

ผลของระยะเวลาการปรับสภาพด้วยความร้อนที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน
จากเส้นใยปาล์ม

Effect of Reaction Time in Liquid Hot Water Pretreatment
on Methane Potential of Oil Palm Fiber

พลากร บุญใส¹ บุญญา ชาญนอก² และ สุชีวรรณ ยอยรูบ³

Palakorn Boonsai¹, Boonya Charnnok², & Sucheewan Yoyrurub³

¹สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

²สาขาวิชาวิศวกรรมเฉพาะทาง (เทคโนโลยีพลังงาน) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

³สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung Campus

²Energy Technology Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

³Environmental Science Program, Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University

Submitted 26/11/2021 ; Revised 21/1/2022 ; Accepted 24/1/2022

บทคัดย่อ

เส้นใยปาล์มเป็นชีวมวลที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบ ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสทำให้การย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทนเกิดขึ้นได้ยาก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยน้ำร้อน (30, 60, 120, 180, 240 และ 300 นาที) ที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ควบคุมอุณหภูมิในการปรับสภาพ 180 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพเส้นใยปาล์ม คือ 30 นาที ซึ่งใช้เวลาในการปรับสภาพน้อยที่สุด มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 87.7 ± 1.1 L CH₄/kgVS สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพร้อยละ 34.5 และได้ผลผลิตก๊าซมีเทนไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากผลผลิตก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาปรับสภาพนานกว่า ซึ่งเป็นผลจากการตกค้างของลิกนิน ผลจากงานวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อการพัฒนาต่อยอดการปรับสภาพน้ำร้อน ร่วมกับการลดปริมาณลิกนินเพื่อส่งเสริมศักยภาพผลิตก๊าซมีเทนที่สูงขึ้น

คำสำคัญ: ก๊าซมีเทน การปรับสภาพด้วยน้ำร้อน การหมักแบบบะ เส้นใยปาล์ม

*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: sucheewan.yo@skru.ac.th

Abstract

Oil palm fiber (OPF) is a lignocellulosic biomass. Lignin and hemicellulose made it low digestibility in an anaerobic digestion for methane production. This research aimed to study the effects of reaction time (30, 60, 120, 180, 240, and 300 min) at a controlled reaction temperature of 180°C on methane potential of OPF using liquid hot water pretreatment. The optimum reaction time for pretreatment of OPF with liquid hot water was 30 min which achieved the highest methane yield of 87.7±1.1 L CH₄/kgVS. This was 34.5% higher than that of untreated OPF. Increasing the reaction time longer than 30 min insignificantly increased the methane yield because of accumulated lignin. The results are useful for further development. The combination of liquid hot water and delignification should be further investigated to improve methane potential of OPF.

Keywords: methane, liquid hot water pretreatment, batch digestion, oil palm fiber

บทนำ

ก๊าซชีวภาพ (biogas) เป็นก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยเชื้อจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (anaerobic digestion) ก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นก๊าซที่ผสมกันระหว่างก๊าซมีเทน (CH_4) กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซอื่น ๆ ส่วนใหญ่แล้วประกอบด้วยก๊าซมีเทนเป็นหลัก กระบวนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ ไฮโดไลซิส (hydrolysis) แอซิโดเจเนซิส (acidogenesis) อะซิโตเจเนซิส (acetogenesis) เมทาโนเจเนซิส (methanogenesis) การย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศก่อให้เกิดก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนสูงถึง 28 เท่า เมื่อเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ [1] ในปัจจุบันการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศยังเป็นกระบวนการที่นำมาใช้ย่อยสลายขยะอินทรีย์เพื่อลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมกันอย่างแพร่หลาย และกากที่ผ่านการย่อยสลายแล้วสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน อย่างไรก็ตามก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสามารถนำมาใช้ผลิตความร้อนและไฟฟ้าทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อน และยังสอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 ที่มีเป้าหมายการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเท่ากับร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี 2579 โดยมีเป้าหมายที่การผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพประมาณ 600 เมกะวัตต์ [2]

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย นิยมปลูกทางภาคใต้ของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจังหวัด กระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร และสตูล ดังนั้น จึงมีอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากเช่นกัน ประเทศไทยมีชีวมวลจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มที่เหลือทิ้งและไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์สูงถึงร้อยละ 70-80 ประกอบด้วย ทะลายเปลา่ เส้นใยปาล์ม กากสลัดจ์ เป็นต้น [3] เส้นใยปาล์มเป็นชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่เหลือทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์มคิดเป็นร้อยละ 14 [4] จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ เซลลูโลส ร้อยละ 39.1±0.8 เฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 22±1.2 และลิกนิน ร้อยละ 23±0.7 [5]

การนำเส้นใยปาล์มมาผลิตก๊าซชีวภาพจึงมีความจำเป็นต้องปรับสภาพวัตถุดิบ เพื่อให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยเซลลูโลสได้มากขึ้น การปรับสภาพด้วยน้ำร้อน (liquid hot water : LHW) เป็นหนึ่งในปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลไลซิสซึ่งไม่จำเป็นต้องอาศัยสารเคมีและมักนำมาใช้ในการทำลายโครงสร้างชีวมวลลิกโนเซลลูโลสก่อนเข้าสู่กระบวนการชีวเคมีที่ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพหรือเคมีชีวภาพ วิธีการนี้อาศัยน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงสามารถทำลายโครงสร้างภายในชีวมวลด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินช่วยเพิ่มช่องทางเข้าถึงเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น ส่งเสริมให้จุลินทรีย์ย่อยสลายเซลลูโลสง่ายขึ้น การปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150-180 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับวัตถุดิบชีวมวลขนาดเล็ก [6] นอกจากนี้การเพิ่มความรุนแรงด้วยการเพิ่มอุณหภูมิในการปรับสภาพจาก 170 ถึง 210 องศาเซลเซียส ช่วยเพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายชีวมวลลิกโนเซลลูโลส แต่ผลผลิตก๊าซมีเทนกลับลดลง เพราะสูญเสียน้ำตาลมากระหว่างการปรับสภาพ [7] นอกจากนี้อุณหภูมิแล้ว ปัจจัยด้านระยะเวลาการปรับสภาพ (reaction time) ยังมีผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนด้วย ระยะเวลาปรับสภาพที่เหมาะสมช่วยส่งเสริมศักยภาพก๊าซมีเทนสูงสุด ในขณะที่เดียวกันค่าการออกแบระบบที่มีขนาดใหญ่ไม่ใหญ่เกินไปส่งผลต่อต้นทุนการก่อสร้างระบบปรับสภาพที่เหมาะสมด้วย

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการปรับสภาพด้วยน้ำร้อนที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากเส้นใยปาล์ม

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมวัสดุหมัก

เส้นใยปาล์มได้จากกระบวนการบีบหรือการสกัดน้ำมันออกจากผลปาล์ม จากโรงงานปาล์มน้ำมัน บริษัท ปาล์มไทยพัฒนา จำกัด ต.อุโตเจริญ อ.ควนกาหลง จ.สตูล นำมาผึ่งแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เลือกเส้นใยปาล์มขนาด 1-2 มิลลิเมตร โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง และอบต่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำหนักของเส้นใยปาล์มคงที่

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัยนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสีย (บ่อหมักก๊าซชีวภาพ) จากโรงงานปาล์มน้ำมัน บริษัท ปาล์มไทยพัฒนา จำกัด จ. สตูล ใส่ถังปิดฝาตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างส่วนน้ำใสและตะกอนหัวเชื้อจุลินทรีย์ รินเอาส่วนน้ำใสทิ้ง เหลือไว้แต่ตะกอนหัวเชื้อจุลินทรีย์ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและปราศจากแสงเป็นเวลา 40 วัน เปิดฝาเพื่อระบายก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวัน

ในการหมักก๊าซชีวภาพมีสารอาหารเสริมที่ใช้เติมลงในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ (nutrient solution) ประกอบด้วย แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) 1.4 กรัม/ลิตร โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) 1.25 กรัม/ลิตร แมกนีเซียมซัลเฟตมอนอไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 0.5 กรัม/ลิตร แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 0.05 กรัม/ลิตร สารสกัดยีสต์ (yeast extract) 0.5 กรัม/ลิตร ธาตุอาหารปริมาณน้อย (trace element solution) 5 มิลลิลิตร/ลิตร ซึ่งประกอบด้วย ไอร์ออน (II) คลอไรด์เตตระไฮเดรต ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 2 กรัม/ลิตร กรดบอริก (H_3BO_3) 0.05 กรัม/ลิตร ซิงค์ (II) คลอไรด์ (ZnCl_2) 0.05 กรัม/ลิตร คอปเปอร์ (II) คลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 0.038 กรัม/ลิตร แมงกานีส (II) คลอไรด์เตตระไฮเดรต ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 0.5 กรัม/ลิตร แอมโมเนียมโมลิบเดตเตตระไฮเดรต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 0.05 กรัม/ลิตร อะลูมิเนียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 0.09 กรัม/ลิตร และโคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 2 กรัม/ลิตร นอกจากนี้ยังมีสารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งประกอบด้วย โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) 50 กรัม/ลิตร [8]

วิธีการวิจัย

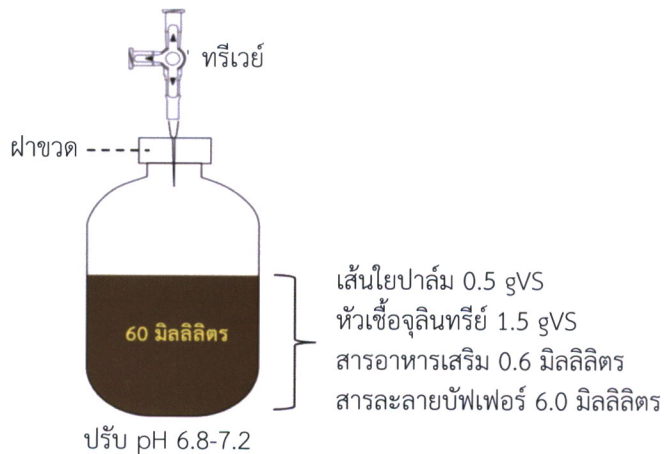
เส้นใยปาล์มที่ใช้ในการวิจัย นำมาวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids: TS) ของแข็งระเหยง่าย (volatile solids: VS) ในเส้นใยปาล์มก่อนและหลังการปรับสภาพ ด้วยวิธี Gravimetric method ตามวิธีของ National Renewable Energy Laboratory (NREL) [9] วิเคราะห์เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ในเส้นใยปาล์มทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพตามวิธีของ National Renewable Energy Laboratory (NREL) [10] วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมด้วย UV-Vis spectrophotometer, Merck Ltd., Spectroquant® Pharo 100 model ที่ความยาวคลื่น 760 nm [11]

การศึกษาระยะเวลาที่เวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพของเส้นใยปาล์มด้วยน้ำร้อน โดยกำหนดระยะเวลาในการปรับสภาพ 30, 60, 120, 180, 240 และ 300 นาที ควบคุมอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ (oil bath) ดำเนินการปรับสภาพโดยการผสมเส้นใยปาล์ม 10 กรัม กับน้ำปราศจากไอออน (deionized water: DI) 150 มิลลิลิตร จากนั้นบรรจุในภาชนะสแตนเลส (stainless vessel) ขนาด 200 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วนำไปต้มในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิที่ได้ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ 180 องศาเซลเซียส ทำการปรับสภาพเส้นใยปาล์มตามระยะเวลาที่กำหนด เมื่อปรับสภาพเสร็จสิ้น ทำการกรองตัวอย่างเพื่อแยกส่วน

ของแข็งและของเหลว ส่วนที่เป็นของแข็งคำนวณค่าการนำกลับของแข็ง (solid recovery: SR) ดังสมการที่ 1 รวมถึงวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย และองค์ประกอบของเส้นใย ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในขณะที่ส่วนที่เป็นของเหลวทำการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมในของเหลว

$$\text{ค่าการนำกลับของแข็ง (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักเส้นใยปาล์มหลังการปรับสภาพ (g)} \times 100}{\text{น้ำหนักเส้นใยปาล์มเริ่มต้น (g)}} \quad (1)$$

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพในระดับห้องปฏิบัติการ โดยการหมักก๊าซชีวภาพแบบกะ ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพในอัตราส่วน 3:1 gVS/gVS [12] ควบคุมอุณหภูมิในการหมัก 35 ± 1 องศาเซลเซียส โดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ 1.5 gVS และเส้นใยปาล์ม 0.5 gVS ใส่ลงในขวดหมัก ขนาด 120 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 6.0 มิลลิลิตร และสารอาหารเสริม 0.6 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน จนส่วนผสมวัสดุหมักมีปริมาตร 60 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 6.8-7.2 ด้วยกรด HCl 10% ปิดฝาขวด ต่อเติม และทรีเวย์ (ภาพที่ 1) จากนั้นนำขวดหมักเข้าตู้บ่มเพาะเชื้อที่ควบคุมอุณหภูมิ 35 ± 1 องศาเซลเซียส และเขย่าขวดหมักเป็นเวลา 1 นาที 3 ครั้ง/วัน (9.00 น. 12.00 น. และ 16.00 น.) เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์ได้สัมผัสกับผิววัสดุหมักมากยิ่งขึ้น เมื่อครบ 24 ชั่วโมง วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 1 ลักษณะของขวดหมักก๊าซชีวภาพ

การวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นหลังหมักครบ 24 ชั่วโมง โดยใช้กระบอกฉีดยาแบบแก้ว และวิเคราะห์ปริมาณก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) Shimadzu Model GC-14 คอลัมน์ WG-100 เส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{4}$ มิลลิเมตร ความยาว 1.8 เมตร Detector แบบ Thermal Conductivity Detector (TCD) อุณหภูมิ Colum oven, Injection port, Detector port 60°C ก๊าซมาตรฐานที่ใช้คือก๊าซผสม มีเทน 60% ไนโตรเจน 5% คาร์บอนไดออกไซด์ 35% โดยผลผลิตก๊าซมีเทนสามารถคำนวณได้ดังนี้ [7]

$$\text{ผลผลิตก๊าซมีเทน (L/kgVS)} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซมีเทนจากวัสดุหมัก (L)} - \text{ปริมาตรก๊าซมีเทนจากหัวเชื้อจุลินทรีย์ (L)}}{\text{น้ำหนักของเส้นใยปาล์มในรูป VS (kg)}} \quad (2)$$

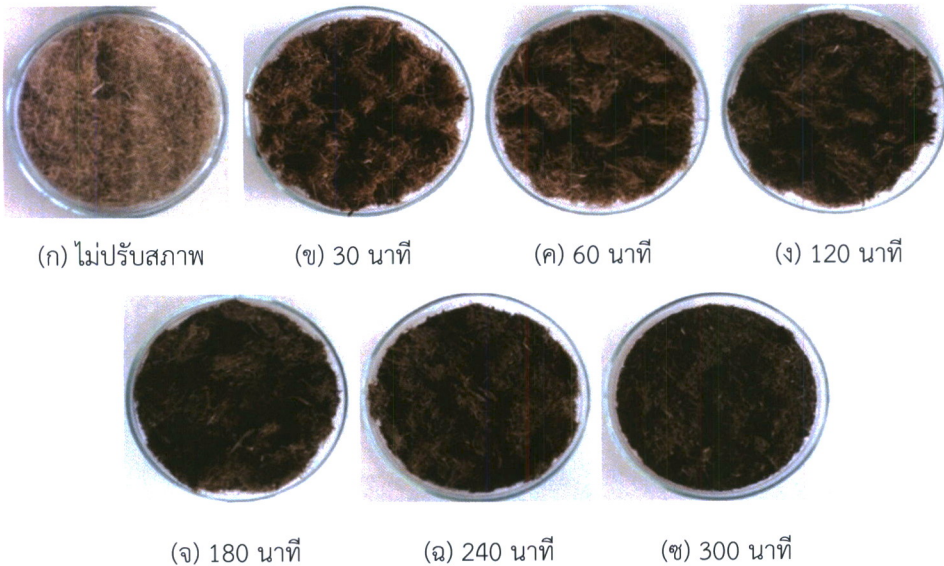
ดำเนินการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลและเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้โดยโปรแกรม SPSS Version 28 (License code: 473342a6dc5274087c98) ด้วยเทคนิค One-Way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลของระยะเวลาการปรับสภาพด้วยความร้อนที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน
จากเส้นใยปาล์ม

ผลการวิจัย

ปริมาณของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยง่าย

การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ทำให้สีของเส้นใยปาล์มเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้นตามระยะเวลาการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2 ปริมาณของแข็งน้ำหนักลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการปรับสภาพตั้งแต่ 30 นาทีขึ้นไป ส่งผลให้การนำกลับของแข็งลดลงไม่เกินร้อยละ 50 และการเพิ่มระยะเวลาปรับสภาพมากกว่า 30 นาที ไม่มีผลต่อการทำลายโครงสร้างชีวมวลอย่างรุนแรงมากนัก ค่าปริมาณน้ำหนักของแข็งจึงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 2 ลักษณะของเส้นใยปาล์มภายหลังการปรับสภาพที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ร้อยละ 97.2 ± 2.2 และปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (VS) ร้อยละ 91.1 ± 3.2 การปรับสภาพด้วยน้ำร้อน เมื่อระยะเวลาในการปรับสภาพเพิ่มขึ้นปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลงเล็กน้อย การปรับสภาพที่ระยะเวลา 180 นาที มีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูงที่สุด (ร้อยละ 98.3 ± 0.5) ปริมาณของแข็งระเหยง่ายเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาปรับสภาพเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 180 นาที มีปริมาณของแข็งระเหยง่ายสูงที่สุด (ร้อยละ 92.1 ± 1.0) ดังตารางที่ 1 อย่างไรก็ตาม เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และไม่แตกต่างจากเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวไม่ได้มีผลทำให้สารอินทรีย์ในเส้นใยปาล์มระเหยไปได้

ตารางที่ 1 ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายของเส้นใยปาล์มก่อนและหลังปรับสภาพ

ระยะเวลาปรับสภาพ (นาที)	SR (%)	TS (%)	VS (%)
เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (UnOPF)	100±0.0 ^a	97.2±2.2 ^a	91.1±3.2 ^a
30 นาที	52.2±0.2 ^c	97.0±1.9 ^a	92.0±1.0 ^a
60 นาที	52.0±0.0 ^c	97.7±0.8 ^a	90.7±0.7 ^a
120 นาที	52.5±0.4 ^{bc}	97.1±0.9 ^a	90.6±0.4 ^a
180 นาที	53.0±0.5 ^b	98.3±0.5 ^a	92.1±1.0 ^a
240 นาที	52.0±0.3 ^c	98.1±0.4 ^a	91.9±0.5 ^a
300 นาที	51.8±0.1 ^c	96.8±2.0 ^a	90.2±1.5 ^a

หมายเหตุ: a, b, c แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเส้นใยปาล์ม

เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ร้อยละ 13.7±0.3, 13.0±1.5 และ 29.1±2.1 ตามลำดับ เซลลูโลสมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเวลาในการปรับสภาพตั้งแต่ 60 นาทีขึ้นไป ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาปรับสภาพเป็น 120 180 และ 240 นาที ปริมาณเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการปรับสภาพที่ระยะเวลา 60 นาที ในขณะที่เมื่อเพิ่มเวลาปรับสภาพเป็น 300 นาที มีปริมาณเซลลูโลสลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อเทียบกับการปรับสภาพที่ระยะเวลา 60 120 180 และ 240 นาที

การปรับสภาพก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยก่อนการปรับสภาพ แต่เป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง แต่ปริมาณลิกนินเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มระยะเวลาปรับสภาพที่นานกว่า 30 นาที ไม่มีผลต่อการลดเฮมิเซลลูโลสและการเพิ่มลิกนินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของเส้นใยปาล์มก่อนและหลังปรับสภาพ

ระยะเวลาปรับสภาพ (นาที)	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (UnOPF)	13.7±0.3 ^d	13.0±1.5 ^a	29.1±2.1 ^c
30 นาที	24.4±4.0 ^c	4.0±1.5 ^b	43.9±4.1 ^{ab}
60 นาที	31.3±1.7 ^{ab}	2.9±0.9 ^b	45.7±1.2 ^a
120 นาที	32.2±0.7 ^a	2.8±1.1 ^b	46.3±1.0 ^a
180 นาที	31.5±0.1 ^{ab}	2.7±1.2 ^b	39.3±1.8 ^b
240 นาที	31.9±0.6 ^{ab}	2.5±1.4 ^b	42.6±5.3 ^{ab}
300 นาที	28.8±0.3 ^b	2.3±1.5 ^b	44.8±0.8 ^a

หมายเหตุ: a, b, c แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

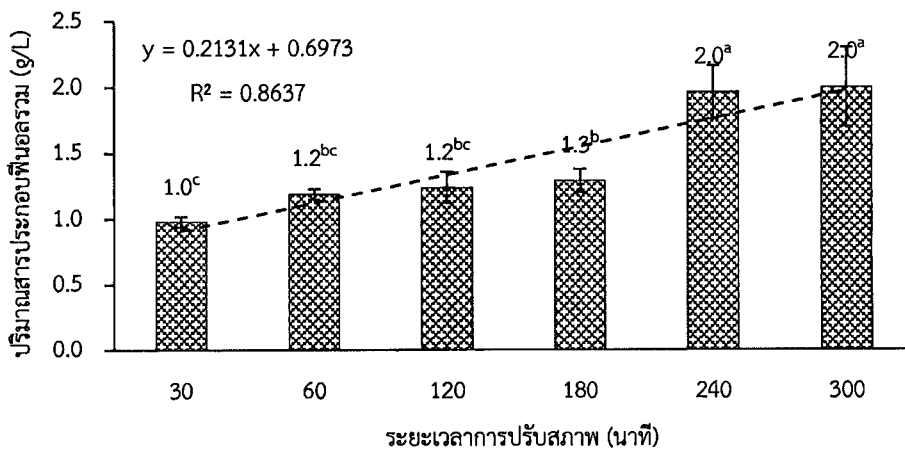
เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการปรับสภาพจาก 30 นาที เป็น 60 นาที ปริมาณเซลลูโลสมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการปรับสภาพมากขึ้น ปริมาณเซลลูโลสไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 2) ในขณะที่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างที่สั้น และไม่มีลักษณะเป็นผลึกแบบเซลลูโลส จึงถูกทำลายได้ง่ายในระหว่างการปรับสภาพด้วยน้ำร้อน เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของลิกนิน พบว่า มีปริมาณลิกนินเพิ่มขึ้นตั้งแต่ระยะเวลาปรับสภาพ 30 นาที (ร้อยละ 43.9)

ผลของระยะเวลาการปรับสภาพด้วยความร้อนที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากเส้นใยปาล์ม

และเมื่อระยะเวลาปรับสภาพเพิ่มขึ้นปริมาณลิกนินมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยระยะเวลาปรับสภาพ 180 นาที ปริมาณลิกนินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับปริมาณลิกนินที่ระยะเวลาการปรับสภาพ 30 และ 240 นาที

ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมในเส้นใยปาล์ม

สารประกอบฟีนอลรวมเป็นสารที่เกิดจากการแตกตัวของลิกนินในเส้นใยปาล์ม เมื่อดำเนินการปรับสภาพเส้นใยปาล์ม และทำการกรองตัวอย่างเพื่อแยกส่วนของเหลวมาทำการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมในของเหลว เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการปรับสภาพด้วยน้ำร้อน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการปรับสภาพด้วยน้ำร้อน จะพบสารประกอบฟีนอลรวมในของเหลวที่ได้จากการปรับสภาพเพิ่มขึ้น ($R^2 = 0.8637$) ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยมีปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมสูงสุด เมื่อปรับสภาพที่ระยะเวลา 240 นาที ขึ้นไป คิดเป็นปริมาณ 2.0 ± 0.3 g/L และมีปริมาณน้อยที่สุด เมื่อปรับสภาพที่ระยะเวลา 30 นาที คิดเป็นปริมาณ 1.0 ± 0.0 g/L ซึ่งไม่แตกต่างจากการปรับสภาพที่ระยะเวลา 60, 120 และ 180 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



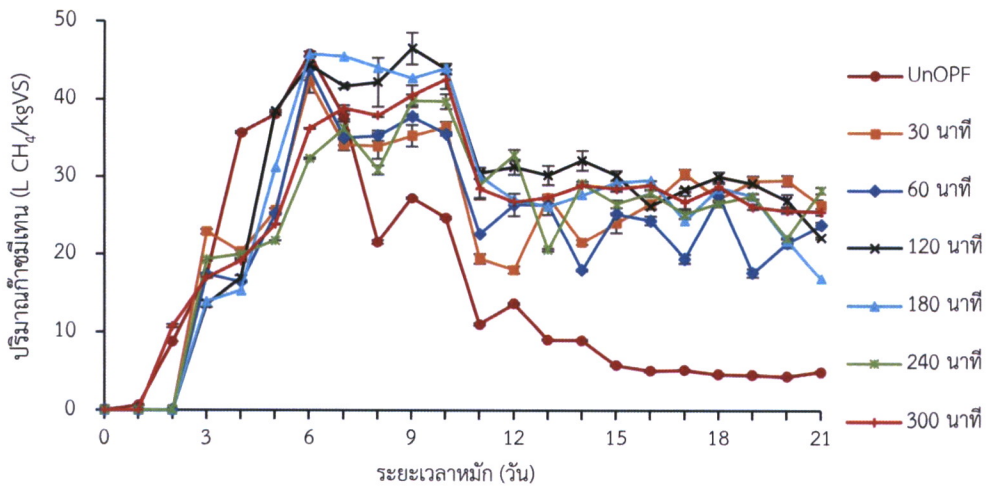
ภาพที่ 3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมหลังจากปรับสภาพเส้นใยปาล์มที่ระยะเวลาต่าง ๆ

a, b, c: ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ จากภาพที่ 4 แสดงพฤติกรรมของการเกิดผลผลิตก๊าซมีเทน การปรับสภาพที่ระยะเวลา 30, 60, 120 และ 180 นาที ปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อหมักครบ 6 วัน เท่ากับ 42.3 ± 1.5 , 43.9 ± 1.5 , 44.4 ± 0.4 และ 45.8 ± 0.4 L CH_4 /kgVS ตามลำดับ ส่วนการปรับสภาพที่ระยะเวลา 240 และ 300 นาที ปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อหมักครบ 9 วัน เท่ากับ 39.8 ± 0.8 และ 40.5 ± 1.3 L CH_4 /kgVS ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นผลผลิตก๊าซมีเทนเริ่มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงระยะแรกของการหมัก เกิดการย่อยสลายชีวมวลที่ย่อยได้ง่ายจากการปรับสภาพเส้นใยปาล์ม หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นการย่อยสลายเส้นใยปาล์มส่วนที่เหลือที่เป็นส่วนย่อยยาก จึงต้องใช้เวลาในการย่อยสลายโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนานกว่า จึงยังคงมีผลผลิตก๊าซมีเทนเกิดขึ้นแต่อยู่ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มระยะเวลาในการปรับสภาพส่งเสริมความสามารถการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ

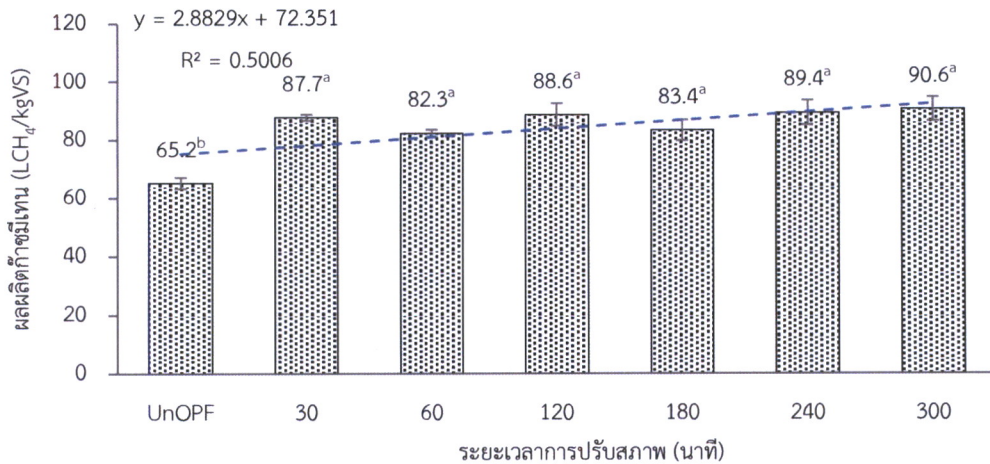
ผลของระยะเวลาการปรับสภาพด้วยความร้อนที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากเส้นใยปาล์ม



ภาพที่ 4 ปริมาณก๊าซมีเทนจากเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมจากการปรับสภาพที่ระยะเวลาต่าง ๆ ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเริ่มมีความแตกต่างกันระหว่างเส้นใยที่มีการปรับสภาพและไม่มีการปรับสภาพเมื่อมีระยะเวลาในการหมัก 15 วัน การปรับสภาพเส้นใยปาล์มที่ระยะเวลาต่าง ๆ ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนใกล้เคียงกัน โดยระยะเวลาการปรับสภาพ 300 นาที ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงที่สุด เท่ากับ 90.6 ± 4.1 L CH₄/kgVS รองลงมา ได้แก่ การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 240 120 30 180 และ 60 นาที มีผลผลิตก๊าซมีเทน 89.4 ± 4.3 88.6 ± 3.9 87.7 ± 1.1 83.4 ± 3.5 และ 82.3 ± 1.2 L CH₄/kgVS ตามลำดับ (ภาพที่ 5) เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพที่ระยะเวลาต่าง ๆ ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีความแตกต่างจากเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยรวมผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้มีค่าสูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ยังไม่ปรับสภาพ (65.2 ± 1.9 L CH₄/kgVS) เท่ากับ 1.3-1.4 เท่า

การปรับสภาพเส้นใยปาล์มที่ระยะเวลาแตกต่างกัน โดยการควบคุมอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณลิกนินในเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพที่ระยะเวลาต่าง ๆ มีปริมาณสูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปริมาณลิกนินสูงสุดเมื่อใช้ระยะเวลาปรับสภาพ 120 นาที (ร้อยละ 46.3) อย่างไรก็ตาม ในการปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน ปริมาณลิกนินที่พบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาปริมาณเฮมิเซลลูโลสพบว่า เมื่อเริ่มปรับสภาพปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งแตกต่างจากเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสที่ละลายในของเหลวเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันอีกครั้ง (repolymerization) เป็นซูโดลิกนิน (pseudo lignin) ซึ่งพบได้ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ที่เวลา 150 นาที [13] จากอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ 180 องศาเซลเซียส ในทุกช่วงเวลา จึงทำให้เกิดซูโดลิกนินในเส้นใยปาล์มขึ้นได้ จึงพบปริมาณลิกนินสูงในทุกช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ



ภาพที่ 5 ผลผลิตก๊าศมีเทนจากเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพที่ระยะเวลาแตกต่างกัน
a, b: ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

อภิปรายผลการวิจัย

การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลาแตกต่างกัน มีผลต่อการแยกลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใยปาล์ม สารประกอบฟีนอลรวมเป็นสารละลายอินทรีย์ที่เกิดจากการสลายตัวของลิกนิน การเพิ่มความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลรวมมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มอุณหภูมิ โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสขึ้นไป มีความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลรวมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว [14] แสดงว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยควบคุมการสลายตัวของลิกนินในโครงสร้างชีวมวล อย่างไรก็ตามปริมาณลิกนินที่ตรวจพบในชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพกลับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาปรับสภาพ นอกจากนี้จากผลการศึกษพบว่า การลดลงของปริมาณเฮมิเซลลูโลสมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม (ภาพที่ 3) ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินที่เพิ่มขึ้น เกิดขึ้นได้จากสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสลดลง เพราะเฮมิเซลลูโลสย่อยสลายได้ง่ายเมื่อถูกความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสขึ้นไป เมื่อเทียบกับเซลลูโลสและลิกนิน [15] นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสขึ้นไป สามารถเกิดซูโดลิกนิน (pseudo lignin) จากการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสเป็นน้ำตาลไซโลส และเฟอร์ฟูรัล (furfural) แล้วเกิดการพอลิเมอไรเซชันอีกครั้งเป็นซูโดลิกนินได้อีกด้วย [13] อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าการเพิ่มระยะเวลาปรับสภาพไม่ได้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณลิกนินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าศมีเทนจากเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า ระยะเวลาการปรับสภาพที่ 30 นาที เริ่มให้ผลผลิตก๊าศมีเทนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ การปรับสภาพได้ทำลายเฮมิเซลลูโลสแล้วอย่างน้อยร้อยละ 69 ที่ระยะเวลาปรับสภาพ 30 นาที และมีผลร้อยละ 34.5 ต่อการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าศมีเทนเมื่อเทียบกับเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ แม้ว่าการเพิ่มระยะเวลาปรับสภาพส่งเสริมการทำลายเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น แต่การตกค้างลิกนินเป็นอุปสรรคสำคัญต่อความสามารถการย่อยเซลลูโลส เนื่องจากลิกนินเป็นเหมือนผนังที่ป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการปรับสภาพ จึงไม่ได้เป็นการเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าศมีเทนแต่อย่างใด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณลิกนินที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพ 30 นาทีขึ้นไป ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพเส้นใยปาล์มเพื่อผลิตก๊าศมีเทน คือ 30 นาที หากลดระยะเวลาการปรับสภาพด้วยความร้อนลงอาจต้องใช้เวลาปรับสภาพด้วยน้ำร้อนร่วมกับแรงดัน [16]

สรุปผลการวิจัย

ระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยน้ำร้อน คือ 30 นาที มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ 87.7 ± 1.1 L CH₄/kgVS ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเพิ่มระยะเวลาการปรับสภาพ การปรับสภาพที่ระยะเวลา 30 นาที เป็นระยะเวลาที่สั้นและไม่สิ้นเปลืองพลังงาน แต่สามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ถึง 1.3 เท่า ของเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ การผลิตก๊าซชีวภาพเป็นแนวทางหนึ่งในการนำเส้นใยปาล์มมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และลดของเสียสะสมในสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์เส้นใยปาล์มและหัวเชื้อจุลินทรีย์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย บริษัท ปาล์มไทยพัฒนา จำกัด ต.อุโตเจริญ อ.ควนกาหลง จ.สตูล ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Switzerland: IPCC.
- [2] กระทรวงพลังงาน. (2558). *แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <http://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/AEDP2015.pdf> (3 มีนาคม 2563).
- [3] อีระพงศ์ จันทรมิยม. (2551). กระบวนการไร้ของเสียในอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม. *วารสารหาดใหญ่วิชาการ*, 6(2), 159-164.
- [4] Chavalparit, O., Rulkens, W. H., Mol, A. P. J., & Khaodhair, S. (2006). Option for environmental sustainability of the crude palm oil industry in Thailand through enhancement of industrial ecosystems. *Environment, Development and Sustainability*, 8, 271-287.
- [5] O-thong, S., Boe, K., & Angelidaki, I. (2012). Thermophilic anaerobic co-digestion of oil palm empty fruit bunches with palm oil mill effluent for efficient biogas production. *Applied Energy*, 93, 648-654.
- [6] รัชพล พวงศรีรัตน์. (2558). กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University*, 2(1), 143-157.
- [7] Charnnok, B., Sawangkeaw, R., & Chaiprapat, S. (2020). Integrated process for the production of fermentable sugar and methane from rubber wood. *Bioresource Technology*, 302, 122785.
- [8] สุเมธ ไชยประพัทธ์. (2560). *เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพประยุกต์ เพื่อการบำบัดของเสีย ผลิตพลังงาน และหมุนเวียนทรัพยากรชีวภาพ*. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [9] Sluiter, A., Hames, B., Hyman, D., Payne, C., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Wolfe, J. (2008). *Determination of Total Solids in Biomass and Total Dissolved Solids in Liquid Process Samples*. National Renewable Energy Laboratory (NREL). [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.nrel.gov/docs/gen/fy08/42621.pdf> (28 ธันวาคม 2564).

- [10] Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2008). *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass*. National Renewable Energy Laboratory (NREL). [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.nrel.gov/docs/gen/fy11/42618.pdf> (28 ธันวาคม 2564).
- [11] Blainski, A., Lopes, G. C., & de Mello, J. C. (2013). Application and analysis of the folin ciocalteu method for the determination of the total phenolic content from *Limonium brasiliense* L. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 18(6), 6852-6865.
- [12] Dechrugsa, S., Kantachote, D., & Chaiprapat, S. (2013). Effect of inoculum to substrate ratio, substrate mix ratio and inoculum source on batch co-digestion of grass and pig manure. *Bioresource Technology*, 146, 101-108.
- [13] Ma, X., Yang, X., Zheng, X., Chen, L., Huang, L., Cao, S., & Akinoshio, H. (2015). Toward a further understanding of hydrothermally pretreated holocellulose and isolated pseudo lignin. *Cellulose*, 22, 1687-1696.
- [14] พลากร บุญใส, บุญญา ชาญนอก และสุชีวีวรรณ ยอยรู้รอบ. (2563). การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อผลิตมีเทนจากเส้นใยปาล์มโดยการปรับสภาพด้วยน้ำร้อน. *Rajabhat J. Sci. Humanit. Soc. Sci.*, 21(2), 311-321.
- [15] Li, C., Liu, G., Nges, I. A., & Liu, J. (2016). Enhanced biomethane production from *Miscanthus lutarioriparius* using steam explosion pretreatment. *Fuel*, 179, 267-273.
- [16] Eom, T., Chaiprapat, S., & Charnnok, B. (2019). Enhanced enzymatic hydrolysis and methane production from rubber wood waste using steam explosion. *Journal of Environmental Management*, 235, 231-239.