมีปริมาณเพิ่มขึ้น ค่าความร้อน ปริมาณคาร์บอน และปริมาณไฮโดรเจนในไบโอออยล์มีค่าลดลง ผลที่ได้เหล่านี้มาจากชีวมวลประเภทพืชน้ำมัน แต่ชีวมวลที่ไม่ใช่พืชน้ำมันยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาผลของสารสกัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสกัดอินทรีย์ซึ่งสามาถสกัดได้โดยใช้ตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ในการศึกษากระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำ เฮกเซน และอะซีโตน เทียบกับการไม่ใช้ตัวทำละลายในการสกัดเหง้ามันสำปะหลังต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟอง

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 การเตรียมชีวมวล

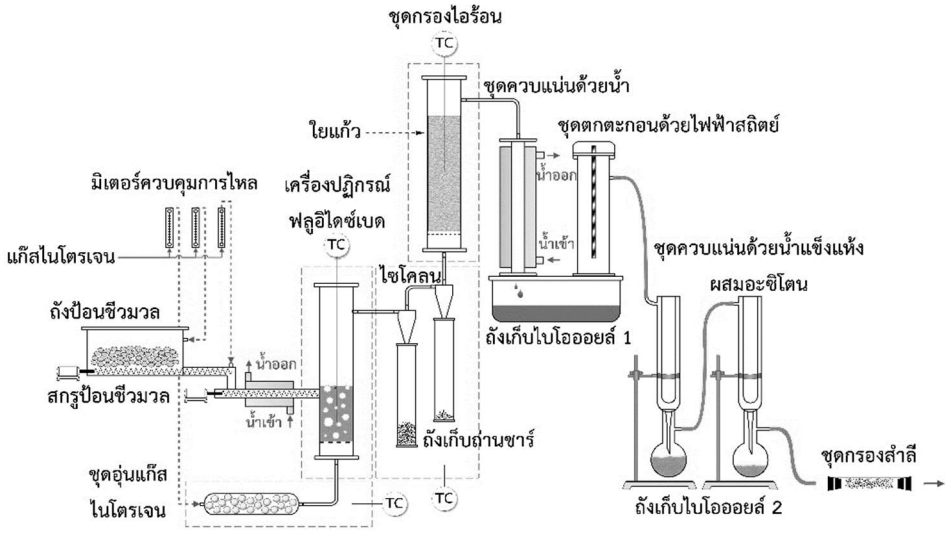
ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองคือ เหง้ามันสำปะหลังพันธุ์ระยอง 72 ได้จากบ้านสมสะอาด ตำบลสมสะอาด อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ นำมาผ่านกระบวนการเตรียมด้วยเครื่องบดหยาบ เครื่องบดละเอียด และนำไปผ่านตะแกรงแยกให้ได้ขนาด 0.212-0.600 มิลลิเมตร สุดท้ายนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรืออบจนกว่าความชื้นจะเหลือน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

2.2 การใช้ตัวทำละลายสกัดชีวมวล

ชีวมวลที่ผ่านการเตรียมในหัวข้อ 2.1 นำมาสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ โดยใช้เครื่องสกัดที่ประกอบด้วย ถังทรงกระบอกขนาด 19 ลิตร ขดลวดทำความร้อน ใบกวน มอเตอร์กวน เทอร์มอคัปเปิล ชุดรีฟลักซ์ (Reflux) ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และชุดควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้อัตราส่วนชีวมวล 160 กรัมต่อตัวทำละลาย (น้ำ เฮกเซน หรืออะซีโตน) 1,000 มิลลิลิตร ใช้อุณหภูมิจุดเดือดของตัวทำละลาย เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำชีวมวลมากรองเพื่อแยกสารละลายออก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หรืออบจนกว่าความชื้นหรือตัวทำละลายเหลือน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

2.3 การไพโรไลซีสแบบเร็ว

ชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายถูกนำมาไพโรไลซีสแบบเร็ว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองดังรูปที่ 1 [17] ซึ่งประกอบไปด้วยถังป้อนชีวมวล เครื่องปฏิกรณ์ ไซโคลน ถังเก็บถ่านชาร์ กรองไอร้อน ชุดควบแน่นด้วยน้ำ ชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิต ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้ง และชุดกรองสำลี ระบบให้ความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า การทดลอง เริ่มจากบรรจุชีวมวลลงในถังป้อนประมาณ 300 กรัม บรรจุตัวกลางถ่ายโอนความร้อนขนาดอนุภาค 0.250-0.425 มิลลิเมตร ลงไปในเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 300 กรัม และบรรจุใยแก้วลงไปในชุดกรองไอร้อนประมาณ 10 กรัม เสร็จแล้วชั่งน้ำหนักอุปกรณ์ชุดต่าง ๆ ก่อนการทดลองแล้วประกอบอุปกรณ์เข้าด้วยกัน จากนั้นให้ความร้อนกับชุดเครื่องปฏิกรณ์ที่ 500 องศาเซลเซียส ขณะที่ชุดไซโคลน ชุดกรองไอร้อน ชุดข้อต่อและชุดท่อลำเลียงแก๊ส ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 420 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิคงที่ตามต้องการจึงปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ตำแหน่งสกรูป้อนชีวมวลและส่วนด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ในปริมาณ 1 และ 6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยที่ชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิตตั้งค่าความต่างศักย์ไว้ประมาณ 15-20 กิโลโวลต์ ส่วนชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้ง ประกอบด้วยน้ำแข็งแห้งผสมกับอะซีโตนทำให้อุณหภูมิมีค่าประมาณ -70 องศาเซลเซียส เมื่อเสร็จขั้นตอนเหล่านี้จึงเริ่มป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซีสขึ้น เมื่อทดลองเสร็จถอดอุปกรณ์ชุดต่าง ๆ มาชั่งน้ำหนักหลังการทดลอง โดยที่ไบโอออยล์หนักได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิต ไบโอออยล์เบาได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้ง ถ่านชาร์ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ ชุดไซโคลน ถังเก็บถ่านชาร์ และกรองไอร้อน ส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นก็คือแก๊ส



รูปที่ 1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟอง [17]

2.4 การวิเคราะห์ชีวมวล

2.4.1 แบบประมาณ

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน ASTM E1756-08 ปริมาณสารระเหยตามมาตรฐาน ASTM E872-82 ปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน ASTM E1755 และปริมาณคาร์บอนคงที่ซึ่งวิเคราะห์ได้จากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

2.4.2 แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาปริมาณธาตุพื้นฐานที่มีอยู่ในชีวมวล ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และ

กำมะถัน (S) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN Analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น 628 และเครื่อง S Analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น 628S จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

2.4.3 ปริมาณสารสกัด

การวิเคราะห์หาปริมาณสารสกัด (Extractives content analysis) เป็นการวิเคราะห์สารสกัดที่เหลืออยู่ในชีวมวลที่ผ่านการสกัดตามหัวข้อ 2.2 และชีวมวลที่ไม่สกัด โดยนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือสกัดแบบซอกซ์เลท (Soxhlet extractor) ซึ่งใช้ชีวมวล 5 กรัม บรรจุลงไปในกรวยเซลลูโลส (Cellulose thimble) ต่อตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 95 ผสมกับโทลูอีน (1:2 โดยปริมาตร) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ตามด้วยเอทานอลร้อยละ 95 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และตามด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใช้อุณหภูมิจุดเดือดของตัวทำละลาย เมื่อแยกสารสกัดเสร็จนำกรวยเซลลูโลสไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

2.4.4 ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (Heating value) หาได้จากเครื่องมือวิเคราะห์ค่าความร้อน (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ Leco รุ่น AC-350 จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ค่าที่ได้เป็นค่าความร้อนสูง (Higher heating value : HHV) และสามารถคำนวณเป็นค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value : LHV) ได้ตามสมการที่ (1) [18]

$$LHV = HHV - \alpha \times \beta \left(\frac{H}{100}\right) \qquad (1)$$

เมื่อ LHV = ค่าความร้อนต่ำ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
HHV = ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
α = ความร้อนแฝงที่ใช้ระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ 2.430 เมกะจูลต่อกิโลกรัม
β = มวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ของไฮโดรเจน 1 กิโลกรัม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.936 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมไฮโดรเจน
H = ร้อยละของไฮโดรเจน จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

2.4.5 ความหนาแน่น

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของชีวมวล (Density of biomass) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกวิเคราะห์แบบความหนาแน่นรวม (Bulk density) คือน้ำหนักของอนุภาคชีวมวลรวมกับน้ำหนักของช่องว่างระหว่างอนุภาคชีวมวลต่อปริมาตร และชนิดที่สองเป็นการวิเคราะห์แบบความหนาแน่นอนุภาค (Particle density) คือน้ำหนักของอนุภาคชีวมวลต่อปริมาตร

2.5 การวิเคราะห์ไบโอออยล์

2.5.1 ค่าพีเอช

ค่าพีเอช (pH value) วิเคราะห์โดยเครื่องมือวัดค่าพีเอชยี่ห้อ Denver รุ่น UB-10 โดยมีการทดสอบหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่มีค่าพีเอช 4 7 และ 10

2.5.2 ปริมาณของแข็ง

ปริมาณของแข็ง (Solids content) ในไบโอออยล์วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D7579 โดยใช้กระดาษกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร และใช้เอทานอลในการทำละลายไบโอออยล์

2.5.3 ปริมาณเถ้า

ปริมาณเถ้า (Ash content) ในไบโอออยล์วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D482-03 โดยนำไบโอออยล์มาเผาที่อุณหภูมิ 775±25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วคำนวณหาปริมาณเถ้าจากน้ำหนักก่อนและหลังเผา

2.5.4 ความหนาแน่น

การวิเคราะห์ความหนาแน่นไบโอออยล์ (Density of bio-oil) ทำโดยหยดไบโอออยล์ลงใน

กระบอกตวงประมาณ 2 มิลลิลิตร แล้วชั่งหาน้ำหนักไบโอออยล์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการที่ (2)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
m = มวล (กิโลกรัม)
V = ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)

2.5.5 ค่าความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของไบโอออยล์วิเคราะห์ตามหัวข้อ 2.4.4

2.5.6 จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟ (Flash Point) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D93 ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์จุดวาบไฟและจุดติดไฟ โดยให้ความร้อนที่อัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่ออุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ทำการลดอัตราการให้ความร้อนเป็น 5-6 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงบนถ้วยทดสอบ แสงสว่างที่วาบขึ้นและดับไปนั่นคือ จุดวาบไฟ

2.5.7 จุดติดไฟ

จุดติดไฟ (Fire Point) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D93 ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์จุดวาบไฟและจุดติดไฟ เป็นขั้นตอนต่อจากการวิเคราะห์จุดวาบไฟ อัตราการให้ความร้อน 5-6 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากเกิดจุดวาบไฟได้ไม่นานก็จะพบกับจุดที่ไฟลุกไหม้ไบโอออยล์ 3-4 วินาที นั่นคือ จุดติดไฟ

2.5.8 แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของไบโอออยล์วิเคราะห์ตามหัวข้อ 2.4.2

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 ผลของตัวทำละลายต่อสมบัติของชีวมวล

การวิเคราะห์ผลของตัวทำละลายต่อสมบัติของชีวมวลแสดงดังตารางที่ 1 เหง้ามันสำปะหลังตั้งต้นที่ไม่ผ่านกระบวนการสกัดนำมาวิเคราะห์ปริมาณสารสกัดตามหัวข้อ 2.4.3 พบว่ามีสารสกัดรวมอยู่ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก แบ่งเป็นสารสกัดอินทรีย์ร้อยละ 7.9 โดยน้ำหนัก และสารสกัดอนินทรีย์ร้อยละ 4.6 โดยน้ำหนัก เมื่อสกัดด้วยน้ำทำให้สารสกัดอนินทรีย์หลุดออกมากที่สุดจากร้อยละ 4.6 โดยน้ำหนัก เหลืออยู่ร้อยละ 2.7 โดยน้ำหนัก เนื่องจากน้ำเป็นสารมีขั้วโพรติก (Polar protic) สามารถให้โปรตอน (H^+) กับสารสกัดอนินทรีย์ ส่งผลให้สารสกัดอนินทรีย์หลุดออกมากที่สุด ส่วนการใช้ตัวทำละลายเฮกเซนทำให้สารสกัดอินทรีย์หลุดออกมากที่สุดจากร้อยละ 7.9 โดยน้ำหนัก เหลืออยู่ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากสารสกัดอินทรีย์ประกอบไปด้วยสารจำพวกไขมันหรือลิพิด (Lipid) ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว เมื่อสารประเภทนี้เจอตัวทำละลายเฮกเซนที่ไม่มีขั้ว (Non Polar) จึงทำให้สารสกัดอินทรีย์หลุดออกมากที่สุด

เมื่อพิจารณาผลของอะซีโตนปรากฏว่า ดึงสารสกัดอินทรีย์และสารสกัดอนินทรีย์ออกมาได้น้อยที่สุด เนื่องจากอะซีโตนเป็นสารมีขั้วอะโพรติก (Polar aprotic) ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ขาดไฮโดรเจนจึงไม่สามารถให้โปรตอน (H^+) กับสารสกัดอนินทรีย์ และไม่สามารถดึงสารสกัดอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วออกมาได้ จึงทำให้สารสกัดหลุดออกมาได้น้อยที่สุด และการลดลงของสารสกัดส่งผลให้สัดส่วนของลิกโนเซลลูโลสมีปริมาณเพิ่มขึ้น [19] การวิเคราะห์แบบประมาณพบว่า เถ้าและสารระเหยมีปริมาณลดลงเมื่อสกัดสารสกัดออกจากชีวมวล เนื่องจากสารระเหยคือส่วนหนึ่งของสารสกัดอินทรีย์ และเถ้าคือส่วนหนึ่งของสารสกัดอนินทรีย์ เมื่อสารสกัดลดลงจึงทำให้เถ้าและสารระเหยลดลงไปด้วย ยกเว้นกรณีที่สกัดด้วยน้ำทำให้สารระเหยเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวน้ำสามารถดึงสารสกัดอนินทรีย์ออกมาได้สูงสุด จึงทำให้สารระเหยมีสัดส่วนเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงให้เห็นว่าปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เมื่อสกัดสารสกัดออกจากชีวมวล [19] และตัวทำละลายน้ำให้ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงกว่ากลุ่มอื่น เนื่องจากสามารถลดปริมาณสารสกัดอนินทรีย์ได้สูงสุด การวิเคราะห์ค่า

ความร้อนแสดงให้เห็นว่า ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อสกัดชีวมวล และตัวทำละลายน้ำให้ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงกว่ากลุ่มอื่น เนื่องจากสารสกัดอินทรีย์ไม่สามารถให้พลังงานออกมาได้เมื่อนำไปเผาไหม้ นั่นก็คือถ้ามีอยู่ในชีวมวลมากค่าความร้อนก็จะต่ำ นอกจากนี้ความหนาแน่นยังมีค่าลดลง เมื่อสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ เนื่องจากการหลุดของสารสกัดอินทรีย์และอนินทรีย์นั้นก็คือน้ำหนักลดลงแต่ปริมาตรยังเท่าเดิม [6]

ตารางที่ 1 สมบัติของชีวมวลที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ

การวิเคราะห์	ตัวทำละลายที่ใช้สกัดเหง้ามันสำปะหลัง			
	ไม่ใช้	น้ำเปล่า	เฮกเซน	อะซีโตน
สารสกัด (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)				
ลิกโนเซลลูโลส[1]	87.5	90.3	89.5	88.2
สารสกัดรวม	12.5	9.7	10.5	11.8
สารสกัดอินทรีย์	7.9	7.0	6.5	7.4
สารสกัดอนินทรีย์	4.6	2.7	4.0	4.4
แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)				
สารระเหย	75.3±0.7	76.6±0.5	73.9±0.2	74.3±0.4
คาร์บอนคงที่	20.1±0.4	20.7±0.4	22.1±0.2	21.3±0.4
เถ้า	4.6±0.3	2.7±0.0	4.0±0.1	4.4±0.1
ความชื้น[2]	0.1±0.1	0.2±0.1	0.1±0.1	0.4±0.2
แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)				
คาร์บอน (C)	52.5±0.0	54.2±0.0	52.9±0.2	52.3±0.1
ไฮโดรเจน (H)	6.6±0.2	6.9±0.0	6.8±0.0	6.8±0.0
ไนโตรเจน (N)	0.7±0.0	0.7±0.0	0.6±0.0	0.6±0.0
กำมะถัน (S)	0.2±0.0	0.2±0.0	0.1±0.0	0.2±0.0
ออกซิเจน[3] (O)	35.4±0.0	35.3±0.1	35.5±0.3	35.4±0.2
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)				
ค่าความร้อนสูง	18.3±0.1	19.3±0.0	18.5±0.2	18.3±0.0
ค่าความร้อนต่ำ	16.8±0.1	17.8±0.0	17.0±0.2	16.8±0.0
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)				
ความหนาแน่นรวม	182.0±1.2	140.4±3.7	154.8±3.3	166.2±2.6
ความหนาแน่นอนุภาค	912.4±3.6	676.3±5.3	727.6±5.0	742.8±4.4

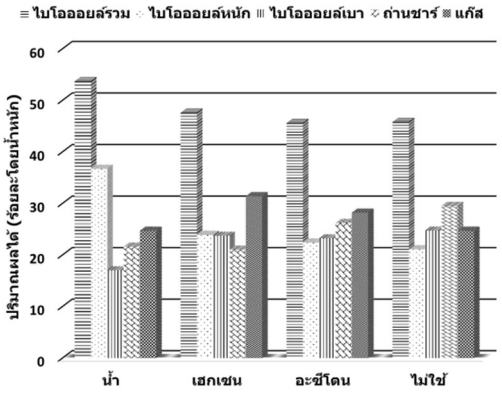
[1]คำนวณโดยความแตกต่าง ลิกโนเซลลูโลส=100-สารสกัดรวม

[2](ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานเปียก)

[3]คำนวณโดยความแตกต่าง O=100-C-H-N-S-เถ้า

3.2 ผลของตัวทำละลายที่ใช้สกัดชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว

ผลของตัวทำละลายที่ใช้สกัดชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซีสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแสดงดังรูปที่ 2 ตัวทำละลายน้ำที่ใช้สกัดชีวมวลให้ปริมาณ ไบโอออยล์สูงสุดร้อยละ 53.7 โดยน้ำหนัก และให้ปริมาณไบโอออยล์หนักสูงสุดร้อยละ 36.7 โดยน้ำหนัก เนื่องจากน้ำสามารถลดสารสกัดอินทรีย์ได้สูงสุด ซึ่งสารสกัดอินทรีย์ไม่สามารถสลายตัวเป็นไบโอออยล์ [5, 16] รองลงมาคือ เฮกเซน อะซีโตน และไม่สกัด ไบโอออยล์เบาและถ่านชาร์มีปริมาณผลได้ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลไม่สกัด เนื่องจากสารสกัดอินทรีย์ส่วนใหญ่สลายตัวเป็นไบโอออยล์เบา และสารสกัดอินทรีย์ไม่สามารถสลายตัวกลายเป็นไบโอออยล์ได้ แต่จะอยู่ในรูปของแข็งติดอยู่กับถ่านชาร์ [16, 19] ส่วนแก๊สมีปริมาณผลได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลไม่สกัด งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารสกัดอินทรีย์ช่วยยับยั้งการเกิดแก๊สได้ [3] ขณะที่สารสกัดอินทรีย์ช่วยเร่งให้ไอไพโรไลซีสเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สมากมากขึ้น (Cracking) [16]



รูปที่ 2 ผลของตัวทำละลายที่ใช้สกัดชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซีสแบบเร็ว

เมื่อพิจารณารูปที่ 2 ร่วมกับตารางที่ 1 พบว่าเมื่อสารสกัดรวมมีค่าเป็นร้อยละ 10.5 ปริมาณผลได้ของแก๊สมีค่าสูงที่สุด ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้ตัวทำละลายเฮกเซนในการสกัดชีวมวล ซึ่งพบว่าชีวมวลมีปริมาณสารสกัดอินทรีย์ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก และอนินทรีย์ร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนัก หรือก็คือมีสัดส่วนของสารสกัดอินทรีย์น้อยที่สุด และสารสกัดอนินทรีย์ค่อนข้างสูง มีส่วนทำให้เร่งการแตกตัวของไอไพโรไลซีสกลายเป็นแก๊สมากขึ้น

3.3 ผลของตัวทำละลายที่ใช้สกัดชีวมวลต่อสมบัติของไบโอออยล์จากกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว

ผลของตัวทำละลายที่ใช้สกัดชีวมวลต่อสมบัติของไบโอออยล์จากกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็วแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าการสกัดชีวมวลด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ไม่ส่งผลต่อค่าพีเอช ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า และความหนาแน่นของไบโอออยล์เนื่องจากปริมาณของแข็ง และปริมาณเถ้าขึ้นอยู่กับกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งประสิทธิภาพของชุดกรองไอร้อน [20] การสกัดชีวมวลด้วยเฮกเซน และอะซีโตน ส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงของสารสกัดอนินทรีย์ ซึ่งสารสกัดอนินทรีย์ไม่สามารถให้พลังงานออกมาได้เมื่อนำไปเผาไหม้ ยกเว้นสกัดด้วยตัวทำละลายน้ำ ที่ส่งผลให้ค่าความร้อนลดลง ส่วนจุดวาบไฟ และจุดติดไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของสารสกัดอนินทรีย์ ซึ่งสารสกัดอนินทรีย์เป็นตัวเร่งให้ไบโอออยล์ที่มีโมเลกุลใหญ่เกิดการแตกตัวกลายเป็นไบโอออยล์ที่มีโมเลกุลเล็กลง และพร้อมที่จะติดไฟ ดังนั้นยิ่งมีสารสกัดอนินทรีย์น้อยก็จะทำให้จุดวาบไฟ และจุดติดไฟมีค่าสูงไปด้วย ส่วนปริมาณคาร์บอน และปริมาณไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลง ปริมาณคาร์บอนที่ลดลงส่งผลให้สัดส่วนออกซิเจนเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3, 19, 21] เนื่องจากสารสกัดอินทรีย์อุดมไปด้วยสารจำพวกไขมันหรือลิพิดที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อสกัดออกจึงทำให้คาร์บอน และไฮโดรเจนมีปริมาณลดลง ยกเว้นสกัดด้วยอะซีโตนที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น และสกัดด้วยเฮกเซนทำให้ไฮโดรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้กับมาตรฐานสากล ASTM D7544 ปรากฏว่าไบโอออยล์หนักที่ผลิตได้จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการสกัดและผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายประเภทน้ำ

เฮกเซน และอะซีโตน ปรากฏว่าผ่านมาตรฐานทั้ง Grade D และ Grade G ในด้านปริมาณของแข็ง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ด้านปริมาณเถ้า มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก ด้านค่าความหนาแน่น มีค่าอยู่ระหว่าง 1.1-1.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ด้านค่าความร้อนสูง มีค่ามากกว่า 15 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ด้านจุดวาบไฟ มีค่ามากกว่า 45 องศาเซลเซียส และด้านปริมาณกำมะถัน มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 ผลของชนิดตัวทำละลายที่ใช้สกัดเหง้ามันสำปะหลังต่อสมบัติของไบโอออยล์

การวิเคราะห์	ตัวทำละลาย				มาตรฐาน ASTM D7544	
	น้ำ (9.7)*	เฮกเซน (10.5)*	อะซีโตน (11.8)*	ไม่ใช้ (12.5)*	Grade D	Grade G
ค่าพีเอช	3.3±0.0	3.9±0.1	3.6±0.1	3.7±0.1	-	-
ปริมาณของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.2±0.0	0.2±0.0	0.2±0.1	0.2±0.0	‹ 0.25	‹ 2.5
ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.1±0.0	0.1±0.0	0.1±0.0	0.1±0.0	‹ 0.15	‹ 0.25
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)	1.2±0.0	1.1±0.0	1.2±0.0	1.3±0.0	1.1-1.3	1.1-1.3
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม, ฐานเปียก)						
ค่าความร้อนสูง	20.2±0.0	26.5±0.0	26.5±0.1	24.7±0.0	› 15	› 15
ค่าความร้อนต่ำ	18.5±0.0	24.5±0.0	24.7±0.1	22.9±0.0	-	-
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	117.2±1.4	109.5±0.9	109.3±1.4	104.0±1.3	› 45	› 45
จุดติดไฟ (องศาเซลเซียส)	131.2±1.3	121.4±1.1	122.6±1.8	112.1±1.8	-	-
ปริมาณแร่ธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)						
คาร์บอน (C)	54.8±0.1	53.5±1.5	69.1±0.2	65.1±0.4	-	-
ไฮโดรเจน (H)	8.0±0.3	9.4±0.1	8.2±0.0	8.2±0.0	-	-
ไนโตรเจน (N)	0.9±0.0	1.1±0.0	1.6±0.0	1.5±0.0	-	-
กำมะถัน (S)	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	‹ 0.15	‹ 0.15
ออกซิเจน[1] (O)	36.2±0.4	35.9±1.6	21.0±0.1	25.1±0.4	-	-

**ปริมาณสารสกัดรวมที่เหลืออยู่ในชีวมวล (ร้อยละโดยมวล)*

[1]คำนวณโดยความแตกต่าง O=100-C-H-N-S-ปริมาณเถ้า

Grade D : เชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ที่มีของแข็งและเถ้าต่ำ และ Grade G : เชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม

4. สรุป

เหง้ามันสำปะหลังเริ่มต้นมีปริมาณสารสกัดรวมร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก แบ่งเป็นสารสกัดอินทรีย์ร้อยละ 7.9 และสารสกัดอนินทรีย์ร้อยละ 4.6 สารสกัดอินทรีย์คือส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้ ขณะที่สารสกัดอนินทรีย์คือส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หรือก็คือส่วนที่เป็นเถ้า เหง้ามันสำปะหลังเมื่อผ่านการสกัดด้วยน้ำ เฮกเซน และอะซีโตน ทำให้ปริมาณสารสกัดอินทรีย์และอนินทรีย์เปลี่ยนไป โดยน้ำทำให้ปริมาณสารสกัดอนินทรีย์ลดลงมากที่สุด ส่งผลให้ชีวมวลมวลเหลือปริมาณสารสกัดอนินทรีย์เพียงร้อยละ 2.7 โดยน้ำหนัก ขณะที่เฮกเซนช่วยลดปริมาณสารสกัดอินทรีย์ได้มากที่สุด ทำให้ชีวมวลเหลือปริมาณสารสกัดอินทรีย์เพียงร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก เมื่อนำชีวมวลที่ผ่านและไม่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย มาผ่านกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองพบว่า ชีวมวลที่ผ่านการสกัดให้ไบโอออยล์รวมเพิ่มขึ้นเมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ปริมาณไบโอออยล์รวมมีค่าสูงสุดร้อยละ 53.7 โดยน้ำหนัก ขณะที่ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์หนักมีแนวโน้มเช่นเดียวกับไบโอออยล์รวม ไบโอออยล์เบาและถ่านชาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อลดปริมาณสารสกัดรวมด้วยการใช้ตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์หนักพบว่า ชนิดของตัวทำละลายไม่ส่งผลต่อค่าพีเอช ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า และความหนาแน่นของไบโอออยล์ การใช้ตัวทำละลายสกัดช่วงทำให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์เพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีที่ใช้น้ำ จุดวาบไฟ จุดติดไฟ ปริมาณไฮโดรเจน และปริมาณออกซิเจนในไบโอออยล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณคาร์บอนมีค่าลดลง ยกเว้นกรณีที่ใช้อะซีโตน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ รหัสโครงการ P-14-50020 (MT-B-57-END-53-101-G) และทุนโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) เลขที่สัญญาทุน SCA-CO-2558-994-TH

6. เอกสารอ้างอิง

[1] H. Nam, S. C. Capareda, N. Ashwath and J. Kongkasawan, “ Experimental investigation of pyrolysis of rice straw using bench- scale auger, batch and fluidized bed reactors, ” J. Energy., vol. 93, pp. 2384-2394, Dec. 2015.

[2] S. Sirijanusorn, K. Sriprateep and A. Pattiya, “ Pyrolysis of cassava rhizome in a counter- rotating twin screw reactor unit, ” Bioresour. Technol., vol. 139, pp. 343-348, Jul. 2013.

[3] M. Melzer, J. Blin, A. Bensakhria, J. Valette and F. Broust, “Pyrolysis of extractive rich agroindustrial residues, ” J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 104, pp. 448- 460, Nov. 2013.

[4] T. Suchithra, S. Adhikari, H. Ravindran, R. B. Gupta, O. Fasina, M. Tu, S. D. Fernando, “ Physiochemical properties of bio- oil produced at various temperatures from pine wood using an auger reactor, ” Journal of Bioresour. Technol., vol. 101, no. 21, pp. 8389-8395, 2010.

[5] R. Fahmi, A. V. Bridgwater, I. Donnison, N. Yates and J. M. Jones, “ The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability, ” J. Fuel, vol. 87, no. 7, pp. 1230-1240, 2008.

[6] K. Duanguppama, N. Suwapaet and A. Pattiya, “ Fast pyrolysis of contaminated

sawdust in a circulating fluidised bed reactor, " J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 118, pp. 63-74, Mar. 2016.

[7] B. Pidtasang, P. Udomsap, S. Sukkasi, N. Chollacoop and A. Pattiya, "Influence of alcohol addition on properties of bio-oil produced from fast pyrolysis of eucalyptus bark in a free-fall reactor, " J. Ind. Eng. Chem., vol. 19, no. 6, pp. 1851-1857, 2013.

[8] K. Raveendran, A. Ganesh and K. C. Khilar, "Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics, " J. Fuel, vol. 74, no. 12, pp. 1812-1822, 1995.

[9] S. W. Kim, B. S. Koo and D. H. Lee, " Catalytic pyrolysis of palm kernel shell waste in a fluidized bed, " Bioresour. Technol., vol. 167, pp. 425-432, Sep. 2014.

[10] บุญสิริ ปิตตาแสง, สิทธา สุขกสิ, และ อดิศักดิ์ ปัตติยะ, "ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็วโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ, " วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, ปีที่ 32 ฉบับบที่ 4, หน้า 499-503, กรกฎาคม-สิงหาคม 2556.

[11] P. Kaewpengkrow, D. Atong and V. Sricharoenchaikul, " Catalytic upgrading of pyrolysis vapors from Jatropha wastes using alumina, zirconia and titania based catalysts, " Bioresour. Technol., vol. 163, pp. 262-269, Jul. 2014.

[12] A. Pattiya, J. O. Titiloye and A. V. Bridgwater, " Evaluation of catalytic pyrolysis of cassava rhizome by principal component analysis, " J. Fuel, vol. 89, no. 1, pp. 244-253, 2009.

[13] M. Nik-Azar, M. R. Hajaligol, M. Sohrabi and B. Dabir, " Mineral matter effects in rapid pyrolysis of beech wood, " Fuel Process. Technol., vol. 51, no. 1-2, pp. 7-17, 1997.

[14] X. Guo, S. Wang, K. Wang, Q. Liu and Z. Luo, " Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis, " J. Fuel Chem. Technol., vol. 38, no. 1, pp. 42-46, 2010.

[15] S. D. Stefanidis, K. G. Kalogiannis, E. F. Iliopoulou, C. M. Michailof, P. A. Pilavachi, and A. A. Lappas, " A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin, " J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 105, pp. 143-150, Jan. 2014

[16] G. Yildiz, F. Ronsse, R. Venderbosch, R. v. Duren, S. R. A. Kersten and W. Prins, " Effect of biomass ash in catalytic fast pyrolysis of pine wood, " Appl. Catal., B, vol. 168–169, pp. 203-211, Jun. 2015.

[17] ณัฐพันธ์ พรหมสำเภา, นุชิดา สุวแพทย์, และ อดิศักดิ์ ปัตติยะ, "การผลิตไบโอออยล์จากการไพโรไลซีสแบบเร็วของกากเปลือกเมล็ดมะเยาหินและกากเมล็ดปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟอง, " วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 9 ฉบับที่ 2, หน้า 23-32, กรกฎาคม-ธันวาคม 2557.

[18] Y. A. Cengel and M. A. Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach, New York: McGraw-Hill, 2006.

[19] S. R. G. Oudenhoven, R. J. M. Westerhof, and S. R. A. Kersten, “ Fast pyrolysis of organic acid leached wood, straw, hay and bagasse: Improved oil and sugar yields, ” J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 116, pp. 253-262, Nov. 2015.

[20] A. Pattiya and S. Suttibak, “Fast pyrolysis of sugarcane residues in a fluidised bed reactor with a hot vapour filter, ” J. Energy Inst., vol. 90, no. 1, pp. 110-119, 2015.

[21] Y. Wang, L. Wu, C. Wang, J. Yu, and Z. Yang, “ Investigating the influence of extractives on the oil yield and alkane production obtained from three kinds of biomass via deoxy- liquefaction, ” Bioresour. Technol., vol. 102, no. 14, pp. 7190-7195, 2011.